Министерство образования и науки Украины

В Е С Т Н И К

Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

Выпуск 12 (1121)
Основан в 1961 г.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Тематический выпуск, посвященный 130-летию НТУ «ХПИ»
и 85-летию кафедры
«Автоматизированные электромеханические системы»

Харьков 2015

УДК 62-83-52-0313
Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: НТУ «ХПІ», 2015, 12 (1121). – 572 с.

У Віснику надані результати наукових досліджень і розробок, виконані викладачами, докторантами та аспірантами вищої школи, НАН України, науковими співробітниками науково–дослідних і проектно–конструкторських організацій, працівниками промислових підприємств, а також рекомендовані редколегією статті з проблем автоматизованого електроприводу, силової електроніки та підготовки кадрів з напрямку «Електромеханіка». Викладено нові методи аналізу і синтезу електромеханічних систем, розробки сучасних промислових електроприводів, їхніх елементів та діагностики. Значна увага приділена питанням енергозбереження. Розглянуто аспекти застосування сучасних систем силової електроніки, новітні схемотехнічні рішення та алгоритми керування енергоефективних перетворювачів та систем на їх основі. Висвітлено питання поліпшення електромагнітної сумісності таких систем, а також систем на базі накопичувачів великої ємності.

The Bulletin presents results of research and application developments accomplished by lecturers, doctors, and postgraduate students of higher education institutes as well as by specialists of National Academy of Sciences of Ukraine, research and design bureaux, and industrial enterprises. Also articles on problems of automated electric drive, power electronics and electromechanical engineers training recommended by the Editorial Board are included. The issue introduces new techniques of both analysis and synthesis of electromechanical systems, development and diagnostics of modern industrial electric drives and their components. Much attention is paid to problems of energy saving. Aspects of power electronics modern systems application, the newest circuit-engineering decisions and control algorithms of energy-efficient converters and it's systems are considered. The question of such systems electromagnetic compatibility improvement, and also systems on the basis of the big capacity accumulators is observed.

Редакційна колегія: академік НАН України А.В. Кириленко, академік НАН України Б.С. Стогній, член-корр. НАН України Є.І. Сокол, член-корр. НАН України В.Ю. Розов, д.т.н. Л.В. Акімов, д.т.н. О.С Бешта, д.т.н. В.А. Водічев, д.т.н. Р.П. Герасимяк, д.т.н. В.В. Грабко, д.т.н. В.Т. Долбня, д.т.н. Г.Г. Жемеров, д.т.н. В.Б. Клепіков (головний редактор), проф. С.Ю. Кривошеєв, д.т.н. Б.І. Кузнецов, д.т.н. О.Ю. Лозинський, проф. О.І. Мотченко, к.т.н. О.В. Осічев (відповідальний секретар), д.т.н. С.М. Пересада, д.т.н. Д.Й. Родькін, д.т.н. О.В. Садовой, д.т.н. О.І. Толочко, д.т.н. О.П. Чорний, проф. В.М. Шамардина, д.т.н. М.М. Юрченко.

Адреса редакційної колегії: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
тел. (057) 707-62-26, 707-69-74, 707-64-45

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» протокол № 7 від « 3 » липня 2015 р.

© Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», 2015

ISSN 2079-3944

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Кириленко О.В.
Звернення до читачів ... 8
Сокол Є.І.
Привітання учасникам конференції ... 9

Социально-экономические проблемы электропривода. Учебный процесс ... ***10***

Клепиков В.Б.
К 85-летию кафедры «автоматизированные электромеханические системы» ... 11
Сокол Е.І.,Гриб О.Г., Белов Н.С., Гапон Д.А., Шевченко С.Ю.
Сетецентрическое диспетчерское управление в электроэнергетике ... 18
Родькін Д. Й., Чорний О. П.
Історія створення та досвід роботи Кременчуцької школи електроприводчиків ... 22
Барский В.А.
Международный консорциум «Энергосбережение» (www.mke.com.ua) – 20 лет разработок и внедрения нового электрооборудования для различных отраслей ... 29
Анищенко Н.В.,Тимощенко А.В., Ткаченко А.А.
Создание на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» удаленной лаборатории ... 33
Мещанинов С.К., Трикило А.И., Копытова Е.А.
Математическая модель возрастной периодизации продолжительности жизни человека ... 39

Теоретические вопросы автоматизированного электропривода ... ***43***

Пересада С. М., Благодір В. О.
Бездавачеве керування в системах на основі машини подвійного живлення: короткий аналітичний огляд ... 44
Островерхов Н.Я., Пыжов В.М.
Оптимизация законов управления вентильно-индукторным электроприводом ... 48
Бур'ян С.О., Печеник М.В., Боднар Д.О.
Оптимальне керування насосною установкою з варіацією параметрів гідравлічної мережі ... 54
Волянский Р. С., Садовой А. В.
Синтез управляющего воздействия для электромеханических объектов с неизвестными параметрами ... 60
Клепиков В.Б., Тимощенко А.В.
Кобинированное определение буксования и юза колес рудничного электровоза с использованием программируемой логической интегральной схемы ... 64
Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В.
Исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем ... 68
Полилов Е.В.
О границах достижимости теории автоматического управления ... 72
Худяев А. А.
Математическая модель движения итерационного двухканального электропривода механизма подачи с двумя винтовыми парами ... 83
Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Шавелашвили Г.В., Тугуши М.А
Улучшение коэффициента реактивной мощности технологического комплекса с групповым асинхронным электроприводом ... 89
Дерец А.Л., Садовой А.В.
Оптимизация по быстродействию режима «большого треугольника» релейной системы четвёртого порядка методом n-i переключений ... 96
Петрушин В.С., Якимец А.М., Еноктаев Р.Н.
Многоаспектное моделирование работы регулируемых асинхронных двигателей при разных законах частотного управления ... 101
Тверд М., Копчак Б. Л.
Самоналагодження параметрів регулятора швидкості електромеханічної системи з мікропроцесорним керуванням методом рою частинок ... 107
Худяев А. А., Поленок В. В., Голобородько С. В.
Структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального электропривода подачи с двумя винтовыми парами и учетом процесса резания ... 111

Толочко О.І.
Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета Matlab з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання simscape 118
Стяжкин В. П., Подейко П.П.
Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна 124
Синчук О. Н., Михайличенко Д. А.
Исследование переходных процессов при пуске синхронного электрического двигателя на базе замкнутой системы регулирования 128
Кузнецов В.В., Николенко А. В., Иващенко В.П.
Разработка вероятностной модели цеховой электрической сети 132
Приймак Б. І.
Властивості асинхронного електроприводу з максимізацією момента у зоні високих швидкостей ротора..... 142
Морозов Д.И., Руднев Е.С., Шевченко И.С.
Аналитический метод расчета пусковых сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя 147
Сінчук О.М., Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А.
Дослідження систем бездатчикового векторного керування асинхронними двигунами з ковзним режимом при роботі на низькій кутовій швидкості 150
Задорожний Н.А., Задорожняя И.Н.
Синтез параметров астатической системы автоматического управления двухмассовыми электроприводами с заданной степенью устойчивости и минимальной колебательностью 155
Обруч И. В., Хорева А. В.
Новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах 160
Рябенький В.М., Ушкаренко А.О., Язид Джамал Исмаил Аль-шайх
Модель для исследования судовых электроэнергетических систем в аварийных и динамических режимах работы 164
Алексеевский Д.Г.
Определение передаточной функции звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием 168
Морозов Д.І., Шевченко І.С.
Асинхронні режими безколекторного двигуна постійного струму на базі явнополюсної синхронної машини оберненої конструкції 173

Современные системы промышленного электропривода* *179

Чермалых В. М., Чермалих А. В., Майданский И. Я.
Исследование динамики и энергетических характеристик ленточных конвейеров с регулируемым ЭП..... 180
Черный А.П., Сидоренко В.Н., Артеменко А.Н.
Режимы работы многодвигательного тягового электропривода карьерных электровозов 185
Ребедак О.А., Задорожний Н.А., Верешко В.П., Бакан С.А.
Особенности работы многодвигательных электроприводов кранов металлургических электрических литейных 190
Клепиков В. Б., Гончар А. С., Семиков А. В., Моисеев А. Н., Касторный П. М., Тимощенко А. В., Пшеничников Д. А., Ковтун В. В., Банев Е. Ф., Хорева А. В.
Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии..... 195
Шамардина В.Н., Лемешко С.М., Яровой Г.И.
Система выравнивания коэффициентов тяги по осям тепловоза..... 199
Гузов Е. С., Сінчук І. О., Чорна В. О., Сменова Л. М.
Розробка безсенсорного способу захисту тягових електричних двигунів рудничних електровозів від перегріву 204
Любарский Б. Г., Буряковский С. Г., Маслий Ар. С., Маслий Ан. С.
Исследование работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя..... 209
Зачепа Ю. В.
Условия гарантированного возбуждения асинхронного генератора автономного формируемого источника 214
Ноженко В. Ю., Родькин Д. И., Ченчевой В. В.
Особенности пуска зарезонансных вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями..... 218
Лимонов Л. Г.
Новая серия электродвигателей переменного тока фирмы Сименс..... 224
Клепиков В.Б., Коротаев П.А.
Особенности пуска электроприводов насосной станции после аварийного отключения 228

Шокарев Д.А., Федотов В.А.
Исследование макетного образца тягового асинхронного электропривода рудничного контактно-аккумуляторного электровоза 234
Блінцов В.С., Волянський С.М.
Удосконалення автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата..... 238
Кравцов А. А., Куприянов А.А., Лимонов Л. Г., Потапов С. В., Синельников В. В.
Автоматизированный электропривод летучей пилы в системе мерного реза 244
Обруч И. В., Кутовой Ю. Н.
Нейросетевая система управления электропривода электровоза арп14 с учетом упругости кинематических связей 248
Синчук О.Н., Сёмочкин А.Б., Федотов В.А.
Оценка влияния факторов на предельную величину ударного усилия в сцепном устройстве при перемещении пары «электровоз-вагонетка» при различных способах управления электровозом..... 251
Шкурпела О.О., Яцько С.І., Тукалов І.О.
Аналіз схеми електропередачі модернізованого тепловоза ЧМЕЗм з двома силовими установками. 257
Сивякова Г.А., Лимонов Л.Г.
Повышение надежности промышленных электроприводов посредством резервирования 260
Матусевич О.О.
Методологічні підходи підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій на основі безперервного вдосконалення fmea..... 265
Босый Д.О.
Учет потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения..... 270
Осадчий В. В.
Определение вибрационного момента отдельного дебаланса регулируемого вибровозбудителя..... 274
Сінчук О.М., Бойко С.М.
Моделювання режимів роботи вітрової мініелектростанції на базі комбінованого контролера при функціонуванні в умовах залізорудних шахт 277
Синчук И.О., Омельченко О.В., Федотов В.А.
Анализ условий и режимов функционирования тяговых электромеханических систем рудничных контактных электровозов в условиях железорудных шахт 283
Пересунько И. И., Антоненко А.О.
Влияние отклонения напряжения питающей сети на работу асинхроного электропривода в горнорудных предприятиях 288
Вінниченко Д. В., Назарова Н. С.
Розробка принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів..... 292

Элементы автоматизированного электропривода 298

Сёмин А.А.
Выбор частоты дискретизации при снятии экспериментальных данных в задаче идентификации параметров схемы замещения АД 299
Палис С., Плюгин В.Е., Масленников А.М.
Применение генетического алгоритма оптимизации в проектировании электрических машин 303

Диагностика элементов и узлов электромеханических систем..... 307

Гаврилец Г. О, Родькин Д. И.
К задаче оценки виброактивности элементов электромеханической системы..... 308
Горкунов Б. М., Львов С. Г., Тищенко А. А., Ву Суан Выонг
Бесконтактный контроль механических напряжений в цилиндрических образцах дифференциальным электромагнитным преобразователем 312
Гриб О.Г., Гапон Д.А., Сиротин Ю.А., Иерусалимова Т.С., Дяченко А.В.
Мониторинг качества электроэнергии на цифровых подстанциях..... 316
Левицький С. М., Проценко Д. П., Бартецький А. А.
Система діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти..... 320
Колиушко Д.Г., Руденко С.С.
Интерпретация результатов вертикального электрического зондирования в виде четырехслойного геоэлектрического полупространства 324
Зачепа Н.В., Зачепа Ю.В., Сергієнко С.А.
Програмно–логічний комплекс для дослідження дизель–генераторних установок з асинхронними генераторами..... 330

Коломиец В.В., Лутай С.Н., Кобылянский Б.Б.
Измеритель магнитного потока системы диагностики электромагнитов 334
Коломиец В.В., Лутай С.Н., Кобылянский Б.Б.
Устройство диагностики электромагнитов 336

Энергетика и энергосбережение ***338***

Жемеров Г.Г., Тугай Д.В.
Уточнение универсальной формулы для определения суммарной мощности потерь в трехфазных системах электроснабжения 339
Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., Деркачев С.В.
Способы выявления асинхронных режимов в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями 344
Деев С.Г.
Энергосберегающее управление электроприводом с синхронным двигателем 348
Тытюк В.К.
Пути решения задачи энергоресурсосбережения в теории оптимальных электромеханических систем управляемого запуска 352
Моисеев А.Н.
Энергоэффективная турбоэлектромеханическая система для газораспределительных станций 356
Черно А.А., Гуров А. П.
Оптимизация частоты колебаний вибрационных установок с электромагнитным приводом по критерию максимума КПД 360
Сиченко В.Г.
Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму 364
Говоров П.П., Король О.В., Романова Т.І.
Підвищення ефективності знезараження води в системах водопостачання міст 369
Калашников В.И., Ткаченко С.Н., Хижняк П.А.
Автономные микрогрид-системы с возобновляемыми источниками энергии, как элемент концепции Smart Grid. Перспективы развития 374
Білецький О.О., Щерба А.А., Супруновська Н.І.
Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей 379

Силовая электроника ***384***

Л.Е. Бахнов Л.Е., Панасенко В.Н.
Блок выпрямительный полупроводниковый модернизированный для электровозов 385
Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В.
Верификация расчета элементов и качественных показателей работы системы электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром 394
Губаревич В.Н., Маруня Ю.В.
Однофазный широкополосный LMC-фильтр на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой 398
Ивахно В.В., Замаруев В.В., Стысло Б.А., Винников Д.В., Чуб А.И., Косенко Р.А.
Обратимый двузхвенный преобразователь постоянного напряжения с разделенной коммутацией и с неизменным знаком входного и выходного напряжений 402
Садовой А.В., Сохина Ю.В.
Модифицированный принцип симметрии в решении задач аналитического конструирования регуляторов 408
Щур В.І.
Система керування енергопотоками в когенераційній автономній вітроенергоустановці 414
Семененко Ю.О.
Комбінований активний фільтр послідовного типу з імпульсною системою керування при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження 420
Кипенский А.В., Король Е.И.
Анализ на координатной плоскости регулировочных характеристик импульсных преобразователей постоянного напряжения с регуляторами по входному возмущению 425
Плахтий А.А.
Анализ энергетических характеристик активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности при работе с постоянной частотой модуляции 430
Ламанов С.Л., Перетятко Ю.В., Бєлянін Р.В.
Використання регульованого магнітного зв'язку в індукційних установках з напівпровідниковим послідовним резонансним однокомірковим інвертором 435

Омельченко О.В., Козлов В.С.
Силовий активний фільтр із системою екстремального регулювання ... 439
Щербак Я.В., Ивакина Е.Я., Панченко В.В.
Импульсная модель выпрямителя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией в режиме непрерывного тока ... 443
Кушнір А. П., Оксентюк В. М., Стефанович Т. О., Щербовських С. В.
Модель надійності для аналізу причин непрацездатності системи повороту платформи пожежного автопідйомника ... 449
Ягуп В.Г., Ягуп Е.В.
Электропитание асинхронного двигателя в системе с силовым активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму ... 453
Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А.
Зависимость энергоэффективности цепей разряда суперконденсаторов на линейную активную нагрузку от условий прерывания разрядных токов ... 458
Белоха Г.С., Самчелеев Ю.П., Дрючин В.Г.
Влияние дестабилизирующих факторов на работу источников питания с релейным управлением ... 463
Панкова О.О.
Анализ эффективности работы электромеханической системы вэу при изменении скорости ветрового потока ... 467
Саратовский Р.Н., Ушаков В.И., Ушаков Д.В.
Анализ результатов моделирования режимов работы многоячейкового источника питания для индукционного нагрева ... 471
Діденко В.О., Бондаренко О.Ф.
Якість функціонування системи керування гідроприводом механізму хитання кристалізатора МБЛЗ ... 477
Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Король О.В.
Підвищення надійності роботи вольтододавальних трансформаторів з електронним управлінням у складі ESS ... 481
Говоров Ф.П., Говоров В.П., Король О.В.
Повышение надежности работы вольтодобавочных трансформаторов с электронным управлением в составе ESS
Щерба М.А.
Влияние характера распределения влаги в СПЭ изоляции кабелей на электрофизические процессы ее деградации ... 485
Павлов Г. В., Обрубов А. В., Винниченко И. Л.,
Преобразователь частоты на основе резонансного инвертора с нелинейніым управлением ... 490
Мустафа Г.М., Гусев С.И., Ершов А.А., Луганская И.Б.
Модульные многоуровневые преобразователи для симметрирования и фильтрации сетевого напряжения в окрестности тяговой подстанции переменного тока ... 495

Информация ... ***501***

Мехович С.А.
Мехатроніка у контексті регіональної промислової політики ... 502
Наши юбиляры
Півняк Г.Г (до 75-річчя з дня народження). ... 506
Садовой А.В. (к 70-летию со дня рождения) ... 507
Барский В.А. (к 80-летию со дня рождения) ... 508

Аннотации ... 509

Сведения об авторах ... 542

Авторский указатель ... 571

Шановні читачі!

Від імені Відділення фізико-технічних проблем енергетики Національної академії наук України та Інституту електродинаміки вітаю колектив кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» із знаменною подією – 85-річним ювілеєм, який співпав з іншою визначною датою – 130-річчям найстарішого технічного ВНЗ України – Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

За роки свого існування кафедра підготувала більше 5 тисяч кваліфікованих спеціалістів-електромеханіків, які внесли значний вклад у розвиток промисловості України, вирішення питань автоматизації технологічних процесів для багатьох флагманів вітчизняної промисловості: ХТЗ, ХЕМЗ, заводів ім. Малишева, турбінного, Електроважмашу та практично всіх металургійних комбінатів країни, серед яких «Азовсталь», «Запоріжсталь», «Криворіжсталь» та інших.

Колективу кафедри завжди були притаманні високий професіоналізм та динамізм в освоєнні нових галузей знань, бажання відгукуватися на найбільш актуальні запити економіки та новітні наукові досягнення. Електротехнічній громадськості добре відомі дослідження та розробки вчених кафедри. Серед досягнень кафедри слід відзначити роботи з вирішення питань енергозаощадження засобами електроприводу, використання новітніх методів аналізу та синтезу, в тому числі топологічних методів, методів нейронних мереж та генетичних алгоритмів, наглядачів стану для синтезу електромеханічних систем із заданими показниками регулювання тощо.

Велика заслуга колективу кафедри – у згуртуванні та активізації наукової діяльності фахівців електротехніків України в галузі електроприводу. У складний період становлення нашої держави провідні фахівці кафедри стали ініціаторами проведення у 1993 р. першої науково-технічної конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», яка надалі перетворилася на авторитетну міжнародну подію. З того часу в роботі конференції Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» взяли участь представники 30 країн світу. За цей період 57 її учасників стали докторами, а понад 150 – кандидатами наук.

Виданню цього Вісника передує проведення об’єднаної конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» та «Силова електроніка та енергоефективність». Конференцію організували споріднені кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» та «Промислова електроніка».

Як директору Інституту електродинаміки НАН України мені особливо приємно вітати учасників конференції, бо наш інститут має давні «родинні» зв'язки з НТУ «ХПІ» та з цими кафедрами. Хочу нагадати, що засновником і першим директором Інституту електротехніки, а нині Інституту електродинаміки був видатний вчений-електротехнік вашого вищого навчального закладу академік В.М.Хрущов. Закладені в ті часи зв'язки і зараз проявляються в подальшій творчій співпраці наших колективів.

Бажаю читачам Вісника та учасникам конференції доброго здоров’я, наснаги та нових творчих успіхів.

З повагою,

О.В. Кириленко
Академік-секретар
Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України,
директор Інституту електродинаміки НАН України

Привітання учасникам конференції

Щиро вітаю учасників та організаторів спільної конференції, присвяченої проблемам автоматизованого електроприводу та силової електроніки й енергоефективності! Знаменно, що вона проводиться напередодні ювілею Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», чиє 130-річчя ми відзначаємо цього року. НТУ «ХПІ» – це всесвітньо відомий навчально-науковий комплекс, в його історію, в розвиток наукових досліджень вагомі сторінки вписали вчені обох кафедр – організаторів нинішньої конференції. 85 років тому була створена нинішня кафедра «Автоматизовані електромеханічні системи». Її засновником був видатний вчений, педагог і організатор вищої школи, заслужений професор України, професор П.П. Копняєв – основоположник української електротехнічної школи.

Викладачі і вчені кафедри, тисячі її випускників зробили великий внесок в індустріалізацію України, електрифікацію і автоматизацію промислових підприємств, створили нові наукові напрямки в галузі динаміки електромеханічних систем, застосування топологічних методів для аналізу і синтезу динамічних процесів в електроприводах, стали піонерами у використанні методів нейронних мереж та генетичних алгоритмів для управління електромеханічними системами.

Проведення спільної конференції має позитивно вплинути на підвищення ефективності наукових досліджень обох кафедр, які працюють у такій важливій для нашої країни галузі.

Кафедра «Промислова та біомедична електроніка» досягла великих успіхів, працюючи в галузі оптимізації енергетичних та динамічних показників вентильних перетворювачів і систем на їх основі, розробляючи й досліджуючи мікропроцесорні системи керування напівпровідниковими перетворювачами, автономні перетворювачі, перетворювальні системи з покращеними енергетичними показниками. Вчені кафедри, відповідаючи на вимоги часу та науково-технічного прогресу, постійно розширюють коло своїх наукових інтересів. Сьогодні це й медична електроніка, і силова електроніка в енергетиці, і матеріалознавство, і мікроелектроніка, пов’язана з виробництвом нетрадиційних джерел енергії. Досягнуто помітного прогресу в галузі створення нових типів електронних приладів тощо.

Колективи обох кафедр не скорилися труднощам, пов’язаним із економічними та іншими негараздами перехідного періоду в українській економіці. В складні для науки й вищої школи 90-і роки ви започаткували й продовжили проведення міжнародних науково-технічних конференцій, які величезною мірою сприяли збереженню й розвитку наукових надбань у своїх галузях, надали імпульсу підготовці нових поколінь вчених, зберегли й розвинули творчі контакти фахівців з усієї України і близького й далекого зарубіжжя. І по сьогодні діють і приносять незаперечну користь для розвитку науки й економіки конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» та «Силова електроніка і енергоефективність». Проводячи сьогоднішню спільну конференцію, ви робите вагомий внесок у розбудову української держави, оскільки питання, які на ній розглядаються, носять глобальний для нашої країни характер. Становлення нової держави, а саме цей процес триває зараз в Україні, майже завжди потребує нових розробок у такому напрямі як енергозбереження. Питання надійності електропостачання, якості електроенергії, застосування енергоефективних технологій та обладнання, ресурсозбереження та ефективне використання традиційних і відновлювальних джерел енергії є надзвичайно актуальними в умовах нашого часу.

Упевнений, що професійна дискусія та обмін досвідом дадуть новий імпульс подальшому розвитку пріоритетної для України галузі, впровадженню сучасних технологій підвищення енергоефективності і енергозбереження.

Бажаю всім учасникам конференції успіхів, конструктивної роботи і нових здобутків!

З повагою,

Є. І. Сокол
Ректор НТУ «ХПІ», д.т.н., професор,
член-кореспондент Національної академії наук України.

Социально-экономические проблемы электропривода. Учебный процесс

УДК 621.34

В. Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АЭМС НТУ «ХПИ»

К 85-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

85-летие кафедры совпало с 130-летием нашего университета. Открытый в 1885 г. Харьковский технологический институт (ХТИ) стал первым техническим высшим учебным заведением Украины того времени. В разные годы в ХТИ работали выдающиеся ученые, заложившие академические и научные традиции института: первый ректор В.Л. Кирпичев, через 13 лет ставший первым ректором Киевского технологического института, академик А.М. Ляпунов, автор теории устойчивости, академик Н.Н. Бекетов – основатель физической химии, профессор Н.Д. Пильчиков – «украинский Тесла», один из основоположников радиотелеуправления, академик В.А. Стеклов, имя которого носит всемирно известный институт математики, Лауреат нобелевской премии физик Л.Д. Ландау, академики Г.Ф. Проскура, В.И. Атрощенко, А.С. Бережной и многие другие, упомянутые в книгах об истории ХПИ, изданных к 100-летию и 125-летию ВУЗа [1, 2].

Некоторые из основных моментов истории кафедры в связи с ее 75-летием были изложены в 2005 г. в публикации [3]. В поздравлении коллективу кафедры в связи с вышеуказанным юбилеем Президент национальной академии наук Украины Б.Е. Патон отметил большие заслуги кафедры в подготовке «понад 4,5 тисяч висококваліфікованих інженерів, які роблять великий внесок у справу електрифікації і індустріалізації України, забезпечують проектування та введення до експлуатації найбільших промислових підприємств країни... Серед випускників кафедри багато відомих вчених, докторів та кандидатів наук, лауреатів Державних премій. Це підтверджує високу фундаментальну підготовку, значимість та вагу результатів проведених досліджень».

Хотя цель данной публикации – отразить развитие кафедры за последующий 10-летний период (2005-2015 г.г.), представляется целесообразным напомнить некоторые факты из ее истории.

Созданию кафедры в 1930 г. предшествовали годы зарождения и развития высшего электротехнического образования в Харьковском технологическом институте. На начальном этапе курсы по теории электричества и теории динамоэлектрических машин читались профессором физики А.К. Погорелко, работавшим также в Харьковском университете, а затем – профессором Н.П. Клобуковым, получившим электротехническое образование в Мюнхенском университете и проработавшим в нем несколько лет после окончания. В дальнейшем А.К. Погорелко был избран городским головой Харькова и немало сделал для развития города, а Н.П. Клобуков отдал предпочтение электрохимическому направлению науки [1, 4].

Активное развитие электротехники в ХТИ началось с приходом в 1898 г. Павла Петровича Копняева после получения им электротехнического образования в Дармштадском университете (Германия). Вскоре после прихода под его руководством началось дипломное проектирование и был произведен выпуск 5-ти первых инженеров электротехнического профиля.

В 1904 г. он издает фундаментальный труд «Электрические машины постоянного тока» (478 стр., 382 рис.), который на протяжении трех десятилетий был основным учебником при подготовке инженеров-электромехаников всей страны. Уже в то время П.П. Копняев читает лекционные электротехнические курсы с изданием их литографическим способом по теории электричества и магнетизма, электрическим машинам, электрическим установкам, электрическим измерениям, технике высоких напряжений, расчету электрических сетей и др. П.П. Копняеву принадлежит авторство вывода общих уравнений для электродвигателей, аналитических методов расчета магнитного поля в зазоре, методика расчета электрической тяги, предложения по созданию абсолютной системы единиц, пионерских работ по электрическому моделированию [5, 6]. Предвидя эру электрификации, он подготовил проект создания в ХТИ электротехнического факультета и обращался с просьбой о его открытии в высшие инстанции в 1903, 1907, 1912, 1914 г.г. и, наконец, добился этого в 1921 г. До 1921 г. подготовка инженеров-электротехников осуществлялась на механическом факультете, деканом которого до избрания его в 1919 г. ректором был П.П. Копняев. Он был инициатором создания в Харькове ныне широко известного института метрологии. Благодаря ему для работы в ХТИ были привлечены выдающиеся профессора А.А. Потебня и В.М. Хрущев – впоследствии академик и основатель в Харькове института энергетики, ставшего после переезда в Киев в 1974 г., флагманом электротехнической науки в Украине – институтом электродинамики Национальной академии наук.

Многие видные электротехники – ученые, работники производства, проектно-наладочных и исследовательских организаций: В.Н. Кияница, О.Б. Брон, Е.М. Синельников, Г.И. Штурман, Н.А. Тищенко, А.Я. Бергер, Н.И. Борисенко, И.С. Рогачев, Ф.А. Ступель, Н.В. Копытов, С.М. Фертик, В.А. Булгаков и многие другие – воспитанники и ученики Павла Петровича. Огромная заслуга его и его учеников в том, что благодаря началу и неуклонному возрастанию выпуска электроинженеров в Харькове, наш город стал центром электротехнической промышленности страны.

© В.Б. Клепиков, 2015

В 1967 г., в годовщину столетия со дня рождения П.П. Копняева, видный украинский ученый и педагог, профессор Губенко Т.П. писал: «Він (П.П. Копняєв) дійсно може вважатися творцем електротехнічної школи в Україні» [7].

П.П. Копняев был основателем в 1930 г. нашей кафедры (при создании – кафедра Электрооборудования, до 1992 г. – кафедра Электрификации промышленных предприятий). В 1930 г. ХТИ был реорганизован с разделением на три самостоятельных вуза: механико-машиностроительный (ХММИ), химико-технологический (ХХТИ) и электротехнический (ХЭТИ). Тогда же реализуется мечта Павла Петровича – завершается строительство электротехнического корпуса, и кафедра размещается в новых помещениях, которые принадлежат ей и поныне.

За 85 лет существования кафедры ее возглавляли лишь 5 заведующих.

Первым стал Борис Осипович Кремень, работавший начальником отдела Государственного электротехнического треста и активно занимающийся вопросами электрификации предприятий Криворожского региона и других промышленных предприятий юга Украины. Практическая работа привлекала его в большей степени, поэтому он согласился заведовать кафедрой лишь временно.

Следующим заведующим, оказавшим многогранное влияние на ее развитие, стал Тихон Павлович Губенко. В 1927 г. он окончил Киевский политехнический институт остался там для работы. Еще в 1924 г. во время практики на ХЭМЗе он встречался с П.П. Копняевым, затем приезжал к нему в Харьков консультироваться по вопросам, связанным с пристройкой к главному корпусу КПИ электротехнических лабораторий, и оставил у него очень хорошее впечатление как специалист и человек. В 1930 г. Т.П. Губенко был несправедливо арестован по обвинению в «буржуазном национализме», а после освобождения был лишен возможности работать в КПИ. В 1931 г. он переезжает в Харьков (в то время – столицу Украины), поступает на работу в Электротрест и одновременно работает преподавателем нашей кафедры. С 1932 г. по 1938 г. Тихон Павлович – заведующий кафедрой, и на этом посту он сыграл большую роль в постановке ее учебно-методической и научной деятельности.

В эти годы происходит интенсивное оснащение электрооборудованием учебных лабораторий, постановка новых лабораторных работ и учебных курсов. Характерным для того времени была очень сильная связь учебной деятельности с практической. Т.П. Губенко и преподаватели кафедры Н.В. Копытов, Р.Л. Аронов, Ю.М. Файнберг, М.Р. Николайчук, В.И. Ильинский оказывали консультационную помощь, руководили проектированием и наладкой электрооборудования и систем автоматизации прокатных и доменных цехов Запорожского, Криворожского, Новомосковского металлургических заводов, а также крупнейшего в Европе металлургического завода «Азовсталь», Ворошиловградского паровозостроительного, Харьковского турбинного и многих других важнейших промышленных объектов первых пятилеток.

В период работы на кафедре Т.П. Губенко разрабатывает теорию электроприводов механизмов с циклическими нагрузками, закладывает основы теории электромеханических систем с переменными параметрами, разрабатывает и внедряет методы повышения эффективности энергоснабжения промышленных регионов и предприятий.

В дальнейшем Т.П. Губенко работал заведующим кафедры в Ташкентском (1938-1947 г.г.), а затем – Львовском политехнических институтах. Многие из видных ученых были его учениками, прошли его школу либо испытали его научное влияние. Он подготовил 7 докторов и 28 кандидатов наук [8].

В период с 1938 по 1950 г.г. заведующим кафедрой работает Рафаил Львович Аронов, который в 1919 г. окончил физико-математический факультет Харьковского университета, а в 1924 г. – электротехнический факультет ХТИ. Помимо академического образования, Р.Л. Аронов имел богатый опыт практической работы на ХЭМЗе, где он возглавлял проектирование и строительство центральной заводской лаборатории, наладку всех выпускаемых заводом типов электрооборудования, в том числе первого отечественного блюминга и автоматической системы загрузки доменной печи, сочетая это одновременно с преподавательской деятельностью. В этот период происходит дальнейшая активизация научной и методической деятельности кафедры. В 1934 г. Р.Л. Аронов издает книгу «Электрооборудование промышленных приводов», а в 1935 г. – «Автоматическое управление электроприводами» – длительное время единственный учебник по данной дисциплине. В 1938 г. он защищает докторскую, а его аспиранты: В.А. Клёмин-Шаронов, Ю.М. Файнберг, А.Л. Горелик, В.П. Стахов, С.Г. Агроник, ставшие впоследствии ведущими преподавателями кафедры, – кандидатские диссертации. Во время «борьбы с космополитизмом» Р.Л. Аронову пришлось перейти на работу в Николаевский кораблестроительный институт, где он продолжал длительное время плодотворно работать.

В военные годы многие преподаватели и студенты воевали на фронте, а часть была эвакуирована эшелонами ХЭМЗа в разные города Урала, Поволжья, Сибири и Средней Азии и работала на предприятиях Сталинграда, Свердловска, Челябинска, Кемерово, Прокопьевска, Чебоксар, Уфы. Преподаватели и выпускники ХЭТИ оказали большое влияние на формирование в этих городах крупных электротехнических центров. Велика роль выпускников ХЭТИ и в создании в 1942 г. в Москве по решению правительства треста, ставшего впоследствии ведущим в стране по электроприводу институтом «ВНИИэлектропривод». По свидетельству его директора М.Г. Юнькова: «Интеллектуальным ядром проектно-конструкторского бюро треста явились специалисты ХЭМЗа, имеющие большой опыт по созданию и производству электроприводов» [9], многие из которых были выпускниками ХЭТИ.

ХЭТИ возобновил свою деятельность в сентябре 1943 г. после освобождения г. Харькова. Помещения кафедры были разрушены, оборудование отсутствовало. Сотрудники и преподаватели помимо учебного процесса участвовали в восстановлении электрокорпуса, аудиторий и лабораторий. На кафедру возвращаются участники войны: В.А. Клёмин-Шаронов, О.А. Маевский, В.Г. Гулякин, С.Г. Агроник, В.П. Стахов, А.Л. Горелик, Ю.А. Розанов, А.Л. Нотов, В.В. Губернаторова.

С 1950 г. заведующим кафедрой становится Виктор Александрович Клёмин-Шаронов. Благодаря его энергии, инициативности и настойчивости восстанавливается материальная база кафедры, лаборатории оснащаются необходимым оборудованием, складывается высококвалифицированный коллектив преподавателей. В аспирантуру поступают А.Б. Зеленов, А.Д. Поздеев, А.И. Тупицын, В.Т. Долбня, ставшие впоследствии видными учеными. Прием на первый курс доходит до 200 человек. Во главе с О.А. Маевским и В.Т. Долбней образовывается коллектив, занимающийся проблемами промышленной электроники и использования электронных устройств для управления электроприводами, что приводит к созданию в 1963 г. кафедры «Промышленная электроника». Зарождается сотрудничество с родственной кафедрой Магдебургского технологического института им. Отто фон Герике. Начинает проводиться научная работа по применению полупроводниковых приборов в системах управления электроприводами. В 1966 г. приобретается ЭВМ «Наири-С» и создается вычислительный центр кафедры. Виктор Александрович считал исключительно важным для инженера и преподавателя иметь хорошую практическую подготовку. Выполнению лабораторной работы, как правило, предшествовала сборка схемы, защите дипломного проекта – практика на заводе, в проектной организации или НИИ, работе преподавателем – стажировка в проектно-наладочной организации или на производстве. Это способствовало успешной работе выпускников и повышению авторитета кафедры.

С 1976 г. по настоящее время заведующим кафедрой работает Клепиков Владимир Борисович, выпускник кафедры 1961 г., на момент избрания – доцент кафедры «Промышленная электроника».

Более полно период 1976-2005 г.г. освещен в публикации, посвященной 75-летию кафедры [3]. В настоящей статье отмечу наиболее значимые, по мнению автора, события этого периода.

Благодаря помощи выпускников кафедры – заместителя министра электротехнической промышленности СССР М.И Жучкова и главного энергетика завода «Серп и молот» В.А. Дегавцова была проведена широкая модернизация лабораторий. Защищены 4 докторские диссертации: К.П. Власовым (1980 г.), Л.В. Акимовым (1989 г.), В.Б. Клепиковым (1989 г.), А.И. Гулем (2003 г.) и 24 кандидатских. В 1989 г. после завершения работы заведующим кафедрой промышленной электроники на кафедру возвратился профессор Долбня В.Т.

В 1992 г. создан Совет по защитам кандидатских, а в 1997 г. – докторских диссертаций. Впервые в СНГ предложены и организованы исследования по использованию методов нейронных сетей и генетических алгоритмов для решения задач управления электромеханическими системами. Создан компьютерный вычислительный центр и микропроцессорная лаборатория, усилено изучение языков программирования и введена сквозная (с 1-го курса до защиты диплома) компьютерная подготовка.

В этот период на кафедре формируются направления научно-исследовательской работы в области динамики электромеханических систем с нелинейным трением, синтеза и компьютерного моделирования ЭМС с заданными показателями регулирования, в том числе с наблюдателями состояния, с нейро- и фаззи-регулированием. Расширяется международное сотрудничество. Результаты научных исследований кафедры неоднократно докладывались на международных конференциях в Украине, России, Германии, Франции, Италии, Индии, Венгрии, Польше и в других странах. Наиболее тесное и многостороннее сотрудничество устанавливается с кафедрой техники электропривода Магдебургского университета (МУ), возглавляемой профессором Ф. Палисом. Проведение исследований в лаборатории МУ позволило открыть в 1999 г. явление усиления упругих колебаний нелинейностью трения в электромеханических системах с проскальзыванием.

Важным результатом деятельности кафедры следует считать то, что в сложный период спада в стране научных исследований ее коллектив стал инициатором и организатором в 1993 г. первой конференции по электроприводу, ставшей в дальнейшем ежегодной международной конференцией «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». За прошедшие годы в ней принимали участие ученые и специалисты из 30 стран мира. 57 участников конференции стали докторами, а более 150 – кандидатами наук. В 1997 г. кафедра стала инициатором создания Украинской ассоциации инженеров-электриков. Признанием заслуг и авторитета кафедры стало избрание ее заведующего Президентом ассоциации, а доц. Шамардиной В.Н. – ответственным секретарем и учреждение в Харькове центрального органа ассоциации.

Свой 75-летний юбилей в 2005 г. кафедра встречала, подготовив более 4,5 тысяч инженеров (в т.ч. более 300 инженеров и 12 кандидатов наук иностранных граждан из 42 стран мира). Выпускники кафедры сыграли исключительно важную роль в электрификации и индустриализации Украины, автоматизации и механизации ее ведущих отраслей промышленности, многие из них стали широко известными учеными и специалистами в различных областях науки и техники, академиками, докторами и кандидатами наук, авторами важных изобретений, лауреатами государственных премий, и о роли некоторых написано в публикации к 75-летнему юбилею [3].

Период 2005-2015 г.г. также ознаменован рядом важных событий и достижений.

В области учебно-методической работы главный результат деятельности кафедры – это выпуск к 4500 ранее подготовленных еще более 500 специалистов и магистров. Выпускники кафедры, как правило, не испытывали проблем с трудоустройством. Более того, приезжавшие из г. Эрлангена представители фирмы Siemens предложили 5 выпускникам и приняли их на работу в Германии. Из 23 студентов кафедры, проходивших на 5-м курсе включенное обучение в Магдебургском университете (в том числе 5 в рамках немецкого технического факультета), 9 человек защитили двойной диплом и работают в настоящее время в немецких фирмах.

Кафедра участвовала в двух академических проектах Евросоюза TEMPUS, что позволило получить лабораторное и компьютерное оборудование на сумму более 35 тыс. евро.

В первом, TEMPUS-MPAM, целью которого являлось совершенствование обучения магистров в области автоматизации и мехатроники по программе двойного диплома, из зарубежных принимали участие университеты Франции, Чехии, России, Болгарии. Результатом участия в этом проекте стали весьма полезные командировки наших преподавателей в ВУЗы-партнеры, изучение особенностей организации и содержания их учебного процесса, прием партнеров в Харькове и их оценка наших методов подготовки. Участие в проекте побудило нас изучить особенности мехатронных электромеханических систем, в результате чего было подготовлено учебное пособие «Введение в мехатронику» [11] и открыта специализация «Мехатроника», что было одним из требований проекта, а также приобретен опыт подготовки магистров с защитой двойного диплома по мехатронике.

Второй европроект TEMPUS- iCo-op – «Промышленное сотрудничество и креативное инженерное образование на основе дистанционного инженерного и виртуального инструментария». За счет участия в этом проекте было получено оборудование компании National Instruments и создана лаборатория удаленного доступа, позволяющая проводить лабораторные работы по четырем базовым курсам, в т.ч. для студентов из европейских стран.

Были открыты 2 специализации: в 2011 г. – «Компьютеризированные системы электромобилей» и в 2012 г. – «Мехатроника». Существенно усилена компьютерная подготовка введением сквозного обучения (с 1-го по 6-й курсы) по информатике, программированию, работе с компьютером.

Выпускной бакалаврский проект включает в себя моделирование аналоговых и цифровых систем подчиненного регулирования скорости и положения, модального регулирования с наблюдателями состояния, взаимосвязанных систем. Выполнение проекта предполагает синтез и моделирование различных систем с расчетом 64-х динамических процессов.

В период 2005-2015 г.г. преподавателями кафедры поставлены 78 лабораторных работ, подготовлено 35 методических указаний. Изданы 27 книг научного, учебно-методического и научного характера, в том числе учебные пособия с грифом Министерства: Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепіков В.Б. «Електромеханічні системи автоматичного керування та електропривод», 2005 р., 678 стр.; Долбня В.Г., Сакара Ю.Д., Міланіч Т.В. «Електроніка і мікросхемотехніка», 2006 р., 204 с.; Худяєв О.А. «Моделювання електромеханічних систем. Частина 1. Засоби і методи моделювання. Операторні перетворення рівнянь динаміки», 2008 р., 88 с.

В числе научных изданий рассматриваемого периода монографии: Долбня В.Т. «Топологический анализ и синтез электрических и электромеханических систем», 2005 г., 356 с.; Власов К.П. «Теория автоматического управления», 2007 г., 526 с.; Осичев А.В., Котляров В.О. «Моделирование, анализ и синтез электроприводов со сложной кинематикой», 2014 г., 259 с.; Клепиков В.Б. «Динамика электромеханических систем с нелинейным трением», 2014 г., 407 с.

Из изданных в эти годы особо следует отметить книгу участника Великой отечественной войны проф. Долбни В.Т. «1418 дней (военный дневник)», 2013 г., 266 с., имеющую большое воспитательное значение для нынешних студентов. В ней воспроизводятся военные воспоминания Виктора Тимофеевича, начиная с эвакуации харьковских мальчиков-девятиклассников в тыл, трудные голодные годы в селе до призывного возраста, учеба в училище, участие в боях, день Победы – все от первого до последнего дня войны.

Показатель уровня учебно-методической работы кафедры в минувшее десятилетие – успешные выступления студенческой команды во Всеукраинской олимпиаде по электромеханике в г. Кременчуге (руководитель ст. преподаватель Обруч И.В.). В командном и в личном первенстве наши студенты регулярно завоевывали призовые места, в том числе первые – 6 раз в командном и 5 раз в личном.

Научная работа кафедры в описываемый период осуществлялась по следующей тематике: теория и практика энергоресурсосбережения средствами автоматизированного электропривода (руководитель д.т.н, проф. Клепиков В.Б.); топологические методы анализа и синтеза электротехнических и электромеханических систем (руководитель д.т.н., проф. Долбня В.Т.); синтез электромеханических систем полиномиальным методом (руководитель д.т.н., проф. Акимов Л.В.); синтез и моделирование электромеханических систем со сложной кинематикой (руководитель к.т.н., проф. Осичев А.В.); синтез электромеханических систем с наблюдателями состояния (руководитель к.т.н., доц. Котляров В.О.); итерационные многоканальные электромеханические системы (руководитель к.т.н., доц. Худяев А.А.); динамика электромеханических систем с нелинейным трением (руководитель д.т.н., проф. Клепиков В.Б.).

Большое значение для кафедры имело выполнение в 2007 г. научно-исследовательской работы по комплексной программе научных исследований НАН Украины «Энергосбережение». Тема работы – «Разработка энергосберегающих технологий модернизации электроприводов средней и малой мощности в Украине» – потребовала глубокого изучения комплекса вопросов, связанных с определением роли электропривода (ЭП) в сбережении энергетических ресурсов, большая часть которых приобретается за счет импорта. Были сделаны важные выводы и показано, что при существующих в Украине условиях с учетом затрат на добычу и транспортировку энергоресурсов каждая сэкономленная единица электроэнергии (ЭЭ) в энергетическом эквиваленте сберегает 5 единиц энергоресурсов (ЭР). Показано, что ЭП как средство оптимизации технологических процессов обладает синергетическим (умножающим) эффектом сбережения энергоресурсов, и сделан вывод о некорректности оценки энергоэффективности ЭП лишь по сопоставлению показаний счетчика на его входе до и после модернизации. Установлена целесообразность особого внимания модернизации ЭП средней и малой мощности, на которые приходится более 90% всей потребляемой электроприводом ЭЭ. Были ранжированы по приоритетности технологии модернизации ЭП.

Результатом выполнения данной НИР стала активизация работы кафедры по разработке энергоэффективных электроприводов и электромеханических систем (ЭМС). Был разработан и внедрен в 2008 г. в опытную серию (50 шт.) на Харьковском приборостроительном заводе им. Т.Г. Шевченко преобразователь частоты ПЧРТ-3 для энергосберегающего электропривода, по заказу АО «Турбогаз» созданы 4 образца электрооборудования источника электропитания для газораспределительных станций по системе «Турбодетандер - асинхронный генератор – автономный инвертор», разработан для малозатратной модернизации энергосберегающий ЭП эскалатора метрополитена по системе «ТРН-АД» с фаззиуправлением.

В 2009 г. на насосной станции 2-го подъема п.г.т. Солоницевка на базе ПЧРТ-3 выполнена модернизация ЭП насосного агрегата, обеспечившая 40,5% экономии ЭЭ, 20% экономии воды и сокращение порывов водопроводной сети с 60 в год до 8-10.

Доклады на ежегодных конференциях «Проблемы автоматизированного электропривода» и конференциях УАИЭ по теоретическим и практическим аспектам энергоресурсосбережения средствами электропривода способствовали активизации и расширению работ по данному направлению, что позволило на ПАЭП-2013 сделать доклад «Из опыта внедрения энергоресурсосберегающего электропривода в промышленности и ЖКХ Украины» по достижениям 7-ми вузов, пусконаладочного управления ДПНУ и консорциума МКЭ «Энергосбережение» [10].

В 2006-2015 г.г. кафедрой выполнены следующие НИР по планам бюджетной тематики МОН Украины на общую сумму 1 млн. 700 тыс. грн.: «Развитие теории и разработка методов параметрической оптимизации условно устойчивых электромеханических систем», 2006-2008 г.г.; «Синтез нелинейных электромеханических систем на основе методов гибридных нейронных сетей», 2006-2008 г.г.; «Разработка экспериментального образца энергоресурсосберегающего источника электрической энергии для систем газотранспортировки», 2009-

2010 г.г.; «Разработка методов настройки регуляторов на качество управления энергоблоком атомной электростанции», 2009-2010 г.г.; «Разработка систем энергосберегающего электропривода с интеллектуальным управлением», 2011-2012 г.г.; «Теория высокоточных итерационных систем управления электроприводами с типовой настройкой регуляторов», 2011-2013 гг; «Разработка энергоресурсосберегающих технологий использования многофункционального преобразователя частоты для модернизации электроприводов турбомеханизмов систем ЖКХ» (комплексная, совместно с НУ «Львовская политехника»), 2013-2014 г.г.; «Разработка энергоресурсосберегающего электропривода электромобиля с микропроцессорным управлением для учебного процесса и научных исследований», комплексная, совместно с КрНУ им. М. Остроградского), 2013-2014 г.г.; «Синтез итерационных многоканальных следящих электроприводов для механизмов подачи металлорежущих станков особо высокой точности», 2015-2016 г.г.; «Разработка экспериментального образца энергоэффективного электропривода электромобиля с суперконденсаторной батареей», 2015-2016 г.г.

К числу важных результатов, полученных при выполнении вышеуказанных работ, относятся: теоретическое обоснование квазинейрорегулирования и получение патента на квазинейрорегулятор, который может обеспечивать требуемые показатели регулирования по информации лишь об одной выходной координате электромеханической системы без наблюдателей состояния по другим координатам. При этом квазинейрорегулятор выполняется по простой схеме компьютерного нейрона, весовые коэффициенты которой находятся по аналитическим выражениям без объемных многократных компьютерных расчетов моделирования; доказательство, что причиной многочисленных порывов водопроводных сетей при пусках электроприводов насосных агрегатов является не классический гидравлический удар, а волновые процессы, возникающие в электромеханогидравлической системе с распределенными параметрами. Предложены законы пуска электропривода, устраняющие броски давления.

Теоретические исследования по темам, как правило, заканчивались созданием и внедрением практических образцов, отмеченных наградами республиканских и региональных выставок. В 2008 г. «Перетворювач частоти тиристорний регульований», а в 2013 г. «Система енергозберігаючого електропривода з інтелектуальним керуванням» были признаны в номинации «Наука» победителями Всеукраинского конкурса-выставки «Кращий вітчизняний товар року».

Несмотря на известные трудности с заключением хоздоговоров на научно-исследовательские работы, кафедре удавалось ежегодно выполнять темы на хоздоговорной основе с оплатой общим объемом за 10 лет более 1 млн. грн. При этом около 300 тыс. грн. по договорам с фирмой «Siemens-Украина». Основной объем из указанной суммы освоен по диагностике заземлений электрооборудования предприятий (отв. исп. доц. Колиушко Д.Г.)

Сотрудниками кафедры в прошедшие годы защищено 6 кандидатских диссертаций: Коваленко М.В. «Краткосрочное прогнозирование связного потребления топливно-энергетических ресурсов в бытовом секторе в период отопительного сезона» (руководитель с.н.с. Сергеев С.А., 2005 г.); Полянская И.С. «Синтез электромеханических систем с квазинейрорегулятором при фрикционной нагрузке» (руководитель проф. Клепиков В.Б., 2007 г.); Моисеев А.Н. «Электромеханический комплекс автономного электропитания с турбодетандером для станций газотранспортировки» (руководитель проф. Клепиков В.Б., 2012 г.); Ткаченко А.А. «Снижение динамических нагрузок в асинхронных электроприводах скребковых конвейеров в рабочих и аварийных режимах» (руководитель проф. Осичев А.В., 2013 г.); Котляров В.О. «Синтез устойчивых электромеханических систем с отрицательным вязким трением и наблюдателями» (руководитель проф. Осичев А.В., 2013 г.); Банев Е.Ф. «Энергоресурсосберегающий электропривод эскалатора метрополитена с фаззи регулятором» (руководитель проф. Клепиков В.Б., 2013 г.). Представлена к защите диссертация Асмоловой Л.В., завершают написание Коротаев П.А., Кунченко Т.Ю., Литвиненко Д.Г., Обруч И.В., Тимощенко А.В., Семиков А.В. Окончил докторантуру и оформляет работу доц. Худяев А.А.

Укрепление материальной базы кафедры в рассматриваемый период осуществлялось, главным образом, за счет международного сотрудничества. По двум европроектам TEMPUS было получено лабораторное оборудование на сумму 36 тыс. евро. Выполнение трех хоздоговоров с фирмой «Сименс-Украина» дало кафедре 10 компьютеров и 4 комплекта микропроцессорных электроприводов на сумму более 250 тыс. грн.

Четыре лабораторных микропроцессорных стенда собственной разработки изготовило, установило и безвозмездно передало кафедре АО «Констар» (бывшее СКБ САУ).

В 2005-2015 г.г. проведены 10 международных конференций «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», которые стали ежегодным форумом ученых вузов, специалистов производственных предприятий, проектно-монтажных и наладочных организаций, а труды конференции с 1993 г. по 2015 г. представляют собой антологию электропривода. Как и в предыдущие годы, конференция стала трибуной для будущих докторов и хорошей школой – кандидатов наук. На конференции стал традиционным вызывающий большой интерес конкурс докладов молодых ученых, число участников которых доходило до 30 человек. Престиж конкурса повысило учреждение немецкой службой академических обменов ДААД для его победителей специальных премий, вручаемых профессором Магдебургского университета Ф. Палисом.

Хотя и в этот период ответственным организатором конференций 5 раз пришлось быть нашей кафедре (2005, 2008, 2010, 2013, 2015 г.г.), радует приобщение к этой ответственной и трудоемкой работе других вузов: Одесского НТУ (2006 г. и 2011 г.), Днепродзержинского ГТУ (2007 г.), НУ «Львовская политехника» (2009 г.), Кременчугского НУ им. М. Остроградского (2012 г.), Одесской национальной морской академии (2014 г.).

Рассматриваемый период ознаменовался завершением еще одной инициативы кафедры – создания памятника П.П. Копняеву как основоположнику электротехнической школы в Украине. 21 января 2011 г. был установлен памятный бюст в электрокорпусе – детище Павла Петровича. Интересный факт! Известно, что при жизни два выдающихся ученых, спроектировавших электрокорпус, проф. Копняев П.П. и академик архитектуры Бекетов А.Н. были очень дружны. На открытии встретились внуки этих ученых. Внук П.П. Копняева – А.Д. Брюно – профессор МГУ им. Ломоносова, в 25 лет защитивший кандидатскую, а 28 – докторскую диссертации, математик с мировым именем, и внук А.Н Бекетова – Ф.С. Рофе-Бекетов – профессор, доктор физико-математических наук.

Знаменательным событием стала состоявшаяся 7 июля с.г. презентация разработанного и созданного кафедрой электромобиля с суперконденсаторной батареей. История и обстоятельства, связанные с его созданием, более подробно изложены в публикуемой в настоящем сборнике статье «Из опыта создания электромобиля». Однако в свете изменений, происходящих в промышленной сфере, традиционно потребляющей выпускников нашего профиля, представляется, что кафедрам электропривода стоит обратить внимание на целесообразность приобщения к данной проблематике.

За минувшее десятилетие произошли изменения в кадровом составе. Из числа выпускников для работы на кафедре были оставлены 10 человек. В 2015 году с благодарностью за долголетний труд ушли на пенсию доц. Алехин С.И, доц. Воинов В.П., ст. преп. Герасименко Р.Т.

К сожалению, юбилейный год не обошелся без огорчений. В этом году впервые нам не удалось выполнить план приема на бюджетные места кафедры (21 человек на 34 места). И это несмотря на то, что 7 июля состоялась презентация электромобиля, который в течение времени приема документов стоял перед электрокорпусом, катая работников прессы и телевидения и предоставляя возможность проехаться абитуриентам; несмотря на то, что теле- и радиоканалы в этот период регулярно сообщали о факте создания НТУ «ХПИ» «электромобиля с суперконденсаторной батареей», возле стендов кафедры плясал компьютерно-управляемый «Страус», а два робота демонстрировали свои возможности; несмотря на работу студентов кафедры в социальных сетях, отремонтированное после Евро-2012 общежитие и обновленный сайт кафедры. Заставляет задуматься аналогичная ситуация по направлению «Электромеханика» и в ряде других известных вузах. И это в то время, когда Украине крайне необходима широкая модернизация электроприводов в ЖКХ, промышленности и в других отраслях с целью радикального сокращения валютных расходов на импортируемые энергоресурсы от внедрения энергоэффективных электромеханических систем.

Нет сомнения, что эти вопросы с учетом изменения нашей специальности на «Электротехника, энергетика и электромеханика» будут обсуждены на традиционно проходящих в период конференции заседаниях научно-методической комиссии МОН Украины по электромеханике и конференции представителей региональных отделений Украинской ассоциации инженеров-электриков.

Коллектив кафедры встречает 85-летний юбилей с оптимизмом и новыми планами деятельности, достойными традиций нашего вуза.

Список литературы: 1. Харьковский политехнический институт. 1885-1985. История развития. Харьков: «Вища школа», 1985. – 223 с. **2.** Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, НТУ «ХПИ», 2003. – 119 с. **3.** *Клепиков В.Б.* Из истории кафедры (к 75-летию кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ»), Вестник НТУ «ХПИ», - Харьков: НТУ «ХПИ», 2005, №45. – 15-19 С. **4.** *Тверитникова О.Є.* Зародження і розвиток науково-технічної школи електротехніки професора П.П. Копняєва (1885-1950 р.р.). Монографія. Харків, НТУ «ХПІ», 2010, 211 с. **5.** *Бергер А.Я., Каменецкий М.О.* Из истории электротехники. // Электричество, 1954, №1. **6.** Павел Петрович Копняев. // Электричество, 1957, №5. **7.** Т.П. Губенко. Творець нової школи. Спеціальний випуск багатотиражки ХПІ 27 лютого 1967 р., присвячений 100-річчю з дня народження П.П. Копнявева. **8.** *Бардачевський А., Губенко В., Деніс Б., Онишко Є*. 1896-1996. Тихон Павлович Губенко. Життя і діяльність. Львів-Славськ: //Електромеханіка, 1996. – С. 9-11. **9.** *Юньков М.Г.* ОАО «Электропривод» (ВНИИэлектропривод) – научно-производственная школа по электроприводу. Труды н.-т. семинара «80 лет отечественной школы электропривода». Санкт-Петербург, 2002. – С. 5-7. **10.** *Бешта А.С., Барский В.А., Горбачев Н.В., Загирняк М.В., Клепиков В.Б., Мехович С.А., Пересада С.М., Садовой А.В., Толочко О.И.* Из опыта внедрения энергоресурсосберегающего електропривода в промышленности и ЖКХ Украины. Вестник НТУ «ХПИ», Харьков, 2013, №36(1009), С. 15-20. **11.** Введение в мехатронику [Текст] / *А.И. Грабченко, В.Б. Клепиков, В.Л. Доброскок* и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – 264с.

Bibliography (transliterated): 1. Kharkovskiy politehnicheskiy institut. 1885-1985. Istoriya razvitiya. Kharkov: «Vischa shkola», 1985. – 223 s. **2**. Natsionalnyy tekhnicheskiy universitet «Kharkovskiy politekhnicheskiy institut», Kharkov, NTU «KhPI», 2003. – 119 s. **3**. Klepikov V.B. Iz istorii kafedry (k 75-letiyu kafedry «Avtomatizirovannye elektromehanicheskie sistemy» NTU «KhPI»), Vestnik NTU «KhPI», - Kharkov: NTU «KhPI», 2005, №45. – 15-19 S. **4**. Tverytnykova O.Ye. Zarodzhennya i rozvytok naukovo-tekhnichnoyi shkoly elektrotekhniky profesora P.P. Kopnyayeva (1885-1950 r.r.). Monohrafiya. Kharkiv, NTU «KhPI», 2010, 211 c. **5**. Berger A.Ya., Kamenetskiy M.O. Iz istorii elektrotekhniki. // Elektrichestvo, 1954, №1. **6.** Pavel Petrovich Kopnyaev. // Elektrichestvo, 1957, №5. **7.** T.P. Hubenko. Tvorets' novoyi shkoly. Spetsial'nyy vypusk bahatotyrazhky KhPI 27 lyutoho 1967 r., prysvyachenyy 100-richchyu z dnya narodzhennya P.P. Kopnyayeva. **8.** Bardachevs'kyy A., Hubenko V., Denis B., Onyshko Ye. 1896-1996. Tykhon Pavlovych Hubenko. Zhyttya i diyal'nist'. L'viv-Slavs'k: //Elektromekhanika, 1996. – S. 9-11. **9.** Yunkov M.G. OAO «Elektroprivod» (VNIIelektroprivod) – nauchno-proizvodstvennaya shkola po elektroprivodu. Trudyi n.-t. Seminara «80 let otechestvennoy shkoly elektroprivoda». Sankt-Peterburg, 2002. – S. 5-7. **10.** Beshta A.S., Barskiy V.A., Gorbachev N.V., Zagirnyak M.V., Klepikov V.B., Mehovich S.A., Peresada S.M., Sadovoy A.V., Tolochko O.I. Iz opyta vnedreniya energoresursosberegayuschego elektroprivoda v promyishlennosti i ZhKH Ukrainy. Vestnik NTU «KhPI», Kharkov, 2013, №36(1009), S. 15-20. 11. Vvedenie v mehatroniku [Tekst] / A.I. Grabchenko, V.B. Klepikov, V.L. Dobroskok i dr. – Kharkov: NTU «KhPI», 2014. – 264s.

Поступила (received) 20.08.2015

УДК 621.311

Е. И. СОКОЛ, ректор НТУ «ХПИ», член-корреспондент Национальной академии наук Украины, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Промышленная и биомедицинская электроника», НТУ «ХПИ»;
О. Г. ГРИБ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Автоматизация энергосистем», НТУ «ХПИ»;
Н. С. БЕЛОВ, соискатель кафедры «Автоматизация энергосистем», НТУ «ХПИ»;
Д. А. ГАПОН, к.т.н., доц., доцент кафедры «Автоматизация энергосистем», НТУ «ХПИ»;
С. Ю. ШЕВЧЕНКО, к.т.н., доц., доцент кафедры «Передача электрической энергии», НТУ «ХПИ».

СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЕ ДИСПЕТЧЕРСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Вступление. Интеграционные аспекты развития электроэнергетического комплекса (ЭК) Украины в условиях интеграции топливно-энергетического сектора нашей страны в мировую экономику, а также увеличение экспорта электроэнергии зарубежным энергетическим компаниям, произведенной тепловыми электростанциями, гидро /гидроаккумулирующими электростанциями а также атомными электростанциями, требуют кардинальных изменений диспетчерского управления, силовой и цифровой аппаратуры в энергетическом секторе [1]. Технологической базой для этого являются инфраструктуры электрических сетей и подстанций ГП НЭК «Укрэнерго», облэнерго, генерирующих компаний; развитие которых должно опираться на соответствующие новые технологии производителей аппаратуры и стандартов передачи информации.

Постановка задачи. Задачей данной статьи является исследование возможности практической реализации стратегического подхода к решению задачи перехода энергетического сектора к полной модернизации управления выработкой, передачей, распределением и потреблением электрической энергии.

Материалы исследований. Традиционным методом решения этих проблем, практикуемые в других секторах промышленности (нефтегазовой, угольной и др.), в ЭК не работают в связи с ярко выраженными отраслевыми особенностями. При этом недостаточно исследованными остаются проблемы комплексной модернизации диспетчерского управления в ЭК при оперировании электроэнергетическими ресурсами и услугами в энергетических сетях Украины в условиях интеграции в ENTSO-E (Европейская сеть системных операторов в электроэнергетики).

Рассматриваемый подход должен быть ориентирован на повышение национальной и международной надежности электроэнергетического комплекса Украины, являющегося важнейшим инструментом соблюдения энергоэкономических интересов нашей страны в глобальной энергетике и обеспечения национальной энергетической безопасности.

Таким образом, необходима специальная программа на государственном уровне по комплексной модернизации электро-энергетического сектора с целью приведения всей инфраструктуры электрических сетей и подстанций ГП НЭК «Укрэнерго», облэнерго, генерирующих компаний к энергоузловому управлению сетецентрического характера.

Такая методология должна обеспечить переход сектора к полной безопасной и надежной системе передачи электрической энергии, как в Украине, так и за рубежом путем выделения энерго-инфраструктрурных узлов на основе распределенных мини-дивизионов.

Системная взаимосвязь между энергетическими объектами Украины, а также энергообъектами ENTSO-E, определяет необходимость налаживания взаимодействия от генерирующих компаний до конечного потребителя в любой части Европы.

Для укрепления национальной конкурентоспособности в условиях европейской энергетической интеграции необходимо предприятиям ЭТК провести внедрение сетецентрического управления решений для развития энерго-инфраструктурных узлов на базе «Цифровая подстанция».

Это необходимо реализовать в сегментах энергетики Украины и энергетических системах зарубежных стран на основе иерархической и сетевой модели действий компаний ЭК, это приведет к [2]:

– повышению надежности и доступности. Глубокая самодиагностика цифровых устройств обеспечивает максимальную жизнеспособность подстанции. Любое ухудшение работоспособности фиксируются в режиме реального времени. Имеющаяся избыточность данных в системе могут быть использована для исправления неполадок, что и позволяет выполнять поиск неисправностей без необходимости каких-либо отключений системы в первичной сети;

– оптимизации работы. Анализ, производимый цифровыми элементами подстанций, позволяет проводить тщательный мониторинг объема данных поступающих со станционного оборудования, относительно его проектных уровней;

– сокращению расходов на обслуживание. «Цифровая подстанция» детально проводит мониторинг всех процессов происходящих в оборудовании. Интеллектуальные системы анализа данных предоставля-

© Е.И. Сокол, О.Г. Гриб, Н.С. Белов,
Д.А. Гапон, С. Ю. Шевченко, 2015

ют рекомендации по техническому обслуживанию и ремонту. Это позволяет переходить на прогностическое или надежностно-ориентированное обслуживания, избегая незапланированных простоев и чрезвычайных расходов на ремонт;

– улучшенным коммуникационным возможностям. Обмен данными между интеллектуальными устройствами, как внутри, так и между межрегиональными подстанциями, оптимизирован через Ethernet. Качественные локальные и глобальные блоки контроля позволяют производить обмен данными на подстанции, а также между подстанциями. Прямые связи между подстанциями, без необходимости транзита через центр управления, уменьшают время реагирования;

– увеличению пропускной способности высоковольтных линий (ВЛ). Установка интеллектуальных датчиков погоды на ВЛ, позволит правильно рассчитать потери на Корону.

Работа цифровой подстанции основана на архитектуре, которая позволяет проводить эксплуатационные измерения в реальном времени по данным от первичной системы. Эти данные получаются с помощью датчиков, встроенных в первичную систему. Обмен между устройствами, происходит по результатам измерений базирующихся на «шине нижнего уровня». Самое главное в том, что интеллектуальные устройства и системы могут сразу обработать эти оперативные данные в пределах подстанции.

Прописавшись как клиенты потока данных по шине процесса Ethernet, информация от цифровых датчиков энергетической системы доводятся гораздо более эффективно, до уровня центральных терминалов, чем в обычных проводных схемах.

Обмен данными происходит по результатам измерений (давление или температура в распределительном устройстве ГИС, измерения тока и напряжения, полученные из оптического или трансформаторов на эффекте Роговского, цифровых приборов, или информации о состоянии выключателей) с помощью «шины нижнего уровня «.

Самое главное в том, что интеллектуальные устройства совместно с устройствами подстанции, (реле защиты, регистраторы, блоки измерения векторов (фаз), контроллеры терминалов, многофункциональные контроллеры или управляющие устройства), могут сразу обработать оперативные данные. Прописанным как клиенты этого потока данных по шине процесса Ethernet, информация от цифровых датчиков энергетической системы распределяется и поступает на уровень терминалов гораздо более эффективно, чем в обычных проводных схемах.

Шина нижнего уровня также осуществляет связь, через которую информация от первичного, наруженого оборудования идет назад в ОПУ (к аппаратуре контроля станции) – она обеспечивает обратную связь на подстанцию.

В полностью цифровой архитектуре, управляющие команды (команды оператора, срабатывание защиты) также направляются на первичные устройства через шину процесса, в противоположном направлении. Шина нижнего уровня, таким образом, поддерживает срочное обслуживание.

Устройства между шиной нижнего уровня и шиной верхнего уровня исторически определены как «вторичное оборудование». В цифровой подстанции, эти устройства являются интеллектуальными электронными устройствами, которые взаимодействуют с потоками через шину нижнего уровня, и также с равноуровневыми устройствами в стойках терминалов, с другими терминалами, и цифровой системой управления через шину верхнего уровня рис. 1. [2].

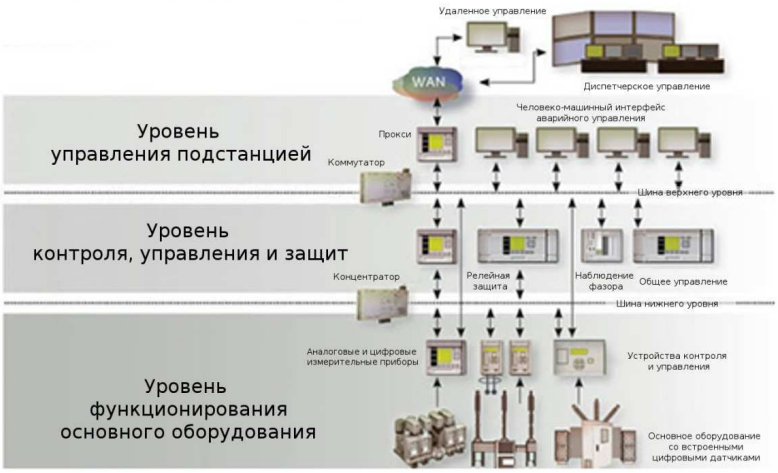


Рис. 1 Архитектурные уровни в цифровой подстанции

Цифровая шина верхнего уровня, гораздо больше, чем традиционная SCADA шина, так как позволяет нескольким клиентам обмениваться данными, поддерживает равноправное взаимодействие устройств, а также обмен между подстанциями. GOOSE чаще всего используются для высокоскоростного обмена бинарной информацией о состоянии / командах. ИЭУ выполняет свои критичные по времени функции, такие как отключе-

ние от защиты, переключение дежурным подстанции или другие задачи с помощью прямого взаимодействия с шиной процесса. Однако некоторые объекты на подстанции могут требовать обмена всеми или частью этих предварительно обработанных данных. Например, схемы защиты и управления могут быть распределены между несколькими терминалами, и как правило, в случае автоматического повторного включения (АПВ), УРОВ, блокировка и динамическое изменение схемы («быстрая передача команды») зачастую происходит по конкретному адресу. Часто это осуществляется по протоколу IEC 61850 GOOSE-based.

Дополнительно необходимо ввести сетецентрическое распределения интеллекта между энерго-инфраструктурными узлами есть необходимость передачи информации, как местным, так и удаленно размещенным операторам, контролирующим визуально рабочее состояние подстанции, а также терминалам управления - программным модулям, которые будут отрабатывать аварийные ситуации в случае отсутствия реагирования со стороны диспетчера. Это требует наличия на подстанции ЧМИ (человеко-машинных интерфейсов), терминалов управления и прокси-сервера соединенного с удаленным ЧМИ сервером контроля и управления, в режиме реального времени. Одна или несколько рабочих станций энерго-инфраструктурного узла руководствуясь инструкциями (указаниями), региональных диспетчеров может использоваться в качестве инженерной для конфигурирования терминалов управления, или для локальной концентрации и архивации данных энергетической компании. Для онлайн мониторинга состояния могут использоваться специализированные станции предупреждения (сигналов аварии), учитывающих историю по базе данных каждого основного устройства.

Терминалом управления может являться независимый от аппаратной части программный комплекс, выполняющий технологические функции защиты и управления [3]. Сейчас уровень технологий позволяет сделать так же с устройствами защиты и автоматизации ПС. Для этого надо разработать ПО модульной архитектуры: каждый модуль — одна минимальная функция. Состав необходимых модулей достаточно полно изложен в IEC 61850-5 и 7-4. Приведенный там набор может быть расширен дополнительными логическими узлами, в соответствии с требованиями IEC 61850 рис. 2.

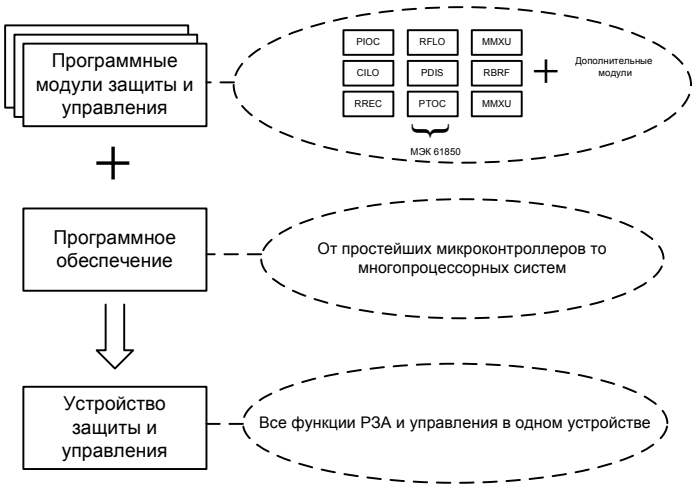


Рисунок 2: Аппаратно-независимая система со свободным размещением функций

По сути, это набор виртуальных реле из которых набираются функций, а из функций — виртуальные терминалы, которые могут располагаться как на выделенных аппаратных платформах, так и все вместе в одном сервере защиты и управления ПС. Тогда, устанавливая разный набор таких модулей (только те, которые нужны в данном конкретном случае), на подходящие такому набору по производительности аппаратные платформы мы получаем инструмент построения систем защиты и автоматизации высокой степени гибкости и эффективности. При таком подходе при проектировании системы защиты и управления, разработчик фокусируется на синтезе логики работы такой системы в целом, а распределение функциональных модулей по устройствам является финальной стадией работы и зависит только от ограничений по надежности и предпочтений заказчика.

Исходя из этой концепции, существуют два полярных по сути архитектурных решения. Первый — это централизованный с размещением всех технологических модулей в одной мощной серверной системе с нужной кратностью дублирования. Данный вариант, очевидно, дешевле по требуемому аппаратному обеспечению, требует значительно меньше места под размещение и серьезно упрощает систему питания устройств автоматизации. Однако в случае применения обычных серверов, как аппаратных платформ, требует сооружения специальной серверной с климат-контролем и экранированием от внешних электромагнитных воздействий.

Второй вариант представляет собой максимально распределенную архитектуру, когда каждый функциональный модуль размещается в отдельном устройстве. Такой вариант построения системы обладает высокой степенью живучести. Наиболее эффективной является гибридная архитектура, когда основные функции выполняются централизованным устройством, а наиболее ответственные и критические функции резервируются еще и отдельными устройствами, в том числе созданными не на принципах программной реализации. Таким обра-

зом, варьируя состав физических устройств и их функциональные возможности, несложно получить оптимальные показатели системы по надежности и стоимости.

В редакции 2 стандарта IEC 61850 определены механизмы моделирования связей между логическими узлами с использованием объектов данных InRef(ORG CDC), а также моделирования подписки на SV и GOOSE-сообщения, что позволяет однозначно определять конфигурацию системы защиты и управления, как последовательность логических узлов [4]. Однако для моделирования внутренней логики работы узлов предпочтительней использовать системы подобные Matlab, так как Matlab предоставляет мощные средства для отладки алгоритмов, которые затем достаточно перенести в рабочую систему как есть. Для выполнения моделей Matlab внутри системы защиты и управления может использоваться либо собственный интерпретатор mdl-файла, либо генератор кода Matlab Coder. Модель алгоритма является отдельным параметром узла и частью конфигурации, и, следовательно, доступна для изменения пользователем без изменения кода системы (при некоторых ограничениях, например, число входов/выходов и их типы данных в модели алгоритма и логического узла-оболочки должны совпадать).

В 2009 г. в Испании была завершена работа над пилотным проектом подстанции Alcala de Henares 132 кВ (г. Мадрид). В реализации проекта также использовались устройства различных производителей. Особенностью данного проекта являлось экспериментальное внедрение «Шины процесса» в части передачи дискретной информации. Системы РЗА и АСУ ТП на подстанции можно условно разделить на 4 уровня: верхний, станционный, уровень присоединения, (устройства МПРЗА и контроллеры присоединения) и полевой, включающий приборы, установленные на распределительном устройстве [5]. В непосредственной близости с коммутационными аппаратами на распределительном устройстве были установлены выносные модули УСО (MicroRTU), которые с помощью оптических кабелей подключались к коммутаторам, установленным в ОПУ. Все информация о состоянии коммутационных аппаратов, а также команды управления ими передавались по цифровым каналам связи (с помощью GOOSE-сообщений). На MicroRTU была реализована лишь простейшая логика с целью повышения надежности этих устройств. Функции оперативной блокировки были реализованы в устройствах уровня присоединения. Таким образом, на подстанции были внедрены следующие виды информационных потоков:

– вертикальный GOOSE для обмена информацией между MicroRTU и устройствами уровня присоединения;

– диагональный GOOSE для обмена информацией между MicroRTU одного присоединения и устройствами защиты и управления другого (например, для быстрого информирования этих устройств об отказе выключателя);

– горизонтальный GOOSE для обмена информацией между устройствами уровня присоединения (для целей организации оперативных блокировок, пуска осциллографа и т.д.);

– передача динамической информации по протоколу MMS от устройств уровня присоединения на станционный уровень;

– команды управления со станционного уровня на уровень присоединения по протоколу MMS.

Команды управления проходили через контроллеры присоединения, которые транслировали эти команды в GOOSE-сообщения для MicroRTU, что позволяло на уровне контроллеров присоединения осуществить функции оперативной блокировки.

Большое развитие цифровые подстанции получили в Китае. В 2006 г. была введена в эксплуатацию первая цифровая подстанция 110 кВ Qujing, Yunnan. К 2009 г. Китай занял лидирующее место в мире по цифровым подстанциям, введя в эксплуатацию 70 подстанций. Ожидается, что рынок цифровых подстанций в Китае вырастет до 4—4,5 млрд юаней в год за ближайшие 10 лет.

Выводы. Предлагаемые меры могут быть реализованы формированием дивизиональных матриц трансграничного сетецентрического диспетчерского управления с едиными средствами координированного управления ГП НЭК «Укрэнерго». При этом должна быть проведена реорганизация системы управления электроэнергетической инфраструктуры производства и передачи электрической энергии по типовому электронному диспетчерскому управлению в рамках единой модели управления всей электроэнергетической структуры мини-дивизионов Украины.

Список литературы: 1. УДК 621.316 Правила устройства электроустановок – Х.: Издательство «ИНДУСТРИЯ», 2011 – 768 с. **2.** Richards, S., Alstom Grid, UK, Pavaiya, N., Omicron Electronics, Boucherit, M. and Ferret, P., Alstom Grid, France, Diemer P., Energinet.dk, Denmark New World. PAC World Magazine. June 2014. **3.** Ivan Dorofeyev, Russia PAC World Magazine December 2012. **4.** Brunner C. IEC 61850& Smart Grids. PAC World Magazine. September 2013. **5.** Горелик Т. Г. Автоматизация энергообъектов с использованием технологии “цифровая подстанция”. Первый российский прототип / Т. Г. Горелик, О. В. Кириенко // Релейная защита и автоматизация – 2012.– № 1(05).– С. 86–89.

Bibliography(translation): 1. Rules for Electrical - Publishing house «INDUSTRIA», 2011 – 768 p. **2.** Richards, S., Alstom Grid, UK, Pavaiya, N., Omicron Electronics, Boucherit, M. and Ferret, P., Alstom Grid, France, Diemer P., Energinet.dk, Denmark New World. PAC World Magazine. June 2014. **3.** Ivan Dorofeyev, Russia PAC World Magazine December 2012. **4.** Brunner C. IEC 61850& Smart Grids. PAC World Magazine. September 2013. **5.** Gorelik T.G. Automation of energy objects using the technology of «digital substation.» The first Russian prototype / TG Gorelik, O. Kiriyenko // Automation and Protection – 2012.– № 1(05).– C. 86–89.

Поступила (received) 10.07.2015

УДК 37.041;374.32

Д. Й. РОДЬКІН, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри «Системи автоматичного управління та електропривод» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського
О. П. ЧОРНИЙ, д-р техн. наук, проф., директор Інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА ДОСВІД РОБОТИ КРЕМЕНЧУЦЬКОЇ ШКОЛИ ЕЛЕКТРОПРИВОДЧИКІВ

На початку 90-х, коли здавалось назавжди розриваються економічні, гуманітарні та наукові зв'язки між людьми, колективами, що складалися протягом десятиліть, ініціатива професорів Клепікова В. Б., Садово го О. В., Поповича М. Г., Зеленова А. Б. та ін. щодо збереження наукового середовища між вченими та спеціалістами електромеханічного напрямку країни в формі щорічної широкомасштабної конференції з електроприводу виявилася не тільки своєчасною та необхідною, але і виключно результативною. В результаті дана ініціатива перетворилася у феномен міжнародної конференції – «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика», яка об'єднала середовище спеціалістів з електроприводу, дала потужний інтелектуальний імпульс для розвитку широкомасштабних сучасних досліджень в галузі електромеханіки в різних ВНЗ України.

Викликає повагу та захват складність і грандіозність зусиль, прикладених кафедрою «Автоматизованих електромеханічних систем» НТУ «ХПІ» протягом багатьох років щодо організації та проведення конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика». Виконувати дану роботу протягом двадцяти років зміг лише цей колектив. Результат очевидний: в Україні збереглася і суттєво підвищила свій потенціал спільнота не тільки електроприводчиків, але й електромеханіків в цілому.

За ці роки лише кільком кафедрам електропривода ВНЗ України надалася можливість в повній мірі відчути об'єм та розмах роботи з організації та проведення конференції: Дніпродзержинському державному технічному університету (ДДТУ) в 2007 році; Львівському національному політехнічному університету (Львівська політехніка) в 2009 році; Одеському національному політехнічному університету (ОНПУ) в 2006 та 2011 роках; Кременчуцькому національному університету імені Михайла Остроградського в 2012 році; Одеській національній морській академії (ОНМА) в 2014 році.

На передодні ювілею кафедри «Автоматизованих електромеханічних систем» НТУ «ХПІ» в 2015 році видно нову ініціативу ювіляра – в збірнику, що видається, вводиться нова рубрика – історія кафедр електроприводу ВНЗ України.

Реалізація такої ініціативи кафедрами – це незвичайна робота, вона не може бути простою, оскільки викласти історію – це хоча б в якійсь мірі висловити подяку організаторам вказаного феномену в житті кожного колективу.

Стосовно школи електроприводчиків Кременчука – колективу кафедри САУЕ – то питання більш менш зрозуміле – викласти історію кафедри – показати, як вона, та з якої причини, будучи молодою, опинилася серед потужних кафедр електропривода України, яким Президент «Асоціації інженерів-електриків України», завідувач кафедри АЕМС НТУ «ХПІ», проф. Клепіков В. Б. довірив організацію та проведення конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика» в 2012 році.

Історія як наука повинна бути об'єктивною. В даному контексті слід відмітити, що підготовка спеціалістів з електроприводу в Кременчуці почалася в 1987 році, а створення наукової школи електроприводчиків необхідно віднести до 1998 року, тобто до часу переходу на роботу з Криворізького гірничорудного інституту проф. Родькіна Д. Й. і доц. Чорного О. П. – представників Криворізької школи електроприводчиків, створеної професорами Чермалихом В. М. та Файнштейном Е. Г.

Родькін Д. Й. з 1979 р. по 1998 р. керував кафедрою автоматизованого електропривода (АЕП) Криворізького гірничорудного інституту, перебудувавши її зі своїми колегами до рівня, відповідного вимогам вищої освіти того часу.

До переходу в університет у Кременчуці, задовго до початку державного підходу до проблеми енергозбереження, проф. Родькіним Д. Й. було сформовано науковий напрямок з підвищення ефективності і працездатності систем промислових електроприводів, який склав основу робіт та досліджень в період з 1998 р. по 2015 р. Тому початком школи приводчиків у Кременчуці необхідно вважати 1998 рік, як час відгалуження від Криворізької школи, а кафедру САУЕ можна розглядати як дубль кафедри АЕП Криворізького гірничорудного інституту, реалізований в новий час, в нових умовах, з новими можливостями і другим персоналом – переважно приводчиками, випускниками кафедри «Автоматизація виробничих процесів і робототехніка» (АВП і РТ) Кременчуцького державного політехнічного інституту.

На початку 90-х проф. Родькіним Д. Й. із загальних енергетичних позицій був сформульований принцип ЕЕЕ – енергоспоживання, енерговикористання і енергокерування в електромеханічних системах, з єдиним науковим підходом до нього на базі понять та елементів теорії миттєвої потужності. З цих міркувань створені:

© Д.Й. Родькін, О.П. Чорний, 2015

– теорія систем динамічного навантаження електричних машин при їх післяремонтних випробуваннях;

– принципи побудови вимірювально-діагностичних комплексів як основи для дослідження електромеханічних систем, їх вивчення, навчання і підготовки спеціалістів;

– теоретичні основи, визначені шляхи практичного використання енергетичного метода ідентифікації параметрів електромеханічних систем з використанням рівнянь енергетичного балансу гармонік миттєвої потужності складних систем з реальними сигналами різної фізичної природи.

Важко переоцінити важливість щорічного проведення Харківської міжнародної конференції з електроприводу. Розуміючи важливість регулярних зустрічей вчених та спеціалістів і, розуміючи недостатність спілкування наукової спільноти при наявності лише однієї тематичної конференції, на кафедрі САУЕ в 1999 році було прийнято рішення самостійного щорічного проведення науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» з такою ж тематичною спрямованістю, як і конференція НТУ «ХПІ», але з проведенням в травні. При цьому Кременчуцька конференція з самого початку розглядалась як допоміжний захід, не конкурентоспроможний конференції, що проводилася НТУ «ХПІ». Конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» вже 15 років звертає увагу електроприводчиків України як форум, передуючий конференції НТУ «ХПІ». Підтримка колег з різних ВНЗ, інституту електродинаміки НАН України дозволила реалізувати конференцію як авторитетний захід в основному для молодих вчених.

Загальна концепція спілкування наукових колективів, наукових напрямів дозволила створити необхідність «замкнення» двох конференцій третьою – Всеукраїнською конференцією молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». Вказана конференція щорічно передує травневій конференції, яка проводиться, як вказувалося раніше, в Кременчуцькому національному університеті ім. М. Остроградського також щорічно в квітні місяці.

З розвитком процесу підготовки магістрів з електроприводу, покращенням організації наукової роботи студентів виросла необхідність підключення до вказаних наукових заходів першої ланки наукової кар'єри – конкурсів студентських наукових робіт, які щорічно проводяться на кафедрі, та Всеукраїнської олімпіади з електроприводу, яка також щорічно проводиться за участі представників студентства Харкова, Одеси, Дніпропетровська, Києва, Львова та ін.

В галузі новацій навчально-методичного характеру, що забезпечують отримання та збереження передових позицій при підготовці кадрів, отримав розвиток і використання принцип наскрізного курсового та дипломного проектування, який дозволив зберегти тенденції широкопланової підготовки спеціалістів з їх профілізацією в обраному інженерному та науковому напрямках. Такий підхід виявився перспективним і затребуваним, дозволив створити сучасну лабораторну базу з неперервним її оновленням, реалізувати продуктивну магістерську підготовку, організувати широкий спектр студентської науки, підготувати численні публікацій на її основі та розвиток винахідництва.

Процес становлення Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (КрНУ) як навчального закладу з розвиненими учбово-методичними підходами в освітньому процесі, розвиненими науковими школами для кадрового забезпечення в часі збігся з негативними процесами, що торкнулися вищої школи в 90-их роках минулого сторіччя. Ситуація істотно ускладнилася тим, що Кременчуцький регіон, будучи великим промисловим центром, не був забезпечений науково-кадровим потенціалом на необхідному рівні. Зазначені труднощі призвели до необхідності підготовки власних кваліфікованих фахівців, що пройшли навчання в аспірантурі й захистили дисертаційні роботи. Пошук вирішення цього складного завдання дозволив, в остаточному підсумку, організувати, підвищити ефективність студентської роботи, інтегрувати навчальний процес і елементи наукового пошуку (рис. 1).

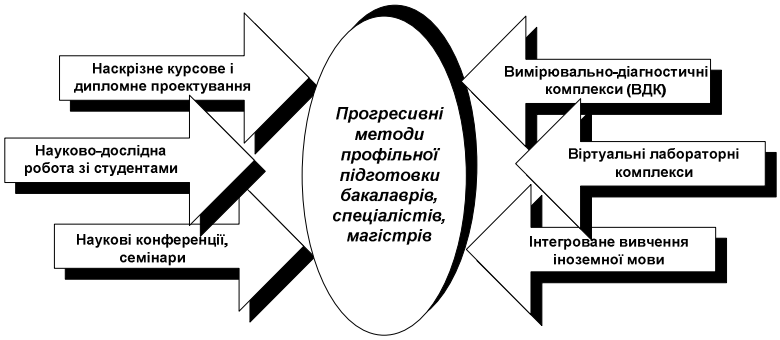


Рис. 1 Технології підготовки кадрів на кафедрі САУЕ.

Охарактеризуємо загалом ті підходи, завдяки яким удалося підняти студентську науку на рівень, що поєднує навчальний процес, студентську наукову творчість і серйозне наукове дослідження молодого вченого. Така концепція включає досить добре апробовані протягом багатьох років прийоми.

Особлива увага приділяється трьом основним напрямкам формування фахівця (рис. 1): посиленню його професійної підготовки; наукової орієнтації, що повинна вирішувати як проблеми відтворення професорсько-викладацького персоналу ВНЗ, так і навчання майбутнього фахівця не тільки репродуктивної, але й інноваційної діяльності; мовної підготовки професійної спрямованості. При цьому головною ланкою підготовки фахівця виступає випускаюча кафедра, що повинна бути самостійно функціонуючим елементом університету.

Зупинимося докладніше на особливостях організації студентської науки й роботи з магістрантами, аспірантами, здобувачами на прикладі кафедри систем автоматичного управління та електропривода, як найбільш результативної в цьому плані. Структура кафедри включає:

- учбово-методичний комплекс підготовки бакалаврів, фахівців, магістрів;
- лабораторно-дослідницьку базу для виконання НДР, учбово-практичної підготовки студентів;
- сектор держбюджетних і госпдоговірних досліджень;
- профільні наукові колективи на базі аспірантури й магістратури, що складаються зі студента – магістранта – аспіранта – наукового керівника (професора або доцента);
- сектор науково-дослідної роботи зі студентами.

Одним із найважливіших етапів підготовки фахівця як майбутнього інженера-дослідника є організація виконання ним курсових і дипломних проектів, магістерських робіт, де досить успішно зарекомендувала себе така організаційна форма як наскрізне курсове й дипломне проектування. Основними моментами, що визначають сутність проекту, є реальне проектування в навчальному процесі (проекти виробничої спрямованості, дослідження характеру, з проблеми забезпечення навчального процесу), а також науково-дослідні роботи, які виконуються на кафедрі.

Розробка та створення сучасного стендового дослідницького обладнання призвело до обґрунтування необхідності його віртуалізації, візуалізації, а згодом – обґрунтування ідеї створення не тільки віртуальних комплексів, але і віртуального технологічного обладнання. В цьому напрямі вбачається не тільки намагання отримати гарний результат при порівняно обмеженому спектрі лабораторного обладнання, але створити умови об'єднання елементів теоретичних пізнань з притаманним Homo Sapiens ігровим супроводом.

На кафедрі САУЕ з 2000 р. постійно працює семінар «Електромеханіка, проблеми енергоперетворення і енергоресурсозбереження», який з 2003 р. отримує статус семінару при НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики». Щорічно на семінарах заслуховується 15–20 доповідей і повідомлень.

В рамках наукової школи кафедри САУЕ створені та функціонують наступні напрями:

– проблеми ідентифікації параметрів електричних двигунів з використанням систем динамічного навантаження, оцінювання параметрів процесів за значеннями миттєвої потужності – під безпосереднім керівництвом проф. Родькіна Д.Й;

– керування процесами перетворення енергії в електромеханічних комплексах для підвищення ефективності їх роботи, створення віртуального обладнання для навчального процесу і наукових досліджень – під керівництвом проф. Чорного О.П.;

– енергоресурсозберігаючі системи і технології управління насосними агрегатами і комплексами – під керівництвом доц. Кореньковой Т.В., яка опублікувала більш ніж 130 наукових статей у різних виданнях, у тому числі фахових закордонних;

– системи діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи електромеханічних комплексів на основі показників якості перетворення енергії – під керівництвом доц. Калінова А.П.;

– підвищення ефективності функціонування об'єктів комунальної енергетики на основі взаємопов'язаного розгляду та вирішення питань енергоспоживання, енерговикористання та енергокерування – під керівництвом канд.техн.наук, доц. Перекреста А.Л.

З початку роботи на посаді ректора КрНУ заслуженого діяча України, д.т.н., професора Загірняка М. В. (2003 р.) науковий напрямок з дослідження енергетичних режимів ЕМС поступово розширився і трансформувався в наукову школу відповідного профілю, а напрямок школи електроприводчиків став складовою частиною більш потужної структури – Кременчуцької школи електромеханіків.

Зміна пріоритету на створення в Кременчуці університету класичного типу, перехід на роботу в університет доктора технічних наук, професора Сінчука О. М. створили умови для «замкнення» науково-освітнього циклу шляхом організації на базі трьох кафедр «Систем автоматичного управління та електропривода», «Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту» та «Електричних машин та апаратів» Інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління та відкриття спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 зі захисту дисертаційних робіт. В спеціалізованої ради захистили дисертаційні роботи 23 особи – робітники кафедри.

Гідною оцінкою наукової роботи науковців школи стало визнання на рівні країни:

– згідно з Наказом Президента України № 1122/2008 від 01.12.2008р «Про присудження щорічних премій Президента України для молодих вчених 2008 року» визнана лауреатом доц. Кореньков Т.В. за роботу «Енергозберігаючі системи та технології керування насосними агрегатами та комплексами»;

– згідно з Наказом Президента України «Про присудження щорічних премій Президента України для молодих вчених 2013 року» доц. Калінов А.П., доц. Огарь В.О., ст. викл. Ромашихін Ю.В. і доц. Мамчур Д.Г. за цикл наукових праць «Наукові основи енергозбереження засобами електропривода на базі використання методів теорії миттєвої потужності» визнані лауреатами щорічної премії Президента України;

– для підтримки наукових досліджень молоді учені доц. Калінов А.П. (2007-2008 рр.), доц. Перекрест А.Л. (2012-2013 рр) та доц. Огарь В.О. (2014-2015 рр) здобули стипендію Кабінету Міністрів України для молодих учених.

Науковцями школи «Електромеханіки» видано понад 40 наукових праць, а саме підручників (1), монографій (18) та навчальних посібників (21) серед яких видані за останні роки:

– Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейных свойств магнитной системы (монографія, В.О. Огарь, Д.Й. Родькін, 2012 р.);

– Діагностика асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності (монографія, М. В. Загірняк, Д. Г. Мамчур, А. П. Калінов, А. В. Чумачова, 2012 р.);

– Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей (монографія, М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин, А. П. Черный, 2013 р.).

Фахівцями наукової школи рецензуються та видаються два щоквартальні наукові журнали:

– фаховий науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи» (ees.kdu.edu.ua);

– електронний науково-практичний журнал «Інженерні та освітні технології» (eetecs.kdu.edu.ua).

Щороку за підсумками проведення Міжнародних наукових конференцій видаються збірники матеріалів:

– матеріали науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації»;

– дайджести Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика».

Підводячи підсумки майже п'ятнадцяти річної діяльності наукової школи був виданий збірник «Кафедра «Системи автоматичного управління та електропривод». Досвід. Досягнення. Перспективи» (2012 р., обсягом 311 с.), у якому зібрано матеріали навчальної, наукової та виховної роботи за весь період становлення школи.

2014 року видане інформаційне видання до XV Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» де представлено аналіз етапів становлення, розвитку та роботи наукового колективу і показано, що колектив наукової школи кафедра САУЕ на даний момент є одним з лідерів підготовки фахівців-електромеханіків в Україні.

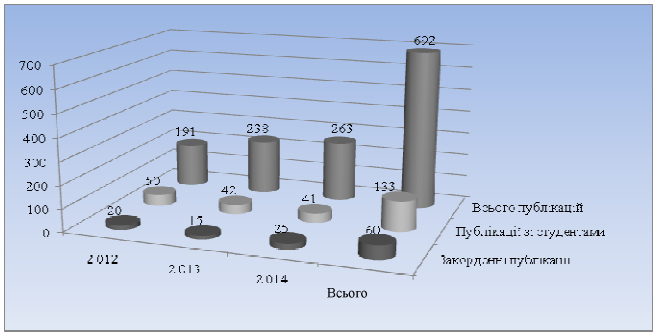


Рис. 2 Показники кількості публікацій школи за останні роки.

Із 2012 року видається «Реферативний журнал Інституту електромеханіки, енергозбереженні і систем управління» в якому розміщені реферати наукових публікацій працівників наукової школи. Дане видання зручне для швидкого ознайомлення наукового загалу із результатами досліджень наукового колективу (refieesu.kdu.edu.ua).

Загальна кількість наукових публікацій колективу школи за весь період існування налічує більше 700 статей, тез, дайджестів тощо. На рис. 2 наведено кількість публікацій фахівців школи за останні три роки.

За результатами наукових досліджень науковим колективом школи отримано понад 150 патентних документів. Інформація щодо винахідницької діяльність за останні три роки приведена на рис. 3.

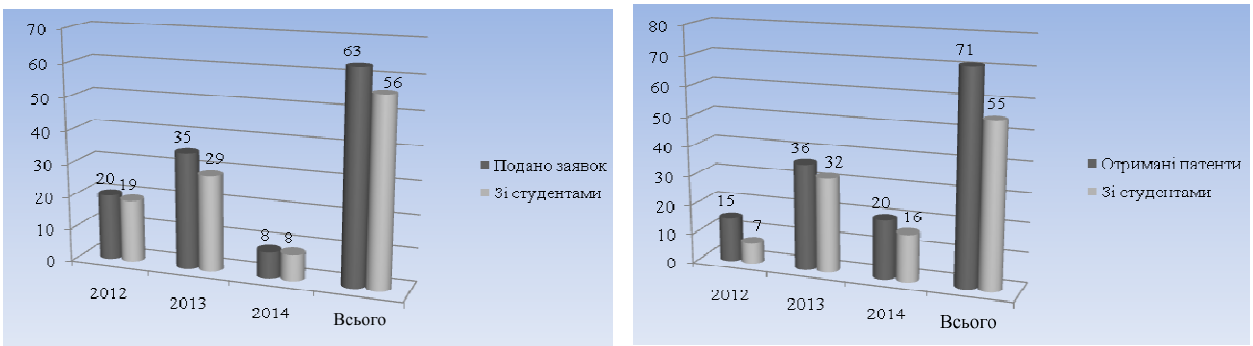


Рис. 3 Результати винахідницької діяльності колективу.

Для висвітлення досягнень науковців та обміну науковими думками колективом школи були започатковані дві наукові щорічні конференції, які згодом набули статусу Міжнародних:

– міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереженя електротехнічних системах. Наука, освіта, практика» (початок 1999 р.),

– міжнародна науково-технічна конференція молодих учених «Електротехнічні системи, методи моделювання та оптимізації» (початок 2002 р.).

Основні показники якості проведення конференції приведені на діаграмах (рис 4, 5).

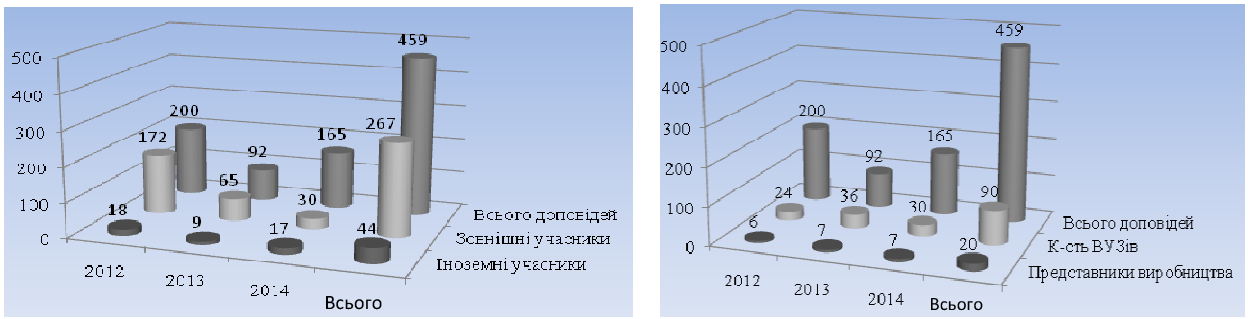


Рис. 4 Показники проведення Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереженя електротехнічних системах. Наука, освіта, практика».

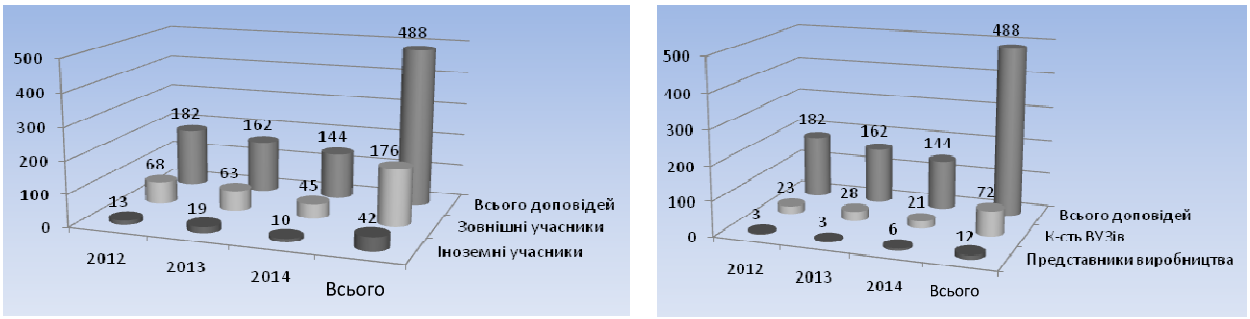


Рис. 5 Показники проведення Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації».

У 2012 році колектив кафедри організовував і провів XIX Міжнародну науково-технічну конференція «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (ПАЕП-2012) у пгт. Миколаївка, АР Крим.

До участі у конференції долучились 384 науковця, 125 взяли безпосередню участь, із них: 33 – д.т.н., проф., к.т.н., 40 – доц., 16 - аспірантів, 25 - викладачів, 10 – представників виробництв. Географія учасників представлена: 7-ма країнами учасницями – Україна, Казахстан, Німеччина, Росія, Польща, Марокко, Грузія; представниками 3-х академічних установ, 24-х ВНЗ та 6-ма підприємствами.

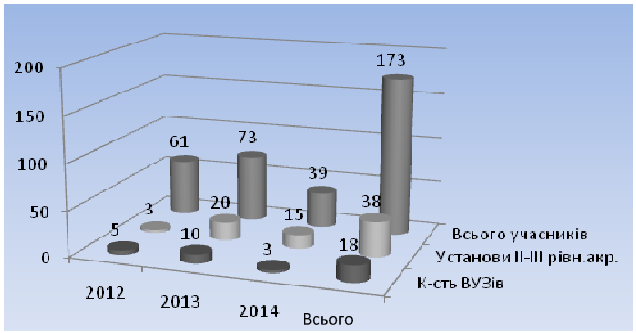


Рис. 6 Показники проведення науково-методичного семінару «Інформаційні технології в навчальному процесі».

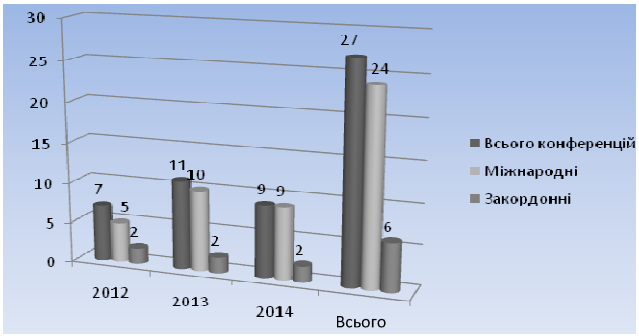


Рис. 7 Участь науковців школи в конференціях.

У рамках конференції пройшло засідання науково-методичної комісії з напряму «Електромеханіка» МОН України, відбулася конференція Української асоціації інженерів-електриків, проведений конкурс доповідей молодих учених, в якому взяли участь 26 молодих науковців, серед яких представник наукової школи виборов почесне друге місце.

Слід зазначити, що під час роботи усіх конференцій проводиться спеціалізована науково-технічна виставка «Сучасні технології в освіті і виробництві». На конференції ПАЕП-2012 було започатковано проведення навчально-методичної виставки, на якій були представлені розробки фахівців наукової школи у вигляді виданих монографій, підручників, навчальних та методичних посібників, наукових журналів тощо

Фахівцями наукової школи започатковано науково-методичний семінар «Інформаційні технології в навчальному процесі» (2011 р.), який проходить раз на рік у грудні. Семінар з кожним роком приймати нові форми проведення і набуває все більшої актуальності (рис. 6).

Одним із значних досягнень колективу наукової школи є участь її науковців, аспірантів та студентів у міжнародних наукових конференціях, які проходять за межами України.

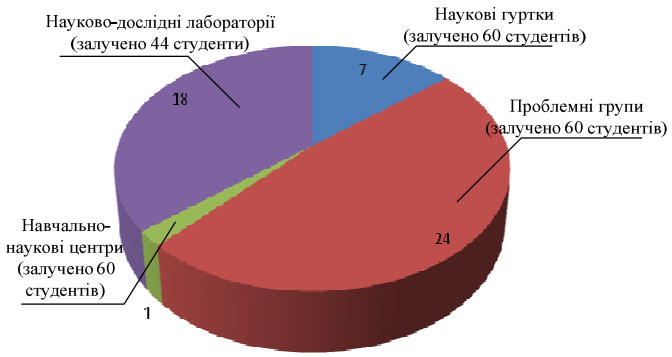


Рис. 8 Показники студентської наукової роботи.

Протягом останніх років науковці школи взяли участь у 27 наукових конференціях різних рівнів: міжнародних – 24; всеукраїнських – 1 (рис. 7).

Невід'ємною складовою напряму роботи наукової школи є залучення студентів до наукової роботи. Загальна кількість наукових гуртків, лабораторій тощо приведена на рис 8.

У рамках науково-дослідної роботи студентів проводяться студентські олімпіади першого туру за напрямками «Електромеханіка» та «Комп'ютеризовані системи, автоматика і управління», а також ІІ тур Всеукраїнської студентської олімпіади за напрямом «Електромеханіка» (рис. 9).

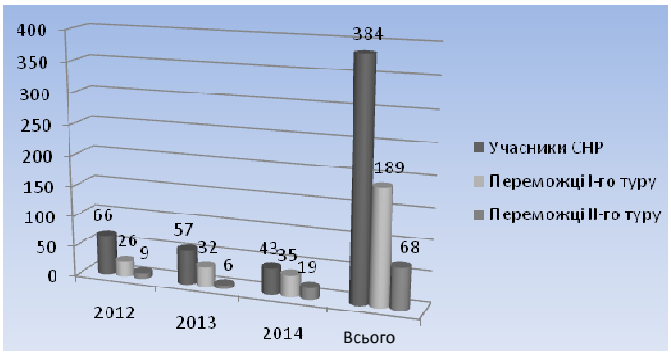


Рис. 9 Участь студентів у конкурсах СНР.

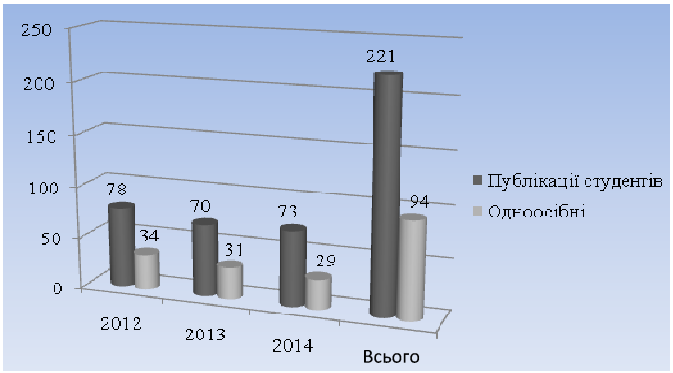


Рис. 10 Результати наукових публікацій студентів.

Завдяки тісним науковим та дослідницьким зв'язкам компанією «СВ Альтера» для дослідницької лабораторії «Автоматизованого електропривода загальнопромислових механізмів» були передані зразки устаткування від провідних компаній-виробників засобів автоматизації Copa-Data, Transtecno, Овен, Carlo Gavazzi, Relpol, Lenz, Vipa, Autonics.

Фахівцями наукової школи постійно оновлюється та модернізується дослідницьких лабораторій. Ідея модернізації лабораторії полягає у використанні існуючих лабораторних стендів, як об'єктів автоматизації, для створення єдиної системи керування технологічними комплексами на базі наданого обладнання. Компактно розміщений на спеціально підготовленому робочому місці комплект промислових контролерів, панелей операторів і перетворювачів частоти забезпечує керування одним або декількома фізичними моделями реальних об'єктів відповідно до заданих алгоритмів функціонування. Такий комплекс програмно-апаратних засобів дозволяє здійснювати збір, обробку технологічної інформації та керування технологічними об'єктами, був зібраний і введений в експлуатацію у 2012 році.

Для модернізації лабораторії «Елементи автоматизованого електропривода» доц. Каліновим А.П. та доц. Мельниковим В.О. розроблено комплекс готових до впровадження малогабаритних фізичних стендів та навчальний посібник «Елементи автоматизованого електропривода».

У 2012 році було створено «Інформаційно-навчальний центр» кафедри, де розміщені 9 тематичних плакатів на яких висвітлені досягнення наукового колективу: інформація про науково-дослідницький центр КрНУ; організація наукової роботи; система підготовки кадрів вищої кваліфікації; наукові конференції, семінари, виставки, видавнича діяльність; наукові і творчі зв'язки; міжнародні наукові зв'язки; аспекти організації студентської науки; дипломне та курсове наскрізне проектування; захищені дисертації тощо.

У 2014 році був створений «Інформаційно-навчальний центр для магістрантів», який дозволяє проводити дослідження з використанням кафедральної бібліотеки, реалізувати семінарські заняття з використанням мультимедійної апаратури.

В цілому кафедра САУЕ Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського з оптимізмом дивиться на перспективу індивідуалізації процесу навчання з використанням промислового обладнання, комп'ютерних технологій для поліпшення якості навчання в питанях підвищення ефективності електромеханічних систем.

Список літератури: 1. *Родькин Д. И.* Опыт создания и эффективность работы научно-исследовательского комплекса кафедры / *Д. И. Родькин, Т. В. Коренькова* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КДПУ ім. М. Остроградського, 2007. Вип. 1/2007(1). – С. 8–13. **2.** *Родькин Д. И.* Актуальные вопросы теории и практики энергоресурсосберегающих электромеханических систем / *Д. И. Родькин* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 3(50), Част. 1. – С. 8–17. **3.** *Родькин Д. И.* Теория электропривода – проблемы и перспективы / *Д. И. Родькин* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2008, №30. – С. 593–599. **4.** *Загірняк М. В.* Віртуальні лабораторні системи і комплекси – нова перспектива наукового пошуку і підвищення якості підготовки фахівців з електромеханіки / *М. В. Загірняк, Д. Й. Родькін, О. П. Чорний* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – Вип. 2/2009(6). – С. 8–12. **5.** *Родькін Д. Й.* Кафедра «Системи автоматичного управління та електропривод» (до 10-річчя існування) / *Д. Й. Родькін, О. П. Чорний, В. О. Євстіфєєв, Т. В. Коренькова* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – Вип. 3/2009(7). – С. 8–15. **6.** *Родькін Д. Й.* Віртуальні комплекси і тренажери – технологія якісної підготовки фахівців у галузі електромеханіки, автоматизації та управління / *Д. Й. Родькін, О. П. Чорний* // Вища школа: наук. практ. видан. – 2010. – № 7–8. – Освітні технології. – С. 23–34. **7.** *Загирняк М. В.* Направления развития теории мгновенной мощности и ее применение в задачах электромеханики / *М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, А. П. Черный, Т. В. Коренькова* // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – Київ : Техніка, 2011. – С. 347–354. **8.** http://www.kdu.edu.ua **9.** http://www.kdu.edu.ua/new/institut.php. **10.** http://saue.kdu.edu.ua

Bibliography (transliterated): 1. Rod`kin, D. I. and T. V. Korenkova. "Dosvid stvorennya ta efektyvnist` roboty naukovo-doslidnoho kompleksu kafedry." *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Shchokvartalnuy naukovo-vyrobnychuy zhurnal*. No. 1 (1). 2007. 8–13. Print. **2.** Rod`kin, D. I. "Aktual`ni pytannya teoriyi i praktyky enerhoresursozberihayuchykh elektromekhanichnykh system." *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho*. No. 3 (50). Part 1. 2008. 8–17. Print. **3.** Rod`kyn D. I. "Teoriya elektropryvodu - problemy ta perspektyvy." *Visnyk natsyonalnoho tekhnycheskoho unyversyteta "Kharkivskyy politekhnichnyy instytut"*. No 30. 2008. 593–599. Print. **4.** Zagirnyak, M. V., Rod`kin, D. I. and O. P. Chornyi "Virtualni laboratorni systemy i kompleksy - nova perspektyva naukovoho poshuka i pidvyshchennya yakosti pidhotovki fakhivtsiv z elektromekhaniki." *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Shchokvartalnuy naukovo-vyrobnychuy zhurnal*. No 2 (6). 8–12. Print. **5.** Rod`kin, D. I. O. P. Chornyi, V. O. Yevstifyeyev and T. V. Korenkova "Kafedra "Systemy avtomatychnoho upravlinnya ta elektropryvod" (do 10-richchya isnuvannya)." *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Shchokvartalnuy naukovo-vyrobnychuy zhurnal*. No. 3 (7). 2009. 8–15. Print. **6.** Rod`kin, D. I. and O. P. Chornyi. "Virtualni kompleksi i trenazhery - tekhnolohiya yakisnoyi pidhotovki fakhivtsiv u haluzi elektromekhaniki, avtomatyzatsiyi ta upravlinnya." *Vyshcha shkola: nauk. prakt. vydan. Osvitni tekhnolohiyi*. No. 7–8. 2010. 23–34. Print. **7.** Zagirnyak, M. V., D. I. Rod`kyn, A. P. Chornyi and T. V. Korenkova "Napryamy rozvytku teoriyi myttyevoyi potuzhnosti ta yiyi zastosuvannya v zadachakh elektromekhaniku." *Tematychnyy vypusk "Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriya y praktyka" naukovo-tekhnichnoho zhurnalu "Elektrotekhnichni ta komp'yuterni systemy"*. 2011. 347–354. Print. **8.** http://www.kdu.edu.ua **9.** http://www.kdu.edu.ua/new/institut.php. **10.** http://saue.kdu.edu.ua.

Надійшла (received) 17.06.2015

УДК

В.А. БАРСКИЙ,
д.т.н., проф., Председатель Правления - Главный конструктор МК «Энергосбережение», Харьков

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНСОРЦИУМ «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ» (WWW.MKE.COM.UA) – 20 ЛЕТ РАЗРАБОТОК И ВНЕДРЕНИЯ НОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ

Кафедра электропривода Харьковского политехнического института создала школу, которая задавала и содержание, и уровень работы многих предприятий и организаций Харькова, занимавшихся разработками и проектированием электроприводов. В частности, это относилось к ЦКБ по электроприводу и автоматике (позднее - НИИ НПО ХЭМЗ) Харьковского электромеханического завода.

После появления тиристоров в создание тиристорных электроприводов, выпускавшихся ХЭМЗом, решающий вклад вложили выпускники кафедры «Промышленной электроники». При этом задачи управления тиристорными приводами с использованием открывшихся новых возможностей решали выпускники кафедры «Автоматизированного электропривода».

Когда, к сожалению, разработки электроприводов на ХЭМЗе прекратились, часть разработчиков инициативно продолжила деятельность в этом направлении. Именно эти воспитанники упоминавшихся кафедр дали старт предприятию Международный Консорциум «Энергосбережение» (МКЭ), которое в текущем году отмечает двадцатилетие.

С 1993 г. МКЭ постоянно участвует в конференциях, проводимых кафедрами электропривода и промышленной электроники ХПИ.

Основное направление деятельности МКЭ – создание и производство существенно новой конкурентоспособной продукции и разработка проектов на её основе.

Инновационность созданного инициативно в 1991÷93 г.г. группой специалистов в области преобразовательной техники, электропривода и систем управления **первого на постсоветском пространстве преобразователя частоты на IGBT** с микропроцессорным управлением **была причиной создания МКЭ.**

После его успешных испытаний в январе 1994 г. во ВНИИ электроэнергетики (г. Москва) ряд электротехнических и приборостроительных предприятий и организаций России, Украины и Белоруссии решили объединить возможности в целях освоения и производства этой наиболее перспективной для того времени технологии энергосбережения, автоматического регулирования технологическими процессами средствами электропривода, автономной энергетики и др. отраслей.

В январе 1995 г. Международный Консорциум «Энергосбережение» был юридически зарегистрирован.

В апреле того же года первые 5 образцов преобразователей частоты были сданы в эксплуатацию в схемах водоснабжения «Зеленоградводоканала».

После успешной полугодичной эксплуатации правительство Москвы приняло решение о широком применении этих устройств. Была впервые заказана крупная партия для Мосводоканала.

С 1996 г. по техдокументации МКЭ началось производство ПЧ на IGBT на заводах «Электровыпрямитель» (Россия) и «Измеритель» (Белоруссия).

В последующие годы были разработаны серии ПЧ на IGBT мощностью до 315 кВт, затем – 1000 кВт и более [1].

На их основе были разработаны энергосберегающие электроприводы для всех систем ЖКХ – водоснабжения и водоотведения, для теплоснабжения, для котельных, для горэлектротранспорта.

Параллельно на новом технологическом уровне были продолжены разработки тиристорных выпрямителей широкого диапазона мощностей для различных отраслей промышленности и транспорта – шахтных подъёмных машин, железнодорожной тяги, буровых и др. оборудования [14].

В рамках этих работ были созданы современные системы управления и регулирования – от алгоритмов до аппаратной реализации, включая программирование.

Это позволило перейти к созданию электрооборудования для различных технологических установок – от станций управления насосами добычи нефти [2] до промышленных, в частности, транспортных кондиционеров, систем тягового привода для железных дорог и горэлектротранспорта [14].

Более полную информацию можно получить на сайте www.mke.com.ua.

МКЭ располагает подразделением разработчиков, работающих на современном уровне, основу которого составляют элитные выпускники Харьковского политехнического института, а также других харьковских вузов – радиоэлектроники, авиационного. Средний возраст – ниже 40 лет, средний стаж – 15 лет. Подразделение имеет экспериментальную базу для проведения исследований и поисковых работ.

Инженерный и маркетинговый центры (рис. 1) и производство (рис. 2) расположены в Харькове, филиал с самостоятельным юридическим лицом и производством – в Белгороде.

© В.А. Барский, 2015

МКЭ имеет широкие кооперативные связи с разработчиками и изготовителями силовых реакторов и трансформаторов, металлоконструкций и моточных изделий, партнёрские отношения с разработчиками и изготовителями электрических машин, железнодорожного оборудования, с научными и проектными организациями России, Украины и Белоруссии.

Рис. 1

Рис. 2

Основа деятельности компании – создание и производство новых изделий, которых нет на рынке.

Выработка направлений производится на основе анализа новых возможностей, открывающихся в связи с развитием техники, анализа положения в различных секторах рынка и результатов поиска заинтересованных заказчиков и партнёров.

Наши возможности:

1. Создавать преобразователи электрической энергии постоянного и переменного тока широкого диапазона мощностей – от единиц кВт до десяти МВт и более, их силовые схемы, конструкции (в том числе – для тяжёлых условий эксплуатации), технологию их производства и испытаний. Разрабатывать возможные номенклатуры, ряды типоисполнений, типовые структуры и типовые компоновки, унифицированные сборочные единицы, позволяющие собирать комплектные устройства широкого диапазона мощностей и применений.
2. Создавать электромашинно-вентильные системы, с «влезанием» в принципы построения, схемы и конструкции, как электрических машин, так и преобразователей.
3. Создавать системы и устройства управления, включая микропроцессорные контроллеры, датчики и другое специальное оборудование, необходимое управление и автоматизацию [2].
4. Решать проблемы, связанные с электромагнитной и электромеханической совместимостью с электроэнергетическими системами и схемами электроснабжения, в том числе – с использованием накопителей электроэнергии [13].
5. Создавать автоматизированные электроприводы и системы автономной энергетики для промышленности и транспорта, с учётом специфики используемых технологий и оборудования [3].
6. Создавать климатическое оборудование, в том числе – для подвижного состава [14].
7. Создавать простые устройства плавного пуска и схемы подключения к питающим сетям электродвигателей средней и большой мощности турбомеханизмов и механизмов, пускаемых с небольшими нагрузками [4, 12].
8. Создавать измерительное и испытательное оборудование [5, 10].
9. Проводить энергоаудит, выявлять возможности энергосбережения, разрабатывать и реализовывать «под ключ» соответствующие проекты.
10. Организовывать изготовление комплексов электрооборудования, включающих и разработанные МКЭ, осуществлять их поставки, выполнять рабочие проекты их установки, монтаж (или шеф-монтаж), наладку, обучение персонала [6, 10].
11. Обеспечивать гарантийное и послегарантийное обслуживание с необходимой модернизацией на протяжении всего жизненного цикла оборудования.

Примеры реализации этих возможностей:

П. 1. Преобразователи постоянного тока серий РЭП, РЭП2, РЭП2Ш, ВУТГ, БУНА, Кремний и др. для различных отраслей – шахтного подъёма, электрической тяги, буровых, кораблей и др.

Преобразователи переменного тока серий РЭН, РЭН2, РЭН2И, РЭН2В, РЭН2С, ШЕРП-6000 и др. для ЖКХ, промышленности, кораблей, нефтедобычи и др.

П. 2. Системы электропривода и автономной энергетики на основе электрических машин с пассивными роторами, в том числе – высокооборотные, интегрированные между собой схемотехнически, конструктивно [7]. В

том числе – т.н. низковольтные интегрированные электроприводы средней и большой мощности, построены на машинах с секционированными обмотками, питающимися через секции преобразователей; электрические машины с пассивными роторами, в том числе – высокооборотные, управляемые с помощью специальных преобразователей, применяемые как в электроприводе (в том числе – взрывобезопасном), так и в автономной энергетике, и др.[11]

П. 3. За время работы МКЭ было разработано 8 поколений микропроцессорных контроллеров на всё усложняющейся элементной базе – от кристаллов Intel 8031 до современных DSP серии TMS320F2000 и процессоров на ARM Cortex-M4 архитектуре, которые использовались в преобразователях и приводах различных поколений.

Отличительной особенностью решения задач управления в ряде проектов была интеграция в одном кристалле задач управления электромагнитными, электромеханическими и технологическими процессами в электроприводе. В частности, таким образом управлялась станция для нефтедобычи «ШЕРП-6000». А система управления испытательной станцией для Новочеркасского электровозостроительного завода, описанная ниже, была 3-х уровневой, с развитым аппаратным обеспечением на каждом уровне.

П. 4. Главной задачей электромеханической совместимости для электроэнергетической системы Украины является обеспечение совместимости графиков генерации и потребления электроэнергии. Как показано в [13], значительный вклад в её решение могут внести электроприводы со встроенными накопителями энергии и используемые самостоятельно комплектные устройства с аккумуляторными накопителями энергии [8].

Наиболее сложная задача электромагнитной совместимости со схемой электроснабжения в нашей практике имела место при встраивании преобразователей частоты серии РЭН2С в бортовую сеть корабля. В конечном счёте блок входного фильтра был соизмерим по габаритам с собственно ПЧ.

Наиболее трудной задачей электромагнитной совместимостью с нагрузкой оказалось обеспечение требуемого качества напряжения при нагрузочных испытаниях тяговых асинхронных электродвигателей мощностью до 1,5 МВт в широком диапазоне частот питания. Потребовалось применение мощных многоступенчатых фильтров, габариты которых превосходили габариты преобразователей [10].

П. 5. Примерами специализированных автоматизированных электроприводов с учётом специфики технологии могут быть системы тягодутьевых приводов для котельных установок типа ЭКО-3 [9], поддерживающие методом автоматической самонастройки максимально возможного к.п.д. горения топлива, и самонастраивающаяся система откачки нефти типа ШЕРП-600, обеспечивающая отбор допустимого дебита скважины при минимально возможной частоте качаний штанговой глубинно-насосной установки.

П. 6. В МКЭ были впервые созданы интегрированные установки кондиционирования для кабин локомотивов и вагонов со встроенными преобразователями частоты и охлаждением электронных устройств за счёт работы кондиционера. Они обладают наибольшей надёжностью, сохранением работоспособности при температурах окружающей среды до 70 °С, работают в режиме «климат-контроля», имеют минимальные габариты и вес [14].

П. 7. Описанная в [12] серия устройств плавного пуска типа РУПП позволяет многократно снизить затраты на решение задачи безударного пуска двигателей переменного тока. Впервые создаются условия, позволяющие поставщикам электродвигателей предлагать потребителям комплект минимальной стоимости электродвигатель плюс РУПП. С другой стороны, впервые появилась возможность предлагать рынку шкаф КРУ для подключения двигателей с подключённым РУПП, что предельно упрощает схему питания двигателя, её реализацию и последующую эксплуатацию.

П. 8. МКЭ впервые решил задачу обеспечения приёмосдаточных испытаний электродвигателей, производимых крупным предприятием, в автоматическом режиме, с полным исключением субъективного фактора [10].

П. 9. МКЭ многократно проводил энергоаудит различных объектов на предмет выявления возможностей энергосбережения и выработки соответствующих предложений. Наиболее крупным был энергоаудит Енакиевского металлургического завода, завершившийся перечнями мероприятий с 2^x и 4^x летними сроками окупаемости и техническими предложениями по каждому мероприятию.

П.п. 10, 11. Наиболее показательный пример – поставка комплекса оборудования схемы электроснабжения испытательного, измерительного и управляющего оборудования для станции испытания электродвигателей Новочеркасского электровозостроительного завода, выполнение рабочих проектов строительной, сантехнической, электромонтажной частей, монтаж и шефмонтаж всего оборудования, его наладка и обучение персонала. После завершения гарантийного обслуживания уже 4 года осуществляется послегарантийное, с необходимой модернизацией.

Аналогично обслуживаются сложные комплексы оборудования шахтных подъёмных машин, буровых и др., разработанные и поставленные МКЭ комплексы.

МКЭ имеет три уровня продуктов:

– разработанные и серийно изготавливаемые;

– находящиеся в разработке;

– перспективные.

Для первого, включающего 15 позиций, характерны отсутствие необходимости в доработке документации.

Для второго, включающего 29 позиций, необходимы доработки с учётом требований заказчиков.

Для третьего необходимы затраты на разработки и определённый срок на реализацию.

Технические системы, которые интересуют МКЭ в настоящее время (электромеханические системы на основе электрических машин с пассивными роторами, системы с накопителями энергии и др.), относятся ко второму и третьему уровням.

Выводы:

МКЭ предлагает потенциальным заказчикам и партнёрам:

– продукцию, представленную в этой статье, а также на нашем сайте www.mke.com.ua;

– проекты с использованием своей продукции и инжинирингом, с учётом технологических и др. требований заказчиков;

– создание (в том числе – совместное) новой продукции на основе своих задельных разработок и предложений заказчиков и партнёров;

– совместные разработки и производство, инжиниринг продукции, имеющей перспективные рынки;

– услуги по исследованиям, разработкам оборудования и систем для отечественных и зарубежных заказчиков.

Список литературы: **1.** *Барский В.А., Брызгалов М.Г., Волокита Л.И., Дубров Н.Н., Пащенко А.В., Уфимцев И.В., Перчик Д.Я.* Энергосберегающие регулируемые транзисторные электроприводы серии РЭН // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 1996. **2.** *Барский В.А., Дубров Н.Н., Уфимцев И.В., Курдюмов Д.С.* Проблемы построения систем управления параметрами станков-качалок с регулируемым приводом // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2001. **3.** *Барский В.А., Иванов В.А., Яровой Г.И.* Тягово-инверторный блок маневрового тепловоза //Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2006. **4.** *Барский В.А., Башта В.Н., Быканов Р.А., Голубев В.Г., Дубров Н.Н.* Запуск синхронных электродвигателей мощностью 8 МВт привода магистральных насосов от параметрического пускового устройства // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2010. **5.** *Барский В.А., Дубров Н.Н., Курдюмов Д.С.* Специфика стендов испытания тяговых электродвигателей постоянного и переменного тока по схеме взаимной нагрузки со статистическими преобразователями // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2008. **6.** *Барский В. А., Маляр А.В.* Стартер-генераторный комплекс газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2011. № 3. С. 196-197. **7.** *Барский В. А., Уфимцев И.В., Маляр А.В.* Преобразовательная часть безредукторной газотурбиной электростанции мощностью 2500 кВт // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 9. Спец. вып. Т. 2: Силовая электроника и энергоэффективность. С. 149-152. **8.** *Барский В. А., Маляр А.В.* О возможности сокращения затрат на электроэнергию, потребляемую электроприводами, в регионах с существенной разницей суточных графиков генерации и потребления электроэнергии // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. 2014. Саранск. **9.** *Барский В.А., Бешта А.С., Горбачев Н.В., Клепиков В.Б., Толочко О.И., Загирняк М.В., Лозинский О.Ю., Садовой А.В., Мехович С.А., Пересада С.М.* Из опыта внедрения энергоресурсосберегающего электропривода в промышленности и ЖКХ Украины // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2013. №36. **10.** *Барский В.А., Курдюмов Д.С., Маляр А.В., Афенченко Р.В.* Автоматизированные станции испытания электрических машин // Электротехника, 2015, №10, Москва. **11.** *Барский В.А., Башта В.Н., Маляр А.В., Курдюмов Д.С., Уфимцев И.В., Афенченко Р.В.* Создание оборудования для безредукторных газотурбинных электростанций // Электротехника, 2015, №10, Москва. **12.** *Барский В.А., Курдюмов Д.С., Быканов Р.А.* Устройства плавного пуска мощных турбомеханизмов и других механизмов, запускаемых вхолостую // Электротехника, 2015, №10, Москва. **13.** *Барский В.А., Башта В.Н., Фришман А.Е., Маляр А.В., Власенко И.Н.* Электроприводы и источники с накопителями энергии для электроэнергетических систем с несоответствиями графиков генерации и потребления // Электротехника, 2015, №10, Москва. **14.** *Барский В.А., Курдюмов Д.С., Уфимцев И.В., Власенко И.Н., Черемухин С.С., Фришман А.Е., Афенченко Р.В., Романов А.В., Емец Е.А.* Новое электро- и климатическое оборудование для железнодорожного транспорта // Электротехника, 2015, №10, Москва.

Поступила (received)

УДК 62-519

Н. В. АНИЩЕНКО, к.т.н., проф. НТУ «ХПИ»;
А. В. ТИМОЩЕНКО, ст. преп. НТУ «ХПИ»;
А. А. ТКАЧЕНКО, к.т.н., ст. преп. НТУ «ХПИ».

СОЗДАНИЕ НА КАФЕДРЕ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ» НТУ «ХПИ» УДАЛЕННОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Современное развитие информационных технологий позволяет внедрить в учебный процесс концепцию удаленного управления оборудованием реальных лабораторий, в том числе в системе дистанционного образования. Организация удаленной лаборатории является одним из современных методов обучения при подготовке специалистов в области технических наук. Создание удаленных лабораторий особенно актуально для инженерного образования при подготовке специалистов-практиков.

Эффективность и польза удаленных лабораторий признана в США, Германии, Австрии, Испании, Великобритании, Швеции, Австралии и многих других государствах.

Лаборатории с удалённым доступом позволяют выполнять реальные эксперименты из любой точки земного шара, обеспечивая возможность работы нескольких студентов за одним лабораторным стендом одновременно. Основные возможности лабораторий с удаленным доступом [1,2]:

- организация непрерывного доступа к оборудованию в автоматическом режиме;
- экономия средств на дублирование одинаковых лабораторных установок;
- повышение эффективности обучения студентов при помощи коллективного удаленного доступа (многопользовательский интерфейс);
- упрощение и удешевление проведения научных экспериментов.

Цель данной статьи ознакомить с методической основой и возможностями разработанной на кафедре лаборатории с удаленным управлением.

Кафедра автоматизированные электромеханические системы НТУ «ХПИ» принимает участие в проекте 530278-TEMPUS-1-DE-TEMPUS-JPHES «iCo-op: – Промышленная кооперация и креативная инженерия на основе удаленной инженерии и виртуального инструментария».

В проекте TEMPUS «iCo-op» были предложены удаленные лаборатории трех университетов Европейского союза.

1. Удаленная лаборатория GOLDI (Grid of Online Lab Devices Ilmenau), которая была разработана на кафедре интегрированных коммуникационных систем технологического университета Ильменау, Германия.

2. Удаленная лаборатория WEBLab-Deusto, которая была разработана на машиностроительном факультете университета Deusto, Испания.

3. Креативная лаборатория университета Трансильвания, Брашов, Румыния. В лаборатории применяется оборудование компании National Instruments.

Лаборатории позволяют решать следующие задачи:

- разработка и отладка физической модели алгоритма управления реальных устройств (трехкоординатный стол, конвейер, программируемый мобильный робот, двигатели, датчики и т.д.);
- разработка алгоритмов и программного обеспечения для управляющих микроконтроллеров;
- отладка программного обеспечения для программируемых логических интегральных схем, таких как FPGA;
- тестирование, измерение и сбор данных;
- изучение промышленных интерфейсов.

В рамках проекта для реализации удаленной лаборатории кафедра приобрела оборудование компании National Instruments (NI) на сумму более 20000€. National Instruments – лидер в области разработки и производства аппаратных и программных средств автоматизированного измерения, диагностики, контроля и моделирования. Оборудование компании NI обладает следующими преимуществами:

- использование многофункциональной лабораторной станции NI ELVIS II+, которая является базовым решением для применения в практических обучающих курсах по различным дисциплинам;
- возможность добавления практических курсов по новым дисциплинам за счет приобретения новых плат;
- возможность разработки и моделирования интегральных схем и печатных плат;
- интеграция с САПР MultiSim.

Платформа проектирования и прототипирования ELVIS II+ (National Instruments Electronic Laboratory Virtual Instrumentation Suite system) используется для реализации образовательных задач по системам управления, мехатронике, схемотехнике, телекоммуникации и встроенным микроконтроллерам.

Образовательная платформа NI ELVIS II+ реализована на основе графической среды NI LabVIEW, Multisim. В комплект станции входит программное обеспечение Labview Academic Standard Suite и Circuit Design Suite.

© Н.В. Анищенко, А.В. Тимощенко, А.А. Ткаченко, 2015

Она содержит 12 встроенных инструментов для интерактивного и практического обучения: регулируемый блок питания, осциллограф, цифровой мультиметр, анализатор ток/ напряжение, генератор стандартных функций, анализатор Боде, генератор произвольных сигналов, анализатор динамических сигналов. Лабораторная станция имеет аналоговые и цифровые входы/выходы; пользовательские таймеры-счетчики; ЦАП и АЦП. Интерфейс подключения к компьютеру – USB 2.0 [3].

NI ELVIS II + имеет открытую архитектуру, что существенно упрощает использование оборудования ведущих поставщиков технических средств обучения.

На основе обзора оборудования компании National Instruments с учетом задач кафедры был сделан выбор для реализации двух лабораторий.

Лаборатория 1: лаборатория систем автоматического управления и электропривода:

1. Образовательная платформа NI ELVIS II+.
2. Плата «Система управления двигателем постоянного тока» – Quanser QNET DC Motor Control Board.
3. Плата «Микроприводы» – Micromotors and Automatic Motor Control.

Лаборатория 2: лаборатория мехатроники и электроники:

1. Образовательная платформа NI ELVIS II+.
2. Плата датчиков мехатроники – Quanser QNET Mechatronics Sensors.
3. Плата проектирования цифровых устройств и программирования ПЛИС – NI Digital Electronics FPGA Board.
4. Мобильный робот на платформе для преподавания и исследования в робототехнике – NI LabVIEW Robotics sbRIO Academic Kit.

Оборудование позволяет выполнять лабораторные работы по 7 дисциплинам. Рассмотрим подробнее возможности каждой платы с точки зрения постановки лабораторных работ по различным курсам специальностей кафедры.

Лаборатория 1: лаборатория систем автоматического управления и электропривода

Плата «Система управления двигателем постоянного тока» – Quanser QNET DC Motor Control Board

Оборудование платы позволяет студентам изучать и самостоятельно разрабатывать системы автоматического управления и регулирования. В процессе работы студенты получают практические навыки создания, тестирования и отладки систем с реальными объектами управления.

Лабораторные работы посвящены основным темам теории управления, в том числе статическим и динамическим свойствам систем регулирования, передаточным функциям и частотным характеристикам, основам синтеза систем управления [4]. На плате могут выполняться лабораторные работы по курсам: «Теория автоматического управления», «Моделирование электромеханических систем, «Теория электропривода».

Плата «Микроприводы» – Micromotors and Automatic Motor Control Board

Все лабораторные работы проводятся на плате с установленными на ней микродвигателями постоянного тока. Студенты имеют возможность изучать механические, статические и динамические характеристики электродвигателей в открытой системе с программно-управляемым блоком питания [5]. На плате могут выполняться лабораторные работы по курсам: «Теория электропривода», «Системы управления электроприводами», «Основы электробытовой техники».

Лаборатория 2: лаборатория мехатроники и электроники

Плата датчиков мехатроники – Quanser QNET Mechatronics Sensors Board

Лабораторный практикум охватывает изучение принципов калибровки датчиков, обработки и анализа полученных с датчиков сигналов. Плата комплектуется различными датчиками для проведения лабораторных работ: потенциометр, пленочный пьезодатчик, тензодатчик, термистор, энкодер, оптический датчик, инфракрасный датчик расстояния, ультразвуковой датчик, магнитный датчик, датчик давления [6]. На плате могут выполняться лабораторные работы по курсу: «Основы мехатроники».

Плата проектирования цифровых устройств и программирования ПЛИС – NI Digital Electronics FPGA Board

Плата предназначена для изучения процесса проектирования цифровых устройств. Пользователи могут создавать цифровые блоки в Multisim, а затем воплощать их на макетной плате. Плата имеет микросхему ПЛИС Xilinx Spartan-3E. Имеется возможность создавать приложения для запуска на аппаратной платформе ПЛИС, а также подключать к ее линиям ввода/вывода периферийные устройства: линейки светодиодов, DIP-переключатели, кнопки включения, семисегментные индикаторы, дисплеи, энкодеры и т. д.

Практикум включает лабораторные работы по изучению функционирования и программированию ПЛИС. Программирование ПЛИС может осуществляться как стандартными средствами Xilinx (Xilinx ISE Tools) с помощью языков программирования, таких как Verilog или VHDL, так и на «верхнем уровне» в среде графического программирования LabVIEW [7]. На плате могут выполняться лабораторные работы по курсу «Основы схемотехники».

Мобильный робот на платформе для преподавания и исследования в робототехнике – Robotics Starter Kit (DaNI) for Education (A Mobile Robot Platform for Robotics Teaching and Research)

NI LabVIEW Robotics Starter Kit, известный как DaNI, является промышленным изделием, роботизирован-

ной платформой, предназначенной для изучения концепций робототехники и мехатроники или для создания прототипов роботизированных систем. Робот программируется с использованием графической среды разработки LabVIEW [8]. Робот может использоваться для выполнения лабораторных работ по курсу «Основы мехатроники».

Состав установки:

- мобильный робот в сборе;
- встроенный контроллер NI sbRIO-9632 для управления;
- ультразвуковой датчик, энкодеры, двигатели, аккумулятор и зарядное устройство;
- программное обеспечение для программирования роботов, включая обход препятствий;
- возможность программирования с использованием программных модулей LabVIEW Real-Time и LabVIEW Robotics.

Удалённая лаборатория это учебное подразделение, оснащённое реальным учебно-исследовательским оборудованием с дистанционным доступом к нему по телекоммуникационным каналам. В состав удаленной лаборатории, как правило, входят: мощные сервер данных и веб-сервер, реальная экспериментальная установка, система управления и система сбора данных, а также лицензионное программное обеспечение.

Главным звеном системы является экспериментальная установка. Информация о протекающем процессе при помощи набора датчиков поступает в микропроцессорную систему сбора и обработки данных. Далее информация через интерфейс поступает в компьютер. Дальнейшую обработку данных производит программное обеспечение компьютера-сервера. Затем посредством протокола TCP/IP данные передаются на компьютер-клиент для отображения на экране в виде показаний и графиков на виртуальных приборах [2].

Изучение возможностей приобретенного оборудования с точки зрения реализации удаленной лаборатории показало, что не все платы позволяют решить эту проблему. В связи с этим, с учетом задач кафедры по подготовке специалистов в области автоматизированного электропривода, мехатроники и электробытовой техники было принято решение для реализации удаленной лаборатории использовать плату «Система управления двигателем постоянного тока» – Quanser QNET DC Motor Control Board. Структурная схема удаленной лаборатории [9] выглядит следующим образом (рис. 1).

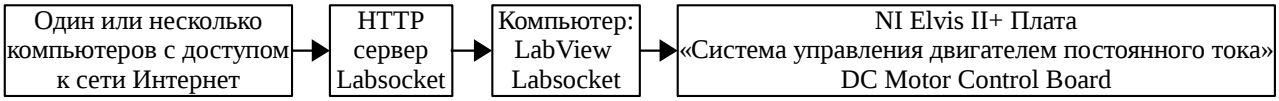


Рисунок 1 – Структурная схема удаленной лаборатории

В рамках выполнения проекта TEMPUS «iCo-op» на кафедре создано три учебных модуля для обучения студентов и повышения квалификации представителей промышленных предприятий и научных учреждений:

- теория автоматического управления;
- моделирование электромеханических систем;
- теория электропривода.

Каждый модуль для последипломного инженерного образования имеет общий объем курса – 20 часов: лекции – 10 часов, лабораторные работы – 5 часов, индивидуальное задание – 5 часов. Курс состоит из 5 лекций, 2 лабораторных работ и индивидуального задания.

Для организации обучения создан сайт проекта, на котором размещена вся необходимая информация (http://skillslab.kharkiv.edu/?lang=ua). Кроме того на сайте приведено описание лаборатории кафедры на оборудовании NI и перечень лабораторных работ, которые можно выполнить на каждой плате (http://skillslab.kharkiv.edu/?page_id=737)

Рассмотрим подробнее реализацию лабораторного практикума с использованием платы «Система управления двигателем постоянного тока» – Quanser QNET DC Motor Control Board.

Система состоит из двигателя с энкодером и инерционным колесом на валу двигателя (рис. 2). Двигатель приводится в движение с помощью усилителя мощности сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Управляющий параметр – напряжение, подаваемое на усилитель драйвера системы, а на выходе системы или скорость вращения колеса, или угол его поворота. Возмущающее воздействие можно ввести вручную, манипулируя колесом, или цифровым способом с помощью LabVIEW.

Процедуры выполнения лабораторных работ представляют собой коллекцию небольших экспериментов, которые используются для преподавания моделирования, теории электропривода и систем управления с помощью виртуальных приборов (ВП) LabView. На плате DC Motor реализовано четыре процедуры: моделирование, управление скоростью, робастность и управление положением. Перед началом выполнения любой процедуры эксперимента необходимо запустить соответствующий ВП.

Для выполнения лабораторных работ в режиме удаленного управления используется расширение для LabVIEW Labsocket-Basic, которое позволяет получить доступ к ВП LabView через веб-интерфейс. Для этого нужно иметь браузер и доступ к компьютеру с программным обеспечением (ПО) Labsocket, через локальную сеть или интернет. Взаимосвязь функциональных компонентов с Labsocket-Basic показана на рис. 3. С полным перечнем

возможностей Labsocket-Basic можно ознакомиться в руководстве, размещенном на сайте компании разработчика [10]. Labsocket-Basic состоит из двух компонентов:

Рисунок 2 – Плата «Система управления двигателем постоянного тока»

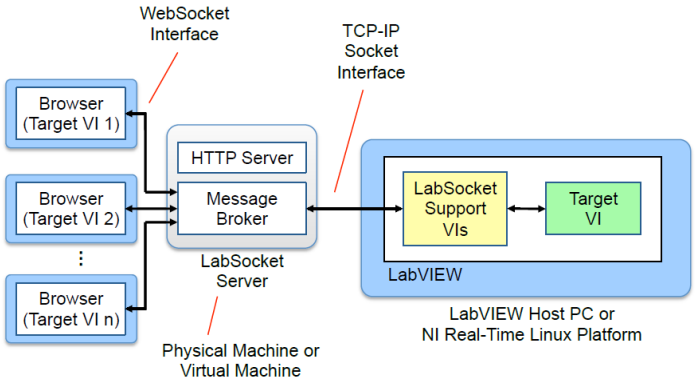


Рисунок 3 – Структура организации работы LabSocket-Basic

▪ расширение для LabVIEW, которое добавляет элементы в палитру инструментов (рис. 4);

▪ ПО, реализующее функции сервера, для осуществления коммуникации между моделью LabVIEW и сервером, а также между пользователем и сервером.

После установки расширения для LabVIEW, для его использования необходимо добавить к блок-диаграмме модели элемент labSocketStart.vi и передать параметры, сгруппированные в кластеры (рис. 5), после чего необходимо настроить параметры сети сервера. После запуска модели, для удаленного управления формируется ссылка, по которой осуществляется доступ к PHP-скрипту. PHP-скрипт создается автоматически из модели LabVIEW и реализует вид ВП в окне браузера.

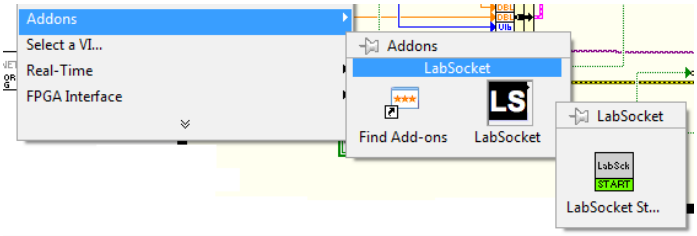


Рисунок 4 – Расширение LabSocket в панели инструментов LabVIEW

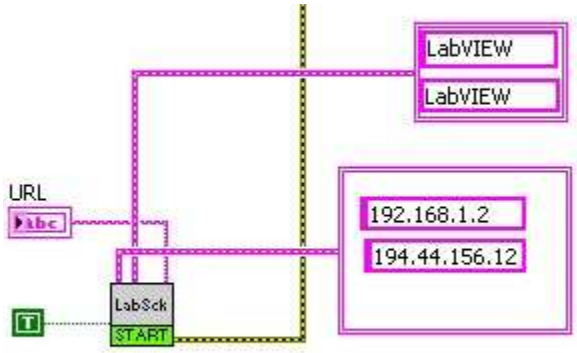


Рисунок 5 – Пример настройки LabSocket в LabVIEW для реализации удаленного доступа

Настройка сервера аналогична настройке сети в среде Linux, так как ПО сервера работает в Linux Ubuntu, а для ПК на операционной системе Windows, доступно в виде файла образа виртуальной машины Oracle.

С применением описанной технологии удаленного доступа были реализованы две лабораторные работы.

Лабораторная работа 1. Получение передаточной функции двигателя (процедура: моделирование QNET-DC Motor Control Trainer (DCMCT).

Виртуальный прибор процедуры *моделирование* – 03-QNET_DCMCT_Modeling.vi. Ключевые параметры уравнения движения двигателя – постоянная двигателя по ЭДС и электрическое сопротивление обмотки якоря двигателя. Они определяются простыми экспериментами. При выполнении лабораторных работ в режиме удаленного доступа эти параметры задаются. Полученная в результате модель – передаточная функция двигателя:

$$W_{\omega,U}(s)=\frac{K}{\tau s+1}\quad , \tag{1}$$

где K – постоянный коэффициент усиления, а τ – постоянная времени.

Когда моделирование выполнено, его можно проверить, если запустить модель и реальный процесс в разомкнутом режиме. Напряжение без обратной связи подается как на модель, так и на реальное устройство, так что и моделируемый и измеряемый отклик можно просмотреть на одной временной развертке. Скриншот лицевой панели ВП QNET – DCMCT процедуры *моделирование* при удаленном управлении показан на рис. 6.

Лабораторная работа 2. Регулирование скорости вращения вала двигателя в замкнутой системе управления (процедура: управление скоростью QNET-DCMCT).

ВП процедуры *управление скоростью* – 04-QNET_DCMCT_Speed_Control.vi. Скорость двигателя постоянного тока регулируется при помощи пропорционально-интегрального регулятора системы управления. Структурная схема системы с обратной связью по скорости показана на рис. 7.

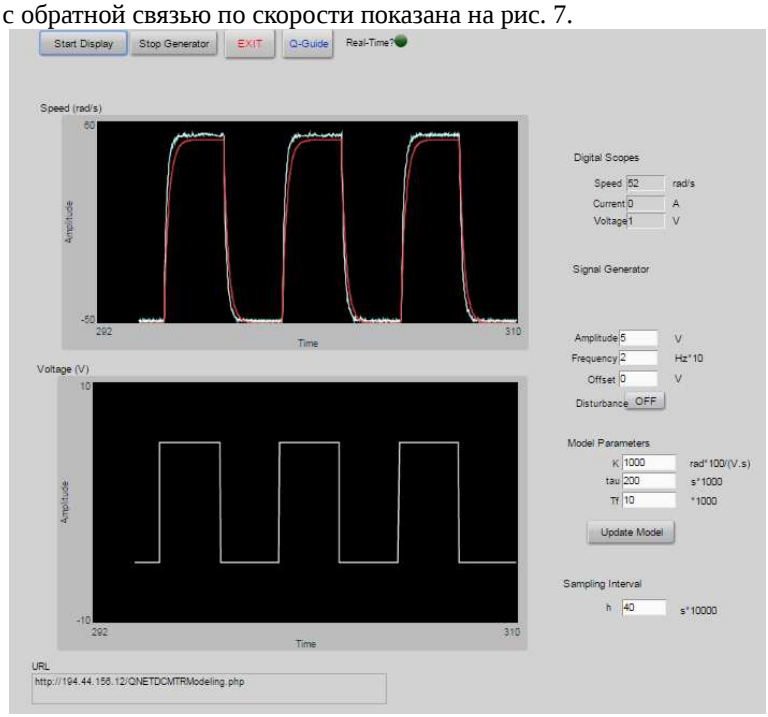


Рисунок 6 – Скриншот экрана при выполнении лабораторной работы 1

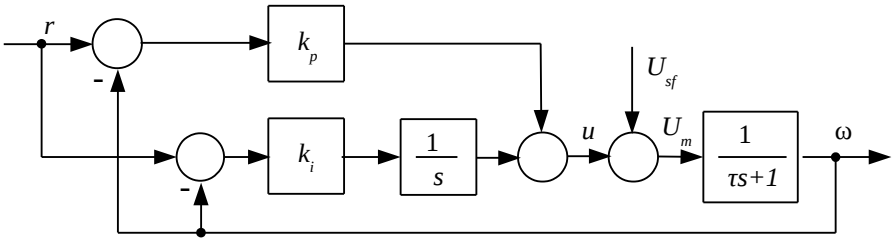


Рисунок 7 – Структурная схема пропорционально-интегрального управления скоростью вращения двигателя постоянного тока

Передаточная функция (1) применяется для разработки ПИ регулятора. Соотношение между входом и выходом ПИ регулятора во временной области равно

$$u = k_p(r-y) + \frac{k_i(r-y)}{s} \quad , \tag{2}$$

где k_p – коэффициент усиления пропорционального звена, k_i – коэффициент усиления интегрального звена. Передаточная функция замкнутой системы равна

$$W_{\omega,U}(s) = \frac{K(k_p s + K_i)}{s^2\tau + (Kk_p + 1)s + Kk_i} \quad . \tag{3}$$

Стандартный характеристический полином замкнутой системы второго порядка имеет вид:

$$s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2 \quad , \tag{4}$$

где ω_0 =16 рад/с – собственная частота замкнутой системы, ξ =0,75 – коэффициент демпфирования. Характеристическое уравнение (3), то есть знаменатель передаточной функции, может соответствовать характеристическому уравнению в формуле (4) при таких коэффициентах усиления:

$$\left.\begin{aligned} k_p &= \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K} \\ k_i &= \frac{\omega_0\tau}{K} \end{aligned}\right\} \quad . \tag{5}$$

Большие значения ω_0 дают большие величины коэффициента усиления регулятора. Коэффициент демпфирования ξ можно использовать для настройки скорости и величины перерегулирования отклика системы.

При выполнении лабораторной работы анализируется реакция системы на прямоугольный сигнал с различными значениями коэффициента усиления и постоянной времени ПИ регулятора. Скриншот лицевой панели ВП QNET – DCMCT процедуры *управление скоростью* при удаленном управлении приведен на рис. 8.

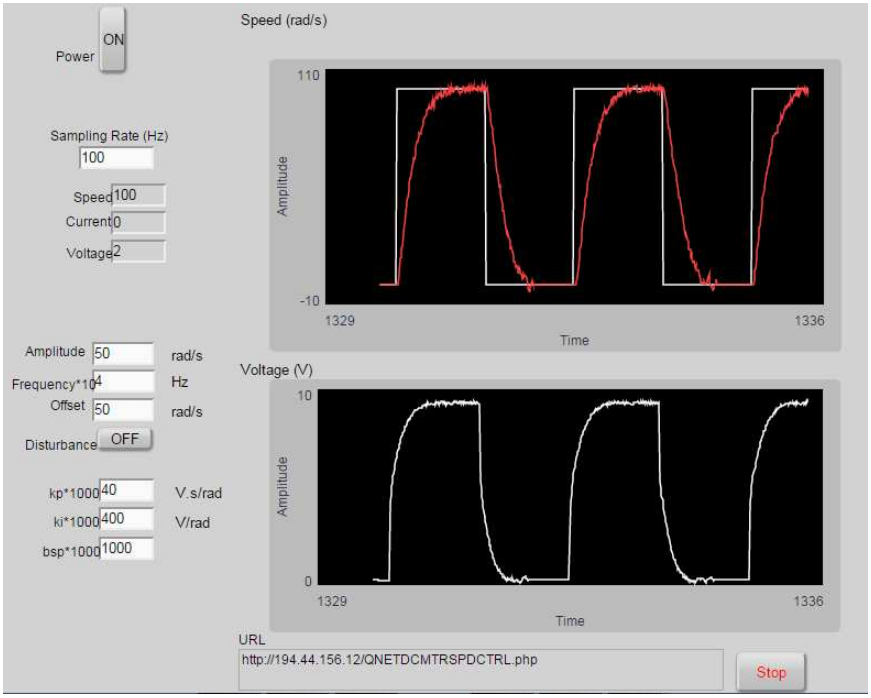


Рисунок 8 – Скриншот экрана при выполнении лабораторной работы 2

При выполнении проекта TEMPUS «iCo-op» кафедра провела пилотное обучение в виде повышения квалификации по курсу «Теория электропривода» для сотрудников различных предприятий г. Харькова. Лаборатория прошла апробацию и получила высокую оценку слушателей.

Список литературы: 1. *Постников Е.Б.* Обзор мирового опыта создания и эксплуатации лабораторий удаленного доступа [Электронный ресурс]: http://www.efmsb.ru/download/Mirovoy_opit_sozdaniya_i_ekspluatacii_laboratoriy_udalennogo_dostupa.pdf. **2.** Принципы создания виртуальных лабораторий в инженерном образовании [Электронный ресурс]: http://www.labfor.ru. **3.** Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS II – руководство пользователя [Электронный ресурс]: http://russia.ni.com. **4.** Управление двигателем постоянного тока QNET-DCMCT – обучающее руководство [Электронный ресурс]: http://russia.ni.com. **5.** Микроприводы – руководство пользователя [Электронный ресурс]: http://russia.ni.com. **6.** Лабораторный практикум QNET-MECHKIT – руководство для преподавателя [Электронный ресурс]: http://russia.ni.com. **7.** Отладочная плата NI Digital Electronics FPGA Board – руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]: http://russia.ni.com. **8.** Тестирование и настройка отладочного набора Robotics Starter Kit – руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]: http://russia.ni.com. **9.** *В. Б. Клепиков, Н. В. Анищенко*. Создание в НТУ «ХПИ» удаленной лаборатории по мехатронике. Сотрудничество университетов ЕС, России и Украины по подготовке магистров в области автоматизации и мехатроники»: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 18–19 сент. 2014 / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2014. С 72–75. **10.** Руководство пользователя LabSocket-Basic [Электронный ресурс]: http://labsocket.com/Download/LabSocket_User_Guide.pdf.

Bibliography (transliterated): 1. *Postnikov E.B.* Obzor mirovogo opita sozdaniya i erspluatatsii laboratoriy udalennogo dostupa [Elektronnyiy resurs]: http://www.efmsb.ru/download/Mirovoy_opit_sozdaniya_i_ekspluatacii_laboratoriy_udalennogo_dostupa.pdf. **2.** Printsipyi sozdaniya virtualnyih laboratoriy v inzhenernom obrazovanii [Elektronnyiy resurs]: http://www.labfor.ru. **3.** Komplekt virtualnyih izmeritelnyih priborov dlya uchebnyih laboratoriy NI ELVIS II – rukovodstvo polzovatelya [Elektronnyiy resurs]: http://russia.ni.com. **4.** Upravlenie dvigatelem postoyannogo toka QNET-DCMCT – obuchayuschee rukovodstvo [Elektronnyiy resurs]: http://russia.ni.com. **5.** Mikroprivodyi – rukovodstvo polzovatelya [Elektronnyiy resurs]: http://russia.ni.com. **6.** Laboratornyiy praktikum QNET-MECHKIT – rukovodstvo dlya prepodavatelya [Elektronnyiy resurs]: http://russia.ni.com. **7.** Otladochnaya plata NI Digital Electronics FPGA Board – rukovodstvo po ekspluatatsii [Elektronnyiy resurs]:http://russia.ni.com. **8.** Testirovanie i nastroyka otladochnogo nabora Robotics Starter Kit – rukovodstvo po ekspluatatsii [Elektronnyiy resurs]: http://russia.ni.com. **9.** V. B. Klepikov, N. V. Anischenko. Sozdanie v NTU «HPI» udalennoy laboratorii po mehatronike. Sotrudnichestvo universitetov ES, Rossii i Ukrainyi po podgotovke magistrov v oblasti avtomatizatsii i mehatroniki»: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 18–19 sent. 2014 / SPbGETU «LETI». SPb., 2014. 72–75. Print. **10.** LabSocket-Basic User Manual [Elektronnyiy resurs]: http://labsocket.com/Download/LabSocket_User_Guide.pdf.

Поступила (received) 06.07.2015

УДК 658.513.012.12

С. К. МЕЩАНИНОВ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой электроники ДДТУ;
А. И. ТРИКИЛО, канд. техн. наук, доцент ДДТУ;
Е. А. КОПЫТОВА, канд. техн. наук, ст. преподаватель ДДТУ;
А. В. ЛЬДОВСКАЯ, студентка ДДТУ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Введение. На сегодняшний день необходимость обеспечения безотказной работы машин и различного рода технологического и иного оборудования, не вызывает сомнений. Сбои и отказы такого рода нередко прямо связаны с деятельностью человека.

Негативные проявления человеческой деятельности можно укрупнено назвать, используя технические термины, сбоем системы «Человек – Машина - Среда» (ЧМС). Рассматривая человека как элемент социума, можно говорить о сбое функционирования его психики. Рассматривая же Человека в контексте его взаимодействия с машинами и оборудованием современного производства, транспорта и т.п., по-видимому, более целесообразно будет рассуждать о сбое системы ЧМС [1-4].

Современное общество стремится, любыми путями свести к минимуму «сбои» функционирования человека в любых ситуациях. При этом, рассматривая человека как живое существо с набором физиологических, психических и иных функций, присущих наиболее высокоразвитому млекопитающему целесообразно, как нам представляется, изучать отказы функционирования его центральной нервной системы как информационно-управляющей системы, то есть, иными словами, существенные нарушения в его психоэмоциональном состоянии (ПЭС).

Постановка задачи исследований. Так как человеческий организм является открытой самоорганизующейся и самообновляющейся системой, справедливо предположить, что контроль за его психофизиологическим состоянием (ПС) целесообразно осуществлять с помощью системы, имеющей способность гибко адаптироваться как к изменяющимся внутренним процессам в человеческом организме, так и к переменным условиям окружающей его среды. Таким образом, **целью настоящей работы является** разработка математической модели электронной системы контроля ПС человека.

Основная часть. Причины нарушения нормального функционирования системы ЧМС можно условно представить в виде 3 групп.

Условно их можно разделить на 3 большие группы:

- технические сбои (неисправная или устаревшая техника, эксплуатация в режимах чрезмерной нагрузки);
- негативные проявления человеческого фактора (безответственное отношение, отсутствие необходимой квалификации и знаний, напряженные условия труда, чрезмерное психологическое напряжение, болезненное физическое состояние);
- непредсказуемое и негативно дестабилизирующее достаточно интенсивное воздействие со стороны внешней среды на человека, которое может привести к неконтролируемому и непредсказуемому преобразованию энергии в другие ее виды, приводящее к возможным катастрофическим изменениям в окружающей среде.

Любой из перечисленных факторов может привести к отказу системы ЧМС, и, следовательно, к аварии.

В настоящее время активно разрабатываются различные методы анализа и прогнозирования ПС и ПЭС человека [5].

В силу актуальности данной проблемы, потребность в аппаратуре, осуществляющей такой анализ, в настоящее время очень высока. Существует довольно большое количество систем предназначенных для диагностики психоэмоционального состояния (ПЭС), либо позволяющих ее проводить (системы Mind Reader [6], Барьер [7], Крис [8], Поларг [9] и др [10]). Регулярно появляются новые системы психофизиологической диагностики. Однако ни одна из них не способна выполнять контроль ПЭС в соответствии с требованиями современного высокопроизводительного производства. Все комплексы осуществляют периодический контроль с довольно большим периодом (от одной до нескольких десятков минут), не позволяющим отслеживать ПЭС человека в реальном масштабе времени. В большинстве систем используются методики, требующие отрыва обследуемых от работы, либо ограничивающие их возможности.

Одни из основных трудностей на пути к созданию требуемой биометрической системы связаны со спецификой регистрируемой информации. Измеряемые параметры с одной стороны слабо коррелированны, а с другой их значения многомодальны и вариабельны от индивидуума к индивидууму. По этой причине возникают сложности при математической обработке и принятии решений.

© С.К. Мещанинов, А.И. Трикило, Е.А. Копытова, А.В. Льдовская, 2015

Работы в этом направлении идут не одно десятилетие, к примеру, известны системы «прослушивания» на людных улицах, которые выдают сигнал тревоги уже при появлении «повышенных» интонаций в речи прохожих.

Проводимые научно-исследовательские испытания [11] показали, что вестибулярные рефлексы и параметры микродвижений головы человека отражают его психоэмоциональное состояние. Таким образом, можно говорить о наличии у человека вестибулярно-эмоционального рефлекса, который характеризует психоэмоциональное состояние человека параметрами микродвижений головы. При этом решается практическая задача определения психоэмоционального состояния человека при проведении бесконтактного дистанционного телевизионного сканирования человека, находящегося в квазистационарном состоянии за время не более 10 секунд. Проведенные в 2007 году испытания данной системы в аэропортах Пулково и Домодедово показали, что система позволяет выявлять пассажиров, находящихся в агрессивном или стрессовом состоянии, и может применяться в качестве технического средства профайлинга пассажиров.

Однако в общем проблема дистанционного мониторинга ПС человека в той или иной ситуации все еще далека от своего решения.

В связи с этим, целесообразно, разработать и внедрить там, где это технически возможно, электронную систему непрерывного мониторинга за психическим и физическим состоянием работников в реальном масштабе времени в течение рабочей смены без отрыва от выполняемой задачи.

Решить поставленную задачу может электронная система контроля ПС человека.

Современный уровень развития компьютерной техники, а также устройств для получения и регистрации текущей информации позволяет практически не ограничивать себя в выборе набора контролируемых параметров, требованиям к точности и достоверности получаемой информации. Однако необходимо правильно задать алгоритм работы такой системы, создав математическую модель ее функционирования.

Весь набор информативных биометрических параметров, характеризующих ПС и ПЭС человека и может быть использован в работе электронной системы контроля состоит, по нашему мнению из трех групп:

1. α – группа неизменных параметров конкретного человека, которые не будут изменяться в течение всей его жизни, см. табл. 1, $\alpha = \{ \alpha_1 , \alpha_2 , \ldots, \alpha_n \}$;

2. β – квазипостоянные биометрические параметры, которые характеризуют ПС человека, то есть те параметры, которые меняются периодически (табл. 2), $\beta = \{ \beta_1 , \beta_2 , \ldots, \beta_m \}$;

3. γ – непрерывно меняющиеся биометрические параметры (табл. 3), $\gamma = \{ \gamma_1 , \gamma_2 , \ldots, \gamma_k \}$.

Таблица 1. - Неизменные биометрические параметры ПС человека

№ п/п	Наименование	Значение (индекс)	Примечания
1	Пол	Мужской / Женский α_1	
2	Наследственные особенности	α_2	Наличие наследственных болезней, характеристика места жительства с экологической точки зрения и т.п.
3	Национальность	α_3	
4	Тип нервной системы	Нормотоники, пимпатоники, парасимпатоники α_4	Оптимизация физической трудоспособности индивидов с разным типом автономной нервной системы
5	Цвет радужной оболочки глаза	α_5	

Таблица 2. - Квазипостоянные биометрические параметры, которые характеризуют ПС человека

№ п/п	Наименование	Значение (индекс)	Примечания
1	Место жительства	β_1	
2	Вид деятельности	β_2	
3	Материальное состояние	β_3	
4	Семейное положение	β_4	
5	Наличие детей	β_5	
6	Размеры глаза, нормальные для данного индивида	β_6	
7	Размеры зрачка, нормальные для данного индивида	β_7	
8	Комфортность условий труда	β_8	

Таблица 3. - Непрерывно меняющиеся биометрические параметры, которые характеризуют ПС человека

№ п/п	Наименование	Значение (индекс)	Примечания
1	Возраст	γ_1	
2	Наличие заболеваний	γ_2	Острые, хронические, наследственные, приобретенные в результате несчастных случаев экологической ситуации, вредных привычек и т.п.
3	Вид трудовой деятельности	γ_3	
4	Наличие вредных привычек	γ_4	
5	Сложность конкретной задачи	γ_5	

По поводу диапазона можно сказать следующее. Для каждого конкретного случая (производственной ситуации, уровня общественной организации, климата, времени года и т.п.) диапазон допустимых изменений тех или иных параметров будет различным. Сказать это означает, по-сути, не сказать ничего. Поэтому целесообразным представляются предварительные эксплуатационные испытания всей системы ЧМС и занесение полученной биометрической информации в память системы. Сама система при этом должна быть адаптивной, то есть иметь возможность «настраиваться» на данную ситуацию, гибко перерассчитывая диапазоны допустимых изменений контролируемых параметров с учетом изменений во внутренней и внешней средах системы ЧМС, корректируя диапазоны допустимых изменений информативных параметров во всех трех группах.

На рис. 1. Представлена модель функционирования системы ЧМС с учетом внешних и внутренних контролирующе-управляющих воздействий и потоков вещества и энергии. Здесь входные и выходные управляющие воздействия вырабатываются электронной системой контроля ПС человека с учетом данных о функционировании системы ЧМС.

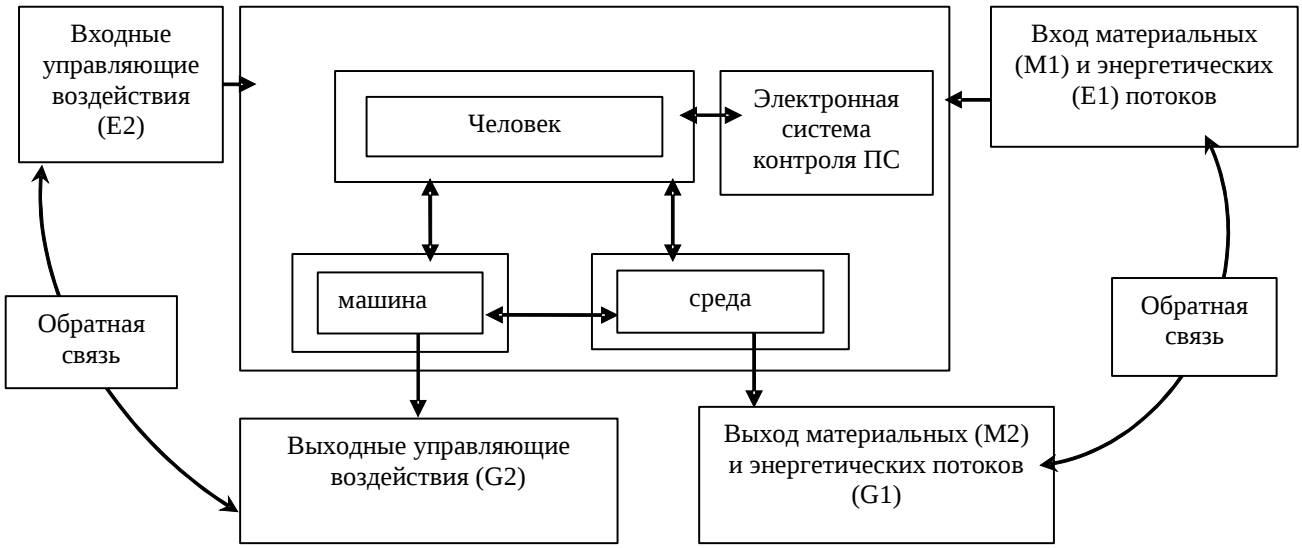


Рис. 1. Модель функционирования ЧМС

Работа такой системы может быть описана с помощью **математической модели:**

$$E_1[a] + E_2[b] + E_3[t] = F\{G_1[c] + G_2[d] + G_3[t]\},$$

где E_1 , E_2 , G_1 , G_2 – функционалы, характеризующие интенсивность информационно-управляющих и материально-энергетических потоков на входе и выходе системы ЧМС соответственно; матрицы $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$ – содержат переменные параметры, характеризующие все влияющие факторы;$E_3[t]$ и $G_3[t]$ – стохастические функции, отображающие стохастический характер входных и выходных потоков; F – динамический коэффициент функциональной корреляционной связи между входом и выходом системы ЧМС, величина которого характеризует устойчивость функционирования системы в целом. Величина F определяется в результате опытно-промышленных испытаний системы и служит интегральным параметром, характеризующим устойчивость ее функционирования.

Выводы.

1. Сформулирована математическая модель системы контроля состояния системы ЧМС.

2. Предложен набор информативных параметров системы дистанционного контроля ПС человека.

3. Направлением дальнейших исследований представляется развитие представлений о наборе информативных параметров предложенной системы, разработка аналитического аппарата для максимальной корреляции значений энтропии системы ЧМС с уровнем надежности ее функционирования и создание прикладного программного обеспечения для его реализации.

Список литературы: 1. *Татарченко Н. В.* Биометрическая идентификация в интегрированных системах безопасности / Н. В. Татарченко, С. В. Тимошенко // Специальная техника. – 2002. - №2. – С. 2-7. **2.** *Тарасов Ю.* Контрольно-пропускной режим на предприятии. Защита информации // Конфидент. – 2002. – № 1. – С. 55-61. **3.** *Барсуков В. С.* Биоключ - путь к безопасности // Специальная техника. – 2003. - №3. – С. 26-35. **4.** *Татарченко И. В.* Концепция интеграции унифицированных систем безопасности / И. В. Татарченко, Д. С. Соловьев // Системы безопасности. – 2009. – № 1 (73). – С. 86-89. **5.** *Блум Ф.* Мозг, разум и поведение / Ф. Блум, А. Лейзерсон, Л. Хофстедтер. – М.: Мир, 1988. – 248с. **6.** *Лысенко О.В.* Системно-синергетический подход в медицинских исследованиях / *О. В. Лысенко, В. М. Лысенко* // Актуальні питання теоретичної медицини. Актуальні питання клінічної медицини: матеріали науково-практичних конференцій студентів, молодих вчених, лікарів та викладачів, Суми, 20-22 квітня 2011 року / Відп. за вип. Л.Н. Приступа. — Суми: СумДУ, 2011. — Ч.1. — С. 89. **7.** *Маренко В.А.* Информационно-синергетический подход к анализу медицинских данных / *В. А. Маренко* // Медицинская информатика. – 2009. - №2(20). – С. 33-40. **8.** *Хакен Г.* Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах / *Г. Хакен*. – М.: Мир, 1985 - 419 с. **9.** *Хакен Г.* Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / *Г. Хакен*. - Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. - 320 с. **10.** Николис Г., Пригожин И. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. - М.: Мир, 1990. – 344 с. **11.** Научно-технический отчет по НИР «Создание системы дистанционного бесконтактного сканирования и идентификации психофизиологического состояния человека» в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы», Государственный контракт от 23 июня 2005 г. № 02.435.11.6002. Элсис, СПб, 2006.

Bibliography (transliterated): 1. Tatarchenko N.V., Timoshenko S.V. Biometricheskaya identificatsiya v integrirovannuh systemah bezopasnosti // Specialnaya tehnika 2 (2002): 2-7. **2.** Tarasov Yu. Kontrolno-propusknoy rigim na predpriatii. Zaschita informatsii // Confident, № 1 (2002): 55-61. **3.** Barsukov V.S., Bioklyuch – kl`uch k bezopasnosti // Special`naya tehnika 3 (2003): 26-35. **4.** Tatarchenko I.V., Soloviev D.S.Konceptiya integratsii unifitsirovannyh system bezopasnosti // Sistemy bezopasnosti 1 (73): 86-89. **5.** F. Blum, A. Leiserson, Hofstedter L. Mozg, razum I povedenie. – M .: Mir, 1988 – 248p. **6.** Lysenko O.V., Lysenko V.M. Systemno-synergeticheskiy podhod v medicinskih issledovaniyah // Aktual`ni putannya teoretychnoy mediciny 1 (2011): p.89. **7.** Marenko V.A. Informatsionno-synergeticheskiy podhod k analizu meditsinskih dannyh. - Meditsinskaya Informatika, 2 (2009): 33-40. **8.** G. Haken Synergetika: Ierarhiya neustoychevostey v samoorganizyyushihsya sistemah / G. Haken. – M.: Mir, 1985 – 419p. **9.** Haken G. Tayny prirody. Synergetika: uchenie o vzaimodeystvii / G. Haken.- Moskva-Izhevsk: Institut komp`yuternyh issledovaniy, 2003. – 320p. **10.** Nikolis G., Prigogine I. Poznanie slognogo / G. Nikolis, I. Prigogine. - M .: Mir, 1990. – 334p. **11.** Scientific and technical research report on "Establishment of the remote non-contact scanning and identification of psychophysiological state of the person" within the State program "Research and development on priority directions of science and technology" for 2002-2006 "State contract on June 23, 2005 № 02.435 .11.6002. Elsys, St. Petersburg, 2006.

Поступила (received) 07.09.2015

Теоретические вопросы автоматизированного электропривода

УДК 681.5:62-83

С. М. ПЕРЕСАДА, д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ»;
В. О. БЛАГОДІР, асп. НТУУ «КПІ»

БЕЗДАВАЧЕВЕ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ: КОРОТКИЙ АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Вступ. Використання асинхронного двигуна з фазним ротором, що включений по схемі машини подвійного живлення (МПЖ) дозволяє досягти високої ефективності електромеханічного перетворення енергії в системах, де діапазон регулювання кутової швидкості складає ± (20 – 30) % відносно номінальної [1]. До таких систем відносяться вітрові турбіни, дизель-генератори, насоси, вентилятори, компресори, рольганги, підйомно-транспортні механізми та інші потужні установки.

Існує тенденція побудови систем на основі МПЖ без використання давачів механічних координат, оскільки фізичні давачі мають недоліки, такі як обмежена чутливість, похибки вимірювання та низька завадостійкість через наявність кабелю між давачем і контролером, що може погіршити показники якості керування, а деякі величини в машині взагалі є невимірними. Використання спостерігачів дозволяє відмовитися від встановлення давачів швидкості або підвищити їх точність, а також оцінювати невимірювані змінні з достатньою для досягнення цілей керування точністю.

Постановка задачі. За останні 25 років [2] в літературі з'явився масив алгоритмів керування МПЖ без використання давачів механічних координат (кутового положення та швидкості ротора), що потребує класифікації та виокремлення основних напрямків розвитку для вибору найбільш перспективних для подальших досліджень.

Матеріали дослідження. В умовах стандартних припущень математична модель МПЖ у векторно-матричній формі в системі координат, що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k , має вигляд [1]

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + \dot{\psi}_1 + \omega_k J \psi_1, \\ u_2 &= R_2 i_2 + \dot{\psi}_2 + (\omega_k - \omega) J \psi_2, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_1 i_1 + L_m i_2, \\ \psi_2 &= L_2 i_2 + L_m i_1, \end{aligned} \tag{2}$$

де u_1 , u_2 – вектори напруги статора і ротора; i_1 , i_2 – вектори струму статора і ротора; ψ_1 , ψ_2 – вектори потокозчеплень статора і ротора; R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно; L_m – індуктивність контуру намагнічування; ω – кутова швидкість ротора; $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – косиметрична матриця.

Рівняння динаміки механічної частини системи та електромагнітного моменту МПЖ мають вигляд

$$\begin{aligned} M &= L_m i_1^T J i_2, \\ \dot{\omega} &= (M - M_c)/J \\ \dot{\varepsilon} &= \omega, \end{aligned} \tag{3}$$

де ε – кутове положення ротора; M_c – момент навантаження; J – момент інерції.

Представлені в світовій літературі алгоритми оцінювання кутової швидкості МПЖ використовують математичну модель електромеханічних процесів, що проходять в електричній машині. В більшості випадків разом з розрахунком оцінки кутової швидкості ротора в алгоритмах виконується розрахунок модуля і кутового положення вектора потокозчеплення статора або ротора. Основними відмінностями в існуючих алгоритмах є точність розрахунку положення (швидкості) ротора, чутливість до зміни параметрів, що входять в математичну модель спостерігача, особливості роботи в певних областях механічної характеристики асинхронного двигуна та в певних режимах роботи електромережі. Існуючі підходи до оцінювання кутової швидкості (положення) ротора МПЖ можна поділити на основні три групи: розімкнені алгоритми, адаптивні методи та методи з введенням високочастотних сигналів.

Розімкнені алгоритми. Перші роботи, що присвячені бездавачевому керуванню МПЖ ґрунтуються на розімкнутих алгоритмах. При такому підході кутове положення ротора отримують шляхом порівняння виміряного і розрахованого струму ротора [3]. З першого рівняння струм ротора розраховують в системі координат статора (a-b) використовуючи значення потокозчеплення та струму статора

$$\hat{i}_2^{a-b} = \frac{\psi_1^{a-b} - L_1 i_1^{a-b}}{L_m}, \tag{4}$$

де $\hat{i}_2^{a-b}$ – оцінений вектор струму ротора в системі координат статора; i_1^{a-b} – виміряний вектор струму статора; $\psi_1^{a-b} = (\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – розрахований вектор потокозчеплення статора.

Компоненти вектора потокозчеплення статора розраховують наступним чином

$$\begin{aligned} \psi_{1a} &= U_1/\omega_1, \\ \psi_{1b} &= 0, \end{aligned} \tag{5}$$

де U_1 , ω_1 – амплітуда та кутова частота напруги статора.

© С. М. Пересада, В. О. Благодір, 2015

В свою чергу виміряний струм ротора використовуючи оцінене значення кутового положення ротора перетворюється з системи координат ротора (dr-qr) в систему координат статора (a-b)

$$i_2^{(a-b)}=e^{-J\hat{\varepsilon}_s}i_2^{(dr-qr)},\quad i_2^{(a-b)}=e^{-J\hat{\varepsilon}_s}i_2^{(dr-qr)},$$
$$\hat{\varepsilon}_s=\varepsilon_1-\hat{\varepsilon},\qquad \hat{\epsilon}_s=\epsilon_1-\hat{\epsilon}, \tag{6}$$

де $i_2^{(a-b)}=(i_{2dr},i_{2qr})$ – виміряний вектор струму ротора; $i_2^{(a-b)}$ – вектор струму ротора в системі координат статора; $\hat{\varepsilon}_s$ – оцінене значення кута ковзання; $\hat{\varepsilon}$ – оцінене значення кутового положення ротора; ε_1 – кут, що визначає просторове положення вектора напруги статора.

Оцінене значення кута ковзання розраховується у вигляді

$$\hat{\varepsilon}_s=ctg\left(\frac{i_{2qr}}{i_{2dr}}\right)-ctg\left(\frac{\hat{i}_{2a}}{\hat{i}_{2b}}\right). \tag{7}$$

Оцінене значення кутового положення ротора $\hat{\varepsilon}$ визначається відповідно до виразу

$$\hat{\varepsilon}=\varepsilon_1-\hat{\varepsilon}_s. \tag{8}$$

В роботі [4] запропоновано розімкнений алгоритм, дія якого ґрунтується на отриманому з рівнянь динаміки кіл ротора і статора значенні струму намагнічування, однак в роботі представлено тільки результати математичного моделювання. В [5] запропоновано бездавачевий алгоритм, що ґрунтується на використанні потокозчепленні ротора, яке отримано шляхом інтегруванні електрорушійної сили роторного кола. Такий алгоритм при роботі на швидкостях близьких до синхронної має низьку точність, оскільки частота напруги ротора близька до нуля.

Серед недоліків розімкнених методів можна виділити те, що кутова швидкість отримується шляхом диференціювання оціненого кута ковзання, що може призводити до підсилення високочастотного шуму в сигналі.

Адаптивні методи. Адаптивні спостерігачі Model Reference Adaptive System (MRAS) вперше запропоновані для бездавачевого керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором в [6], де наведена процедура синтезу та модель в малих сигналах (small-signal model). Більшість адаптивних спостерігачів MRAS, які представлені в літературі, ґрунтуються на оцінюванні потокозчеплення ротора.

В загальному випадку адаптивний спостерігач містить дві моделі [6]: задану та адаптивну. Оцінена швидкість і положення ротора використовується для налаштування адаптивної моделі, компенсуючи похибку оцінювання ε_m. Ця похибка часто розраховується шляхом перемноження компонент заданого $x=(x_d,x_q)^T$ та оціненого $\hat{x}=(\hat{x}_d,\hat{x}_q)^T$ векторів

$$\varepsilon_m=x\otimes\hat{x}=\hat{x}_d x_q-x_d\hat{x}_q=|x||\hat{x}|\sin(\alpha), \tag{9}$$

де α – кут між векторами $(x,\hat{x})$.

В [7] представлено модель в малих сигналах та процедуру синтезу спостерігача кутової швидкості ротора, що включає наступну задану і адаптивну моделі ($x=\psi_1^{(a-b)}$)

$$\psi_1^{(a-b)}=\int u_1^{(a-b)}-Ri_1^{(a-b)}dt,$$
$$\hat{\psi}_1^{(a-b)}=L_1 i_1^{(a-b)}+L_m i_2^{(dr-qr)}e^{J\hat{\epsilon}}, \tag{10}$$

де $\hat{\epsilon}$ – оцінене значення кутового положення ротора, що використовується для зведення похибки оцінювання ε_m в нуль за допомогою ПІ регулятора.

При такому способі оцінювання потокозчеплення, який відомий в літературі як SFMO, можлива втрата стійкості системи при нульових намагнічуючих струмах ротора, що може виникати, наприклад, у вітрогенераторах, що працюють на мережу.

В [8] представлено позбавлений недоліків попереднього спостерігача SFMO спостерігач RCMO, що використовує для компенсації похибки оцінювання ε_m струми ротора. В якості заданого вектора використовується виміряний струм ротора $x=i_2^{(dr-qr)}$, а оцінений вектор струму ротора ($\hat{x}=\hat{i}_2^{(dr-qr)}$) розраховується як

$$\hat{i}_2^{(dr-qr)}=\frac{1}{L_m}\left(\hat{\psi}_1^{(a-b)}-L_1 i_1^{(a-b)}\right)e^{-J\hat{\varepsilon}}. \tag{11}$$

Детальний аналіз такого спостерігача проведено в [9], де представлено методологію підключення МПЖ до мережі, модель в малих сигналах та алгоритм керування для початку оцінювання швидкості при ненульових початкових умовах (при роботі МПЖ).

В [10] пропонується модифікувати функції розрахунку похибки оцінювання (9) виключивши нелінійну функцію s*in*(α) наступним чином

$$\epsilon_m=ctg\left(\frac{\hat{i}_2^{(dr-qr)}\otimes i_2^{(dr-qr)}}{\hat{i}_2^{(dr-qr)}\cdot i_2^{(dr-qr)}}\right), \tag{12}$$

де $\hat{i}_2^{(dr-qr)}\otimes i_2^{(dr-qr)}$ – векторний добуток між виміряним $i_2^{(dr-qr)}$ і оціненим за допомогою спостерігача Лютенберга струмом ротора $\hat{i}_2^{(dr-qr)}$ [10].

Використання виразу (12) як нормованої похибки дозволяє отримати лінійну залежність похибки

пропорційної куту між векторами $i_2^{(dr-qr)}$ та $\hat{i}_2^{(dr-qr)}$, що спрощує синтез ПІ регулятора та покращує динамічну поведінку.

Якість оцінювання за допомогою представлених у літературі спостерігачів MRAS суттєво залежить від коректних значень індуктивностей МПЖ. При роботі МПЖ в генераторному режимі на мережу амплітуда напруги статора може змінюватися в межах ±10 від номінального значення, змінюючи рівень насичення магнітопроводу машини, що призводить до варіації індуктивностей. Для забезпечення спостереження кутового положення в цих режимах в [11] запропоновано алгоритм ідентифікації індуктивності статорного кола МПЖ, який ґрунтується на умові рівності амплітудних значень виміряного і оціненого струму ротора при правильній ідентифікації параметрів машини. В [11] наведено результати експериментального тестування розробленого алгоритму ідентифікації, які показуються, що при коректно спроектованому алгоритмі можлива компенсація варіації індуктивності статорного кола.

Інший підхід до синтезу спостерігачів MRAS, який представлено в [12], відомий як спостерігач TNMO. За умови, що система векторного керування орієнтована за потокозчепленням статора, компоненти заданого вектора $\left(x=i_2^{(d-q)}\right)$ спостерігача MRAS запишуться у вигляді

$$i_{2q}=\frac{L_1}{L_m}\frac{|\psi_1^{(a-b)}\otimes i_1^{(a-b)}|}{|\psi_1^{(a-b)}|}=\frac{L_1}{L_m}\frac{M}{|\psi_1^{(a-b)}|},$$
$$i_{2d}=sign(i_{2d}^*)\sqrt{|i_2^{(dr-qr)}|-i_{2q}^2}, \tag{13}$$

де i_{2q}, i_{2d} – моментна і потокова складова струму ротора; i_{2d}^* – завдання струму ротора i_{2d}.

Оцінений вектор струму ротора ($\left(\hat{x}=\hat{i}_2^{(d-q)}\right)$) розраховується як

$$\hat{i}_2^{(d-q)}=i_2^{(dr-qr)}e^{-J(\varepsilon_0-\hat{\varepsilon})}, \tag{14}$$

де ε_0 – кутове положення системи координат (*d-q*).

Головна перевага спостерігача TNMO [12] полягає в тому, що сигнали (15) можуть бути використані як сигнали зворотного зв'язку для системи керування, що дозволяє підвищити швидкодію та покращити стійкість всієї системи.

Алгоритм бездавачевого керування з використанням PLL запропоновано в [13]. Принцип роботи спостерігача PLL схожий до MRAS, оскільки похибка (9) дорівнює нулю коли відсутній фазовий здвиг між заданим вектором і вектором, що спостерігається. Однак, в [13] відсутня інформація стосовно процедури синтезу ПІ регулятора і смуги пропускання спостерігача кутового положення ротора.

В [14] представлено спостерігач, що схожий до RCMO [8], в якому ПІ регулятор замінено на гістерезисний. Такий спостерігач має кращу якість оцінювання в системах де обмежена інформація про об'єкт регулювання, оскільки синтез гістерезисного регулятора потребує меншої кількості інформації. Однак гістерезисний регулятор формує на виході сигнал зі змінною частотою, тому необхідна деяка інформація про об'єкт керування щоб обмежити діапазон зміни частоти.

Спостерігач, що використовує активну та реактивну потужності в повітряному зазорі МПЖ, запропоновано в [15]. Спостерігач є дещо схожим на спостерігач TNMO [12], оскільки моментна та потокова компоненти струму ротора розраховуються в координатах ротора (dr-qr) без використання оціненого кутового положення ротора. За умови, що система векторного керування орієнтована за потокозчепленням статора, компоненти оціненого вектора $\left(\hat{x}=\hat{i}_2^{(d-q)}\right)$ спостерігача MRAS запишуться

$$i_{2d}=\frac{P}{|u_1-R_1 i_1|},$$
$$i_{2q}=\frac{Q}{|u_1-R_1 i_1|}, \tag{16}$$

де *P*, *Q* – активна та реактивна потужності, що передаються через повітряний зазор.

Головною перевагою цього спостерігача є те, що для його роботи непотрібна інформація про вектор потокозчеплення статора. Одна для розрахунку *P* та *Q* потрібно оцінювати втрати в магнітопроводі та магнітну реактивну потужність, що може викликати похибки оцінювання кутового положення ротора при роботі МПЖ з малим навантаженням.

Методи з введенням високочастотних сигналів. МПЖ можна розглядати як обертовий трансформатор, в якому положення між обмотками статора і ротора змінюється при обертанні ротора. Якщо в ротор машини ввести високочастотний сигнал, то відповідний сигнал в статорі буде містити інформацію про положення ротора. Вперше для МПЖ метод оцінювання кутового положення ротора шляхом введення високочастотного сигналу High Frequency Signal Injection (HFI) запропоновано в [16]. Кутова швидкість ротора розраховується як

$$\omega=p(\omega_1-\omega_2)=2\pi\, p(f_1-f_2)\quad \omega=p(\omega_1-\omega_2)=2\%ipip(f_1-f_2), \tag{17}$$

де *p* – кількість пар полюсів; f_1, f_2 – частота введеного сигналу в напрузі статора та ротора.

В [17] представлено процедуру синтезу спостерігача HFI, а також результати математичного моделювання та експериментальних досліджень, які свідчать про достатню точність оцінювання кутового положення ротора навіть при роботі на синхронній швидкості та коротких замиканнях в мережі. В [18] в якості високочастотного си-

гналу використовується п’ята гармоніка напруги мережі живлення, яка завжди присутня в електричних мережах. Результати тестів в [18] показують, що оцінювання швидкості може відбуватися при амплітуді п’ятої гармоніки 1.6% від амплітуди першої.

Головною перевагою спостерігачів з використанням HFI є те, що вони не потребують інформації про параметри МПЖ, окрім кількості пар полюсів. Однак виникають труднощі з введенням високочастотних сигналів для машин великої потужності.

Висновки. З проведеного аналізу представлених в літературі бездавачевих алгоритмів керування МПЖ можна виділити як найбільш розповсюджені – адаптивні алгоритми зі спостерігачами MRAS та їх різновидами. Адаптивні алгоритми забезпечують високу якість оцінювання кутової швидкості ротора, однак є чутливими до точності параметрів машини і часто потребують ідентифікації параметрів під час роботи. Цього недоліку позбавлені алгоритми з введенням високочастотних сигналів, що дозволяють отримувати кутову швидкість без інформації про параметри МПЖ, однак їх застосування ускладнюється для машин великої потужності. Проведений аналіз свідчить, що відомі методи ґрунтуються на суттєвих припущеннях, мають обмеження у використанні, тому розробка та дослідження бездавачевих алгоритмів керування координатами МПЖ є актуальною науковою задачею.

Список літератури: 1. Leonhard, Werner. Control of Electrical Drives. 3nd ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2001. Print. **2.** Cardenas, R., R. Pena, S. Alepuz, et al. “Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications.” IEEE Trans. on Ind. Electron. 60.7 (2013): 2776–2798. Web. 3. Hopfensperger, B., D.J. Atkinson, and R. A. Lakin. “Stator-Flux-Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine with and without Position Encoder.” Proc. Inst. Electon. Eng.–Electon. Power Appl. 147.4 (2000): 241–250. Web. **4.** Mohammed, O.A., Z. Liu, and S. Liu. “A Novel Sensorless Control Strategy of Doubly Fed Induction Motor and Its Examination with the Physical Modeling of Machines.” IEEE Trans. on Magn. 41.5 (2005): 1852–1855. Web. **5.** Xu, Longya, and Wei Cheng. “Torque and Reactive Power Control of a Doubly Fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme.” IEEE Trans. on Ind. Appl. 31.3 (1995): 636–642. Web. **6.** Schauder, C. “Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers.” IEEE Trans. on Ind. Appl. 28.5 (1992): 1054–1061. Web. **7.** Cardenas, R., R. Pena, J. Proboste, et al. “MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators.” IEEE Trans. on Energy Conv. 20.4 (2005): 710–718. Web. **8.** Pena, R. et al. “Sensorless Control of a Slip Ring Induction Generator Based on Rotor Current MRAS Observer.” Power Electron. Spec. Conf., 2005. 2508–2513. Web. **9.** Pena, R. et al. “Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators Using a Rotor-Current-Based MRAS Observer.” IEEE Trans. on Ind. Elec. 55.1 (2008): 330–339. Web. **10.** Forchetti, D.G., G.O. Garcia, and M.I. Valla. “Adaptive Observer for Sensorless Control of Stand-Alone Doubly Fed Induction Generator.” IEEE Trans. on Industrial Electronics 56.10 (2009): 4174–4180. Web. **11.** Iacchetti, M.F. “Adaptive Tuning of the Stator Inductance in a Rotor-Current-Based MRAS Observer for Sensorless Doubly Fed Induction-Machine Drives.” IEEE Trans. on Ind. Electon. 58.10 (2011): 4683–4692. Web. **12.** Dezza, F.C. et al. “An MRAS Observer for Sensorless DFIM Drives With Direct Estimation of the Torque and Flux Rotor Current Components.” IEEE Trans. on Power Electon. 27.5 (2012): 2576–2584. Web. **13.** Mwinyiwiwa, B. et al. “Rotor Position Phase-Locked Loop for Decoupled Control of DFIG for Wind Power Generation.” IEEE Trans. on Energy Conv. 24.3 (2009): 758–765. Web. **14.** Marques, G.D. et al. “A DFIG Sensorless Rotor-Position Detector Based on a Hysteresis Controller.” IEEE Trans. on Energy Conv. 26.1 (2011): 9–17. Web. **15.** Marques, G.D., and D.M. Sousa. “Air-Gap-Power-Vector-Based Sensorless Method for DFIG Control Without Flux Estimator.” IEEE Trans. on Ind. Electon. 58.10 (2011): 4717–4726. Web. **16.** Georges, S. et al. “A Comparison of Sensorless Speed Estimation for a Doubly Fed Induction Machine.” Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., 2005. p. 9. Web. **17.** Xu, Longya et al. “A New High-Frequency Injection Method for Sensorless Control of Doubly Fed Induction Machines.” IEEE Trans. on Ind. Appl. 48.5 (2012): 1556–1564. Web. **18.** Castelli-Dezza, F., M.F. Iacchetti, and R. Perini. “An Observer for Sensorless DFIM Drives Based on the Natural Fifth Harmonic of the Line Voltage, Without Stator Current Measurement.” IEEE Trans. on Ind. Electron. 60.10 (2013): 4301–4309. Web.

Надійшла (received) 15.07.2015

УДК 621.3.076

Н. Я. ОСТРОВЕРХОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. НТУУ «КПИ», Киев;
В. М. ПЫЖОВ, канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ», Киев

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Введение. Во многих отраслях альтернативу наиболее распространенному асинхронному электроприводу составляет перспективный электропривод на основе вентильно-индукторных двигателей (ВИД) [1]. Основными преимуществами ВИД является дешевизна и простота конструкции с ротором без обмотки; высокая надежность и технологичность; высокий КПД в широком диапазоне изменения скорости; близкий к единице коэффициент мощности; расширенный диапазон управления скоростью в зоне ослабления поля; выделение основных тепловых потерь в статоре, которые легко отводятся.

Существует несколько классов индукторных двигателей, в частности с самовозбуждением (в англоязычной литературе Switched Reluctance Motor (SRM)) и с независимым электромагнитным возбуждением (ВИД НВ). Конструкция и электромеханические свойства этих двигателей несколько отличаются. В работе рассматривается электропривод на основе ВИД НВ, состоящий из пассивного ротора с явно выраженной зубцовой структурой и статора с классической распределенной трехфазной обмоткой, соединенной в «звезду». На статоре дополнительно располагается обмотка возбуждения, которая питается постоянным током. Электромагнитный момент ВИД НВ по своей природе является активным, в отличие от реактивного момента двигателя класса SRM. При определении по паспортным данным параметров схемы замещения ВИД НВ возникают погрешности, обусловленные допущениями в методике вычислений и недостаточностью исходной информации. Во время работы двигателя электрические сопротивления обмоток меняются вследствие нагревания, как и приведенный момент инерции электропривода при изменении кинематики механизма. В результате этих параметрических возмущений расчетные значения параметров электропривода отличаются от реальных, что приводит к ухудшению заданного качества управления.

По своей природе ВИД НВ, как впрочем, и другие типы двигателей переменного тока, является взаимосвязанным нелинейным объектом управления, причем с существенным влиянием вихревых токов. Управление электроприводом в таких условиях требует компенсации негативного влияния этих координатных возмущений.

Решение вышеуказанных проблем электропривода классическими методами теории автоматического управления повышает громоздкость системы вследствие дополнительных алгоритмов идентификации, адаптации или компенсации.

Постановка задачи. Проведенный анализ методов оптимизации законов управления в условиях неопределенности математической модели объекта показал [2], что решение указанных научных задач может быть осуществлено на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий [3-5]. Задачей обратной задачи динамики является нахождение такого закона управления, который обеспечивает наперед заданные (желаемые) динамические и статические свойства системы. В основу метода положена идея обратимости прямого метода Ляпунова по исследованию устойчивости. Это позволяет находить закон управления, при котором замкнутый контур регулирования имеет заранее заданную функцию Ляпунова, в качестве которой выступает мгновенное значение энергии. Полученный закон управления придает замкнутой системе свойство устойчивости в целом, что позволяет решать задачи управления взаимосвязанными объектами, как в линейных системах по математическим моделям локальных контуров. Характерной особенностью оптимизации является достижение не абсолютного минимума функционала качества, как в классических системах, а некоторого минимального значения, что обеспечивает допустимую по техническим требованиям динамическую ошибку системы.

Целью работы является повышение качества управления вентильно-индукторным электроприводом в условиях неопределенности математической модели путем оптимизации законов управления на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий, что обеспечивает слабую чувствительность к параметрическим и координатным возмущениям, а также простоту реализации системы управления.

Материалы исследования. Математическая модель ВИД НВ в системе координат (d-q), ориентированной по магнитной оси ротора, описывается известной нелинейной системой уравнений (1). Как видно, координаты двигателя взаимосвязаны между собой, что обусловливает нелинейность объекта вследствие операций произведения и наличие координатных возмущений. В классических системах управления для компенсации влияния координатных возмущений в локальные контуры управления вводятся дополнительные связи, эффективность которых зависит от точности параметров двигателя. Или разработка законов управления осуществляется после статической декомпозиции объекта (1), что существенно увеличивает громоздкость системы управления.

В данной работе эта задача решается путем динамической декомпозиции [6], которую обеспечивает предложенный метод оптимизации [3]. Для этого исходная система (1) преобразуется в виду (2).

© Н.Я. Островерхов, В.М. Пыжов, 2015

$$\begin{cases} \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{1}{L_s}\left(u_d - R_s i_d + L_m \dfrac{di_f}{dt} - \omega\,\psi_q\right); \\ \dfrac{di_f}{dt} = \dfrac{1}{L_f}\left(u_f - R_f i_f + L_m \dfrac{di_d}{dt}\right); \\ \dfrac{di_q}{dt} = \dfrac{1}{L_s}\left(u_q - R_s i_q + \omega\,\psi_d\right); \\ \dfrac{d\omega_r}{dt} = \dfrac{1}{J}\left(M - M_c\right); \\ \psi_d = L_s i_d + L_m i_f; \\ \psi_f = L_f i_f + L_m i_d; \\ \psi_q = L_s i_q; \\ M = \sqrt{3}\, Z_p \left[\psi_d i_q - \psi_q i_d\right], \end{cases} \tag{1}$$

где i_d , i_q и u_d , u_q – токи и напряжения статора по осям d и q; i_f и u_f – ток и напряжение возбуждения; $\omega = Z_p\omega_r$, ω_r – электрическая и угловая скорость ротора; Z_p – число пар полюсов; J – момент инерции; M , M_c – электромагнитный момент двигателя и момент нагрузки; ψ_d , ψ_q , ψ_f – потокосцепления по осям d, q и обмотки возбуждения; L_s , L_f , L_m – индуктивность фазы, обмотки возбуждения и взаимная индуктивность между ними; R_s , R_f – активные электрические сопротивления обмотки статора и возбуждения.

$$\begin{cases} L_s \dfrac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + F_1; \\ L_f \dfrac{di_f}{dt} + R_f i_f = u_f + F_3; \\ L_s \dfrac{di_q}{dt} + R_s i_q = u_q + F_2; \\ J \dfrac{d\omega_r}{dt} = M - M_c; \\ \psi_d = L_s i_d + L_m i_f; \\ \psi_f = L_f i_f + L_m i_d; \\ \psi_q = L_s i_q; \\ M = \sqrt{3}\, Z_p \left[\psi_d i_q - \psi_q i_d\right], \end{cases} \tag{2}$$

При синтезе системы управления координатные возмущения $F_1 = L_m \dfrac{di_f}{dt} - \omega\,\psi_q$, $F_2 = \omega\,\psi_d$, $F_3 = L_m \dfrac{di_d}{dt}$ трактуются как неопределенные, но ограниченные по величине $F_1 \le F_{1max}$, $F_2 \le F_{2max}$, $F_3 \le F_{3max}$, а уровня управляющих напряжений u_d , u_q , u_f достаточно для их компенсации. В такой постановке проблема задачи управления взаимосвязанным объектом (1) сводится к решению локальных задач управления четырьмя линейными подсистемами (2).

С точки зрения управления ВИД НВ приближается к классическому синхронному двигателю. Рассмотренная выше конструкционная особенность ВИД НВ позволяет применить для регулирования координат электропривода систему прямого векторного управления с ориентацией по положению ротора.

Система управления в соответствии с первыми четырьмя дифференциальными уравнениями (2) состоит из контуров регулирования тока статора i_d по оси d, тока статора i_q по оси q, тока возбуждения i_f , а также контура угловой скорости двигателя ω_r . Контур регулирования скорости является внешним по отношению к локальному контуру тока i_q . Значение тока i_q определяет величину электромагнитного момента двигателя. Магнитный поток от тока i_d может как подмагничивать так и размагничивать основной поток от обмотки возбуждение. Обычно задание этого тока устанавливается равным нулю, однако при сверхвысоких скоростях в зоне ослабления поля его отрицательное значение хотя и приводит к увеличению потерь, однако позволяет обеспечить необходимую мощность двигателя при меньшем напряжении. Благодаря управлению током возбуждения диапазон ослабления поля может достигать 1:8 и выше, что значительно расширяет зону управления скоростью с постоянной мощностью по сравнению с асинхронным электроприводом.

Объект локального контура управления током статора i_d согласно первому уравнению системы (2)

$$L_s \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + F_1 , \tag{3}$$

описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка, на который действует управляющее напряжение u_d и возмущения F_1 . Желаемое уравнение замкнутого контура тока, с помощью которого устанав-

ливаются необходимые показатели качества управления, также задается дифференциальным уравнением первого порядка [4,5]

$$\dot{z}+\alpha_{0i_d} z=\alpha_{0i_d} i_d^*, \tag{4}$$

где i_d^* – заданный ток. Форма уравнения (4) обеспечивает астатизм первого порядка по задающему воздействию и монотонный (без перерегулирования) вид переходного процесса тока. Требуемое время регулирования, равное $t_n \approx 3/\alpha_{0i_d}$, задается величиной единственного коэффициента уравнения α_{0i_d}.

Степень приближения реального процесса управления током к желаемому оценивается функционалом, который характеризует нормированную по индуктивности мгновенную энергию магнитного поля от первой производной тока

$$G(u_d)=\frac{1}{2}\left[z(t)-\dot{i}_d(t)\right]^2. \tag{5}$$

Минимизация функционала осуществляется по градиентному закону первого порядка

$$\frac{du_d(t)}{dt}=-\lambda_{i_d}\frac{dG(u_d)}{du_d}, \tag{6}$$

где λ_{i_d} – константа.

После подстановки (3), (5) в (6) получается закон управления током i_d

$$\dot{u}_d(t)=k_{i_d}(z-\dot{i}_d), \tag{7}$$

где $k_{i_d}=\lambda_{i_d}/L_s$ – коэффициент усиления регулятора тока.

Необходимое условие сходимости процесса минимизации функционала при $t\to\infty$

$$\begin{gathered}\frac{dG(u_d)}{dt}<0;\\ G(u_d)\to 0\end{gathered} \tag{8}$$

выполняется согласно правилу знаков

$$sign(k_{i_d})=sign(1/L_s) \tag{9}$$

Переменная ż в законе управления (7) выступает в роли требуемого значения производной тока, которое определяется в реальном времени с помощью уравнения (4) путем замыкания системы обратной связью по составляющей тока $z = i_d$

$$z=\alpha_{0i_d}(i_d^*-i_d) \tag{10}$$

После интегрирования обеих частей уравнения (7) при нулевых начальных условиях с учетом (10) закон управления составляющей тока i_d принимает окончательный вид

$$\begin{gathered}u_d(t)=k_{i_d}(z-i_d);\\ z=\alpha_{0i_d}\int_0^t(i_d^*-i_d)\,dt\end{gathered} \tag{11}$$

Структурная схема регулятора тока i_d, построенная на основании уравнения (11), показана на рис. 1.

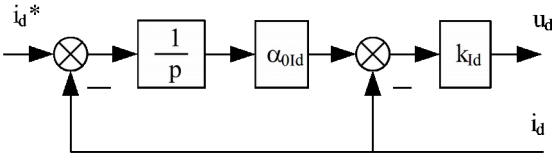


Рис. 1. Структурная схема регулятора тока i_d

Характерной особенностью разработанного регулятора, в отличие от классических, является отсутствие параметров объекта управления (1). Регулятор содержит только параметр α_{0i_d} желаемого уравнения качества замкнутой системы (4).

Таким образом, для разработки законов управления регуляторов электропривода с помощью представленной методики не требуется детальная математическая модель объекта управления с точными значениями параметров. Достаточно иметь только структурную модель объекта, например вид дифференциального уравнения.

Свойства полученной замкнутой системы регулирования тока можно оценить аналитическим путем. Дифференциальное уравнение реального контура управления током, полученное после подстановки закона управления (11) в уравнение объекта управления (3)

$$\ddot{i}_d+\left(\frac{R_s}{L_s}+\frac{k_{i_d}}{L_s}\right)\dot{i}_d+\left(k_{i_d}\frac{\alpha_{0i_d}}{L_s}\right)i_d=\left(k_{i_d}\frac{\alpha_{0i_d}}{L_s}\right)i_d^*, \tag{12}$$

показывает, что процесс управления является асимптотически устойчивым. В соответствии с критерием устойчивости Гурвица коэффициенты уравнения (12) является положительными $(k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s)>0$, $(R_s/L_s+k_{i_d}/L_s)>0$.

Важно, что устойчивость контура управления сохраняется даже при неограниченном повышении коэффициента $k_{i_d} \to \infty$ и обеспечивает полное совпадение реального (12) и желаемого (4) процессов управления. Это очевидно при делении всех членов уравнения (12) на коэффициент k_{i_d}/L_s при условии $k_{i_d} \to \infty$

$$\frac{L_s}{k_{i_d}} \ddot{i}_d + \left(\frac{R_s}{k_{i_d}} + 1\right) \dot{i}_d + \alpha_{0i_d} i_d = \alpha_{0i_d} i_d^* \tag{13}$$

Эта особенность обеспечивает динамическую декомпозицию системы (1) и робастность к параметрическим возмущениям [3,6]. Во время работы взаимосвязанная система распадается на относительно независимые локальные контуры управления, процессы в которых протекают по траекториям, назначенным уравнениями желаемого качества вида (4). Конечно, при допустимом с точки зрения технической реализации коэффициенте усиления регулятора существует динамическая ошибка, допустимая величина которой устанавливается техническими требованиями к показателям качества управления.

Передаточная функция разомкнутого контура тока, полученная на основе уравнения (12),

$$W_r(p) = \frac{i_d(p)}{i_d^*(p)} = \frac{k_{id}\alpha_{0id}/L_s}{p\left[p + (R_s/L_s + k_{id}/L_s)\right]} \tag{14}$$

показывает, что реальная система управления током обладает заданным астатизмом первого порядка по задающему воздействию, то есть отработка скачка задания осуществляется без статической погрешности.

Согласно (14) добротность по скорости системы управления током

$$D_\omega = \frac{k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s}{\frac{R_s}{L_s} + \frac{k_{i_d}}{L_s}} = \frac{\alpha_{0i_d}}{\frac{R_s}{k_{i_d}} + 1} \tag{15}$$

с увеличением коэффициента усиления регулятора k_{i_d} приближается к заданной уравнением (4) желаемой добротности $D_\omega^z = \alpha_{0i_d}$. Это обеспечивает допустимую динамическую ошибку управления током.

При разработке закона управления током не учитывалась некомпенсированная малая постоянная времени силового преобразователя частоты T_μ, что находится в контуре. Оценка влияния этой неучтенной инерционности в виде апериодического звена первого порядка на динамические свойства контура тока осуществлено с помощью дифференциального уравнения третьего порядка замкнутой системы, полученного аналогично (12)

$$T_\mu \dddot{i}_d + \left(1 + T_\mu \frac{R_s}{L_s}\right) \ddot{i}_d + \left(\frac{R_s}{L_s} + \frac{k_{i_d}}{L_s}\right) \dot{i}_d + \left(k_{i_d} \frac{\alpha_{0i_d}}{L_s}\right) i_d = \left(k_{i_d} \frac{\alpha_{0i_d}}{L_s}\right) i_d^* . \tag{16}$$

Согласно критерию Гурвица в данном случае для устойчивости контура тока требуется выполнение следующего условия

$$\left(1 + T_\mu \frac{R_s}{L_s}\right)\left(\frac{R_s}{L_s} + \frac{k_{i_d}}{L_s}\right) > \frac{T_\mu k_{i_d} \alpha_{0i_d}}{L_s} . \tag{17}$$

В результате предельного перехода при $k_{i_d} \to \infty$ окончательное условие устойчивости принимает вид

$$\alpha_{0i_d} < \frac{1}{T_\mu} + \frac{R_s}{L_s} \tag{18}$$

Таким образом, наличие в контуре управления током постоянной времени преобразователя частоты T_μ ограничивает максимальное быстродействие, которое задается величиной коэффициента α_{0i_d}.

На основе второго, третьего и четвертого уравнения системы (2) и желаемого уравнения замкнутого контура вида (4) по аналогичной методике получены законы управления составляющей тока статора i_q

$$\begin{aligned} u_q(t) &= k_{i_q}(z - i_q); \\ z &= \alpha_{0i_q} \int_0^t (i_q^* - i_q)\,dt , \end{aligned} \tag{19}$$

током возбуждения i_f

$$\begin{aligned} u_f(t) &= k_{i_f}(z - i_f); \\ z &= \alpha_{0i_f} \int_0^t (i_f^* - i_f)\,dt . \end{aligned} \tag{20}$$

и угловой скоростью двигателя

$$\begin{aligned} i_q^*(t) &= k_\omega(z - \omega); \\ z &= \alpha_{0\omega} \int (\omega^* - \omega)\,dt . \end{aligned} \tag{21}$$

Полученные законы управления (19)-(21) обладают такими же свойствами, как и закон управления током (11). Для уменьшения влияния динамики внутреннего контура тока i_q на качество управления внешнего контура скорости коэффициенты уравнений (19) и (21) выбираются из условия $\alpha_{0i_q} > (3 \div 5)\alpha_{0\omega}$.

Исследования электропривода с полученными законами управления проведено путем моделирования для

ВИД НВ с такими данными: $P_н$ = 208 кВт – номинальная мощность; $M_н$ = 663 Н·м – номинальный момент; $I_н$ = 458 А – номинальный ток; $n_н$ = 3000 об/мин – номинальная частота вращения. Регуляторы системы управления имеют следующие параметры: регулятор тока i_d : $\alpha_{0\ id}$ = 500, k_{id} = 250; регулятор тока i_q : $\alpha_{0\ iq}$ = 500, k_{iq} = =260; регулятор тока i_f : $\alpha_{0\ if}$ = 50, k_{if} = 250; регулятор скорости $\alpha_{0\omega}$ = 150, k_ω = 50.

На рис. 2 показан график переходного процесса заданной скорости ω^* электропривода при пуске. На рис. 3 представлен график переходного процесса момента двигателя при пуске и набросе скачком на 5 с процесса момента нагрузки, равного номинальному моменту двигателя. После наброса нагрузки момент двигателя в соответствии с теорией электропривода установился на уровне, равном статическому моменту 663 Н·м.

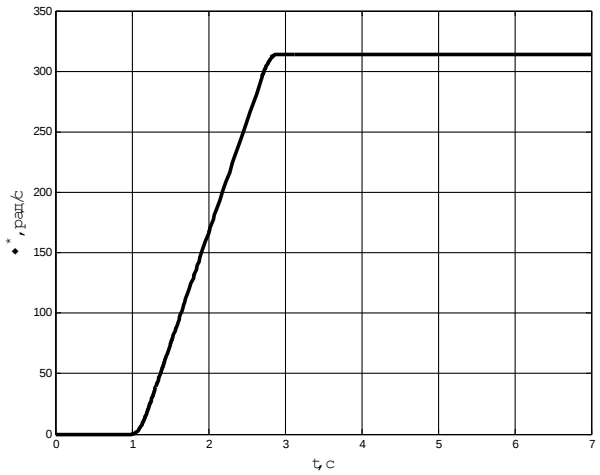


Рис. 2. График переходного процесса заданной скорости

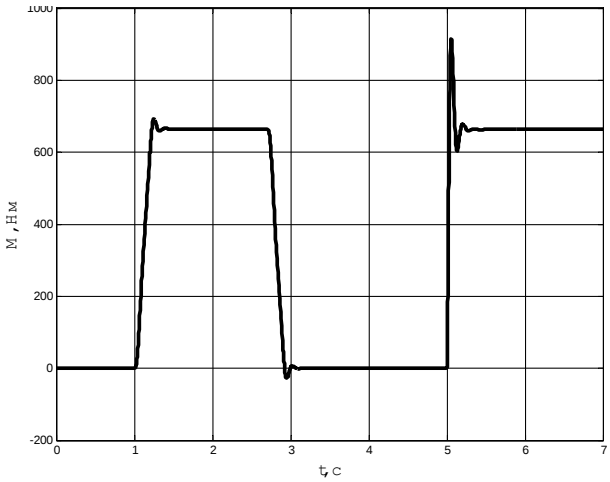


Рис. 3. График переходного процесса момента двигателя

На рис. 4 представлено три графика ошибки отработки заданной скорости при пуске и набросе нагрузки для трех значений электрического сопротивления обмотки статора R_s : 0,0029 Ом (паспортное значение); 0,00145 Ом (вдвое меньше паспортного); 0.0058 Ом (вдвое больше паспортного). Как видно из рисунка, такое значительное параметрическое возмущение существенно не влияет на качество переходных процессов скорости. Три графики практически сливаются между собой. Максимальная динамическая ошибка скорости при пуске не превышает 4 рад/с, а при набросе момента нагрузки составляет 3,3 рад/с. На рис. 5 показано три графика ошибок отработки заданной скорости при пуске и набросе нагрузки для трех значений момента инерции электропривода J: 3,6 кг·м^2 (номинальное значение); 7,2 кг·м^2 (вдвое больше за номинальное); 10,8 кг·м^2 (втрое больше за номинальное). Как видно, существенное увеличение момента инерции, как типового параметрического возмущения электропривода, не приводит к значительной деградации качества переходных процессов. Максимальная динамическая ошибка скорости при пуске увеличивается с 4 до 4,8 рад/с.

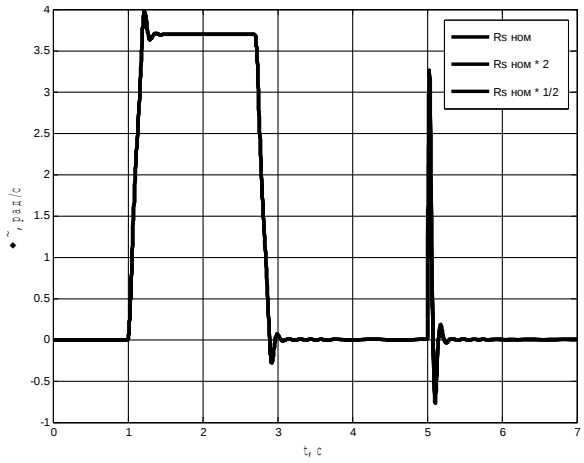


Рис. 4. Графики переходных процессов ошибок отработки заданной скорости при изменении электрического сопротивления обмотки статора

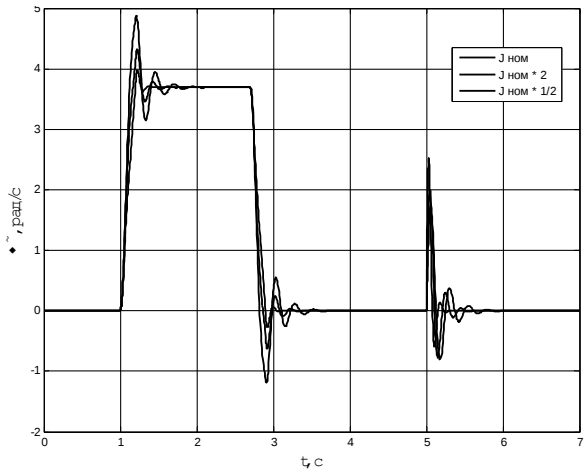


Рис. 5. Графики переходных процессов ошибок отработки заданной скорости при изменении момента инерции электропривода

Выводы. Оптимизация законов управления на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий обеспечивает высокое качество управления координатами вентильно-индукторного электропривода при слабой чувствительности к параметрическим и координатным возмущениям. В основу метода положена идея обратимости прямого метода Ляпунова по исследованию устойчивости. Полученные законы управления придают замкнутым контурам свойство устойчивости в целом, которая сохраняется даже при неограниченном повышении коэффициентов усиления регуляторов, и обеспечивают полное совпадение реальных и желаемых переходных процессов. Метод оптимизации обеспечивает динамическую декомпозицию системы. Во время работы взаимосвязанная система распадается на относительно независимые локальные контуры управления, процессы в которых протекают по траекториям, назначенным уравнениями желаемого качества. Характерной особенностью оптимизации является достижение не абсолютного минимума функционала качества, а некоторого минимального значения, что обеспечивает допустимую по техническим требованиям динамическую ошибку системы. Для разработки законов управления регуляторов не требуется детальная математическая модель объекта управления с точными значениями параметров. Достаточно иметь только структурную модель объекта. Простота реализации системы управления обуславливается отсутствием в законах управления параметров объекта управления и операций дифференцирования.

Список литературы: 1. *Козаченко В.Ф.* Вентильно-индукторный привод – перспективное направление развития современного регулируемого электропривода / *А.М.Русаков, А.В.Сорокин* // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 11. – С. 24-26. **2.** *Потапенко Е.М.* Высокоточное управление неопределенными объектами. Сравнение методов управления / *Е.М.Потапенко, А. Е.Казурова* // Сб. научн. труд. Днепродзержинского гос. техн. универ-та. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 353-356. **3.** *Крутько П.Д.* Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов / *П.Д.Крутько* // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – № 2. – С. 120-140. **4.** *Островерхов Н.Я.* Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий / *Н.Я.Островерхов, Н.П.Бурик* // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2011. – № 1. – С. 41-49. **5.** *Островерхов Н.Я.* Метод синтеза регуляторов электромеханических систем на основании концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий движения / *Н.Я. Островерхов* // Вестник НТУ „ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – № 30. – С. 105-110. **6.** *Черноусько Ф.Л.* Методы управления нелинейными механическими системами / *Ф.Л.Черноусько, И.М.Ананьевский, С.А.Решмин* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kozachenko, V., Rusakov A. and Sorokin A. "Ventilno-induktornyiy privod – perspektivnoe napravlenie razvitiya sovremennogo reguliruemogo elektroprivoda." *Novosti teplosnabzheniya* 11 (2011): 24-26. Print. **2.** Potapenko, E.M. and Kazurova, A.E. "Vyisokotochnoe upravlenie neopredelennyimi ob'ektami. Sravnenie metodov upravleniya." *Sb. nauchn. trud. Dneprodzerzhinskogo gos. texn. univer-ta* (2007): 353-356. Print. **3.** Krut’ko P. D. "Robastno ustoychivyie strukturyi upravlyaemyih sistem vyisokoy dinamicheskoy tochnosti. Algoritmyi i dinamika upravleniya dvizheniem modelnyih ob'ektov.", *Izvestija RAN. TiSU* 2 (2005): 120–140. Print. **4.** Ostroverkhov, N. and Buryk, N. "Upravlenie koordinatami elektroprivodov na osnovanii kontseptsii obratnyih zadach dinamiki pri minimizatsii lokalnyih funktsionalov mgnovennyih znacheniy energiy." *Elektrotehnika i elektroenergetika* 1 (2011): 41-49. Print. **5.** Ostroverkhov, N.J. "Metod sinteza regulyatorov elektromehanicheskih sistem na osnovanii kontseptsii obratnyih zadach dinamiki v soedinenii s minimizatsiey lokalnyih funktsionalov mgnovennyih znacheniy energiy dvizheniya." *Vestnik NTU "KPI"* 30 (2008): 105-100. Print. **6.** Chernous'ko, F.L., I.M. Anan'evskij and S.A. Reshmin. *Metody upravleniia nelineynymi mekhanicheskimi sistemami.* Moscow: Fizmatlit, 2006. Print.

Поступила (received) 03.07.2015

УДК 62-83:628.12

С. О. БУР'ЯН, канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;
М. В. ПЕЧЕНИК, канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;
Д. О. БОДНАР, студ. НТУУ «КПІ»

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВАРІАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕРЕЖІ

Вступ. Сучасна насосна установка (НУ) – це складна електромеханічна система, яка включає електромеханічні та електричні перетворювачі енергії, турбомеханізми, гідравлічну мережу та споживачів. Більшість таких установок на сьогоднішній день включає перетворювач частоти, використання якого дозволяє знизити втрати енергії в системі до 40% при порівнянні з нерегульованим електроприводом.

Основною регульованою координатою на виході насосної установки є тиск (напір). Проте при стабілізації тиску часто не враховуються зміни параметрів гідравлічної мережі, відхилення коефіцієнта корисної дії (ККД) від області максимального значення, коефіцієнтів турбомеханізмів, що описують їх характеристики, реальних графіків водоспоживання та впливу одного насосу на роботу інших. Це приводить до необхідності розробки такої системи, яка б забезпечила підвищення коефіцієнта корисної дії насосу до максимально можливого значення та підтримання тиску на виході установки на заданому рівні. Такий комплексний підхід до оцінки параметрів насосної установки дозволить обґрунтувати вибір його режиму роботи із врахуванням зміни ККД та варіацією параметрів гідравлічної мережі.

Постановка задачі. При вирішенні задач оптимізації роботи насосних установок є три основні складові: визначення функції завдання, побудова оптимальної моделі гідравлічної мережі та визначення її складових. Проаналізовані нижче роботи показують найбільш сучасні способи визначення цих складових. Функцію завдання можливо визначити, як мінімізацію витрат енергії на переміщення води. Вона в основному залежить від ККД насосу та тарифу, за яким розраховується вартість електроенергії. В свою чергу вартість електроенергії залежить від періоду часу. Тому деякі з авторів оптимізують енергоефективність насосних установок за допомогою розробки оптимального графіку роботи та систем, які можна налаштувати на цей графік. В даному випадку розроблена мережа розраховує найбільш ефективні проміжки часу на 24 години кожного дня [1]. Тобто її робота заснована на статистичному аналізі зібраних даних за минулий час (робочий день, вихідний, свято). Також можливий дещо інший принцип побудови оптимальної системи з врахуванням часу [2]. Тут використовується принцип мінімізації вартості енергії, якщо система задовольняє умовам гідромережі. Керуючий пристрій, в якому запрограмовано оптимальний алгоритм, вираховує при кожній зміні параметрів гідромережі або через певні проміжки часу енергетичну ефективність роботи насосу та налаштовується на найбільш вигідний режим для його роботи. Ще один спосіб оптимального керування насосним комплексом, запропонований у [3], побудований на основі оптимального критерію з врахуванням графіків водопостачання та зміни характеристик обладнання при його експлуатації. Оптимальний критерій, який мінімізується, в даному випадку враховує відхилення від заданого значення тиску та втрати потужності в мережі.

Багато робіт, які присвячені підвищенню енергоефективності за рахунок максимізації ККД насосу, не враховують технологічну потребу необхідного тиску, а лише направлені на зменшення споживаної енергії. У такому випадку енергоефективність системи незаперечно збільшується, а технологічні параметри, такі як тиск або його витрати, постійно змінюються. Виходячи з цього, розробка системи керування, що враховуватиме необхідний тиск та забезпечує підвищену енергоефективність є актуальним завданням.

Матеріали дослідження. Основною метою при побудові оптимального регулятора є пошук такої точки статичних характеристик, в якій при певних параметрах гідромережі різниця між заданим і реальним тиском буде мінімально можливою та ККД насосної установки максимально можливим одночасно. Тому при виборі критерію оптимальності необхідно виконати дві умови, які б гарантували виконання поставленої задачі керування: технологічної та енергетичної.

Технологічна складова критерію має забезпечувати мінімізацію різниці заданого та реального напору на виході насосної установки і описується наступним виразом:

$$\Delta H(t) = \left| H^*(t) - H_n(t) \right| , \quad (1)$$

де $H^*(t)$ – задане (необхідне) значення напору на виході насосної установки; $H_п(t)$ – поточне (реальне) значення напору на виході НУ. Вираз (1) взято за модулем для уникнення від'ємного значення неузгодженості напорів, коли реальне значення напору більше за необхідне.

Енергетична складова в свою чергу має зменшити енергетичні втрати системи, що досягається за допомогою підвищення ККД до максимально можливого значення у певній робочій точці. Вираз, що описує енергетичної складову буде мати вигляд

$$\Delta\eta(t) = \eta^*(t) - \eta(t) , \quad (2)$$

де $\eta^*(t)$ – максимальне значення ККД для НУ; $\eta^*(t)$ – поточне значення ККД насосу.

© С.О.Бур'ян, М.В.Печеник, Д.О.Боднар, 2015

Таким чином критерій оптимальності, який задовольняє технологічній та енергетичній складовим, описаним виразами (1) та (2) відповідно, буде мати наступний вигляд:

$$I = \int_0^t (\Delta H(t) + k_r \Delta \eta(t))dt \to min\ , \tag{3}$$

де k_r – вагова константа за ККД насосу. k_r введена для того, щоб відрегулювати вагу необхідного параметру у системі згідно поставленого технічного завдання. Тобто, якщо у технічному завданні пріоритет має енергоефективність системи, то необхідно збільшувати вагову константу, а якщо пріоритетна технологічна складова – зменшувати.

За обраним критерієм оптимальності будується регулятор, який має визначати оптимальну робочу точку для заданого тиску. Тому виходом для цього регулятора має слугувати швидкість, яка задається шляхом зміни частоти обертання привідного асинхронного двигуна, на якій насосна установка буде працювати з максимально можливою енергоефективністю при умові, що різниця між заданим та поточним значеннями тиску будуть мінімізуватись.

Для оцінки заданої швидкості розроблено дві нейронні мережі за допомогою пакету прикладних програм MatLab з редактором нейронних мереж (Network/Data/Manager). Перша нейронна мережа використовується для оцінки мінімального значення оптимального критерію, вхідним її масивом було значення напору H_{min}, при якому мінімізувався критерій оптимальності, а вихідним – масив значень критерію оптимальності I_{min}. Призначення другої нейронної мережі – оцінка необхідної швидкості, вона мала два вхідних навчальних масиви: оцінене значення оптимального критерію $\hat{I}_{min}$, яке отримано з першої нейронної мережі та заданого напору H^*. Вихідним масивом був масив значень $\hat{\omega}^*$ – оціненої заданої швидкості. Для навчання нейронних мереж було виконано моделювання насосної установки при зміні швидкості від номінальної до половини номінальної для різних значень заданого напору. Заданий напір змінювався від 61 м до 16.3 м з кроком 2,5 м. При цьому визначалися мінімальні значення критерію оптимальності та час, при якому це мінімальне значення досягається. Далі в отриманий час визначалися значення швидкості та напору. По отриманим значенням оптимального критерію швидкості та напору складалися навчальні масиви для нейронних мереж. Дана процедура була виконана для різних вагових констант k_r = 1, 2, 4, 6, 10. Графіки, побудовані по навчальним масивам, для першої та другої нейронних мереж представлені на рис. 1 та рис. 2 відповідно.

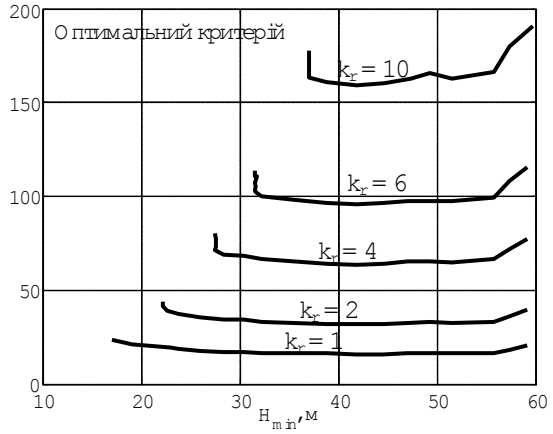


Рис. 1 – Криві навчання нейронної мережі для оцінки оптимального критерію

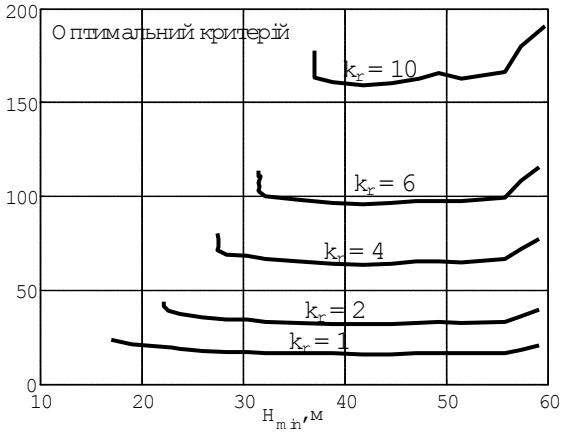


Рис. 2 – Криві навчання нейронної мережі для оцінки заданої швидкості

Після тренувань отримані нейронні мережі для кожної вагової константи використано у математичній моделі електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою.

1. Розглянемо склад та принцип роботи оптимального регулятора. Для його роботи потрібно вимірювати реальне значення тиску H та швидкості ω. На вхід регулятора подається значення тиску, за допомогою якого на основі нейронних мереж оцінюється значення оптимального критерію. Отримане значення критерію та заданого тиску подаються на вхід нейронної мережі для оцінки необхідної заданої швидкості. Оцінена задана швидкість, в свою чергу, порівнюється з реальною швидкістю у системі, після чого реальна швидкість коректується до оціненої заданої за допомогою ПІ регулятора. Отримана швидкість є швидкістю регулювання ω_p та дорівнює оціненій заданій швидкості $\hat{\omega}^*$. Таким чином вираз для ω_p має наступний вигляд:

$$\omega_p = \left[\omega - \hat{\omega}(H^*, H, \hat{I}_{min}(H))\right](K_p + 1/T_i p)\ , \tag{17}$$

де K_p, T_i – коефіцієнти ПІ-регулятора.

Структурна схема електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою з викори-

станням оптимального регулятора представлена на рис. 3.

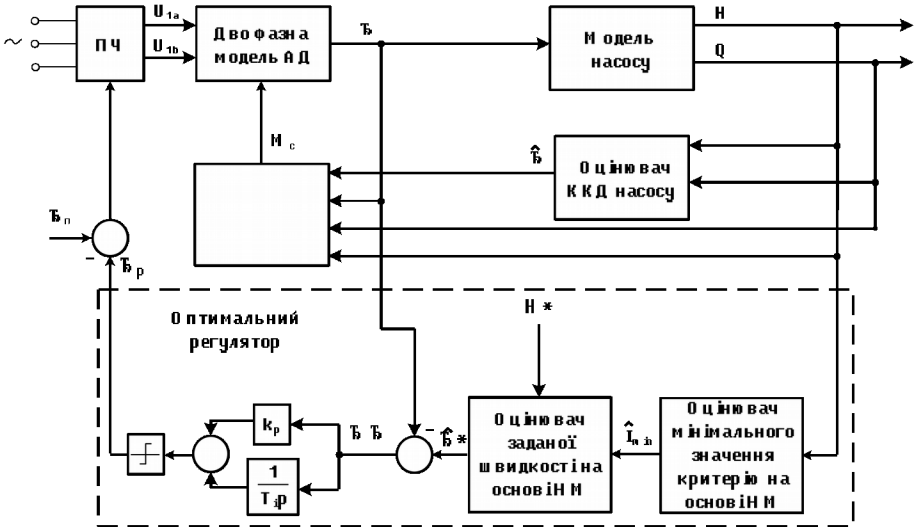


Рис. 3 – Структурна схема оптимальної системи керування насосною установкою

Математична модель одинарної насосної установки описується нелінійним диференційним рівнянням першого порядку

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0н}}{\chi\,\omega_н^2}\omega^2 - \frac{H_{ст}}{\chi} - \frac{1}{\chi}(a_н + a)Q^2, \tag{4}$$

а також рівнянням для визначення напору насосу

$$H = \frac{H_{0н}}{\chi\,\omega_н^2}\omega^2 - a_н Q^2, \tag{5}$$

та моменту навантаження привідного двигуна

$$M_c = \frac{\rho g Q H}{\eta_{нас}\,\omega}, \tag{6}$$

де Q – продуктивність насосу; $H_{0н}$ – напір при нульовій подачі насосу на номінальній швидкості; ω – швидкість обертання насосу; $\omega_н$ – номінальна швидкість обертання насосу; χ – стала інтегрування насосу; $H_{ст}$ – геодезична висота підйому води; $a_н$ – номінальний гідравлічний опір насосу; a – гідравлічний опір мережі; M_c – момент навантаження на валу двигуна насосу; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; $\eta_{нас}$ – ККД насосу; Н – напір насосу; t – час.

Асинхронний двигун описується системою нелінійних диференціальних рівнянь в нерухомій системі координат статора a–b

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta\omega p_n\psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \tag{7}$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta\omega p_n\psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \tag{8}$$

$$d\frac{\psi_{2a}}{dt} = -\alpha\psi_{2a} - \omega p_n\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \tag{9}$$

$$d\frac{\psi_{2b}}{dt} = -\alpha\psi_{2b} + \omega p_n\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \tag{10}$$

$$M = \frac{3}{2}\frac{p_n L_m}{L_2}(\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \tag{11}$$

$$d\frac{\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_c), \tag{12}$$

де $(i_{1a},i_{1b})^T$, $(u_{1a},u_{1b})^T$, $(\psi_{2a},\psi_{2b})^T$ – компоненти векторів струму статора, напруги статора та потокозчеплення ротора; M – електромагнітний момент двигуна; M_c – момент навантаження, що створюється насосом; L_2 – індуктивність ротора; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, p_n – кількість пар полюсів, J – сумарний момент інерції; α, β, σ, γ – додатні константи.

Перетворювач частоти описується наступною системою рівнянь:

$$u_{1a} = u_m\cos\Theta, \tag{13}$$

$$u_{1b} = u_m\sin\Theta, \tag{14}$$

$$\Theta = 2\pi\int_0^t f dt, \tag{15}$$

$$u_m^* = u_0 + (u_m - u_0)(f^*)^2 / f_н^2, \quad (16)$$

де u_m – амплітудне значення напруги; Θ – електричний кут; u_m^* – амплітудне значення заданої напруги; f – частота напруги статора; f^* – задана частота; u_0 – напруга зміщення, $f_н$ – номінальна частота мережі.

Головним недоліком моделі насосної установки, що представлена виразами (4)-(6) є те, що в ній не враховується зміна ККД насосу $\eta_{нас}$, що є справедливим тільки, якщо насос працює з незмінними $H_{ст}$ та а в околі робочої точки з максимальним ККД. Проте зазвичай параметри гідромережі змінні, тому необхідно розробити процедуру врахування зміни ККД насосу із зміною положення робочої точки в площині напірних характеристик. Тому було розроблено уточнену математичну модель, яка враховує зміну ККД системи на основі нейронних мереж. Оцінка ККД відбувається на основі продуктивності та тиску на виході насосного комплексу [4].

Для перевірки працездатності розробленої системи та оцінки її енергоефективності було проведено математичне моделювання у різних режимах роботи. Дослід проводився для плавного закону зміни гідравлічного опору та для різних вагових констант k_r =1, 2, 4, 6, 10. Час моделювання у досліді t =100 с. При цьому значення гідравлічного опору плавно змінювалося у межах від a_{max} = 180560 год^2/м^5 до a_{min} =100510 год^2/м^5. Характер зміни гідравлічного опору та результати досліду представлені на рис. 4.

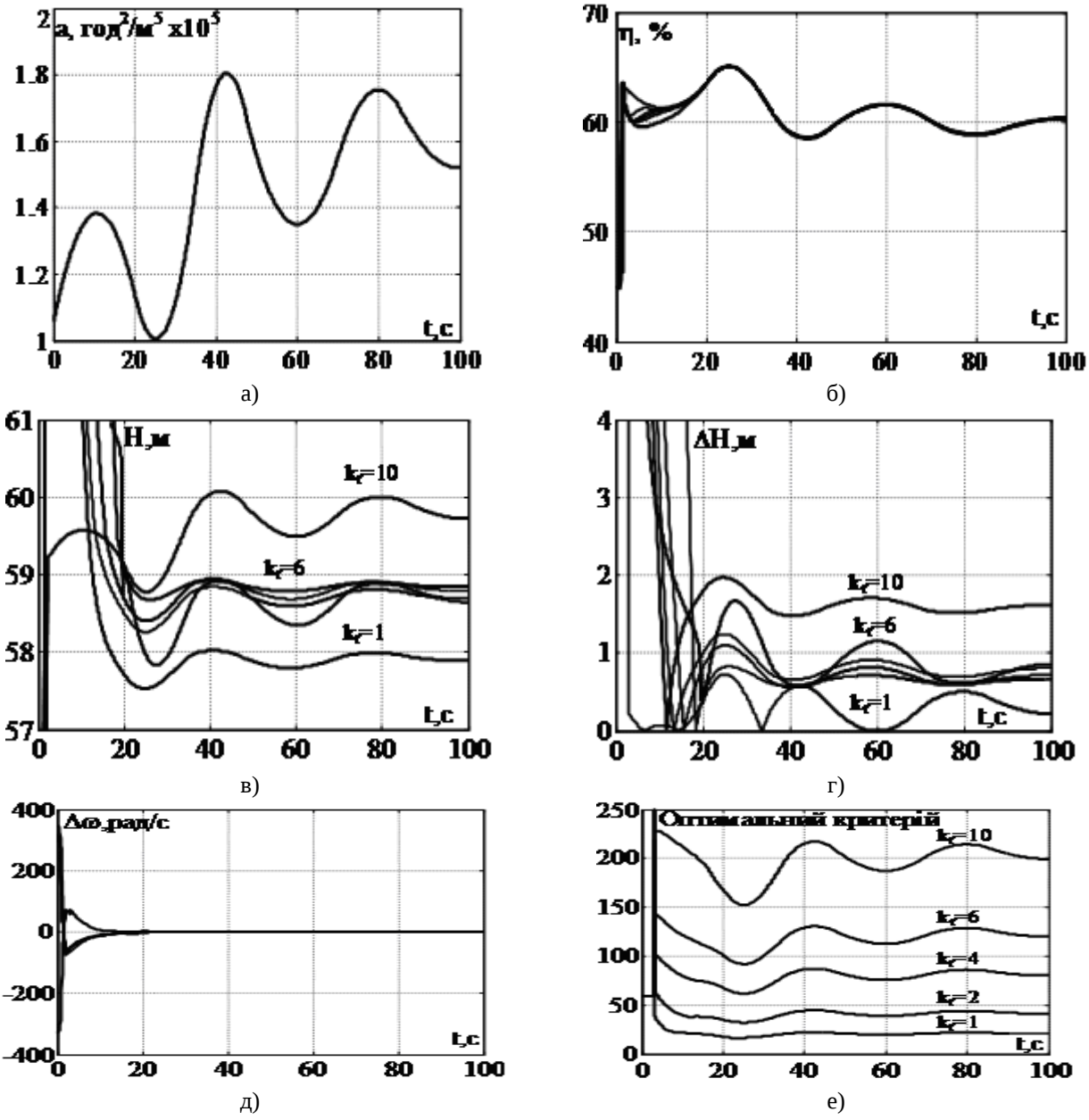


Рис. 4 – Результати моделювання: а) – графік зміни гідравлічного опору; б) – перехідний процес ККД насосу; в) – перехідний процес тиску насосу; г) – похибка по тиску; д) – похибка по швидкості;

е) – перехідний процес значення оптимального критерію

З аналізу отриманих результатів видно, що похибка по швидкості (представлена на рис. 4, д) нульова, отже регулятор працездатний при плавних варіаціях опору гідромережі. ККД насосу підвищується до максимально-можливого значення (рис. 4, б), яке визначається положенням робочої точки. При збільшенні вагової константи з 1 до 10 збільшується значення оцінки оптимального критерію та дещо збільшується значення ККД системи (приблизно на 0,01 при роботі системи з k_r = 10), але це призводить до збільшення похибки по тиску, що складає 1 м при роботі з k_r = 10 відносно k_r = 1.

Також було проведено дослідження отриманої системи в порівнянні з системою стабілізації тиску при законі зміни гідравлічного опору, представленому на рис. 5, а. У системі стабілізації тиск підтримувався на рівні H^* = 30 м., H^* = 40 м. та H^* = 50 м., а розроблена оптимальна система промодельована з ваговою константою k_r = 1 для H^* = 50 м.

Результати досліду представлені на рис. 5.

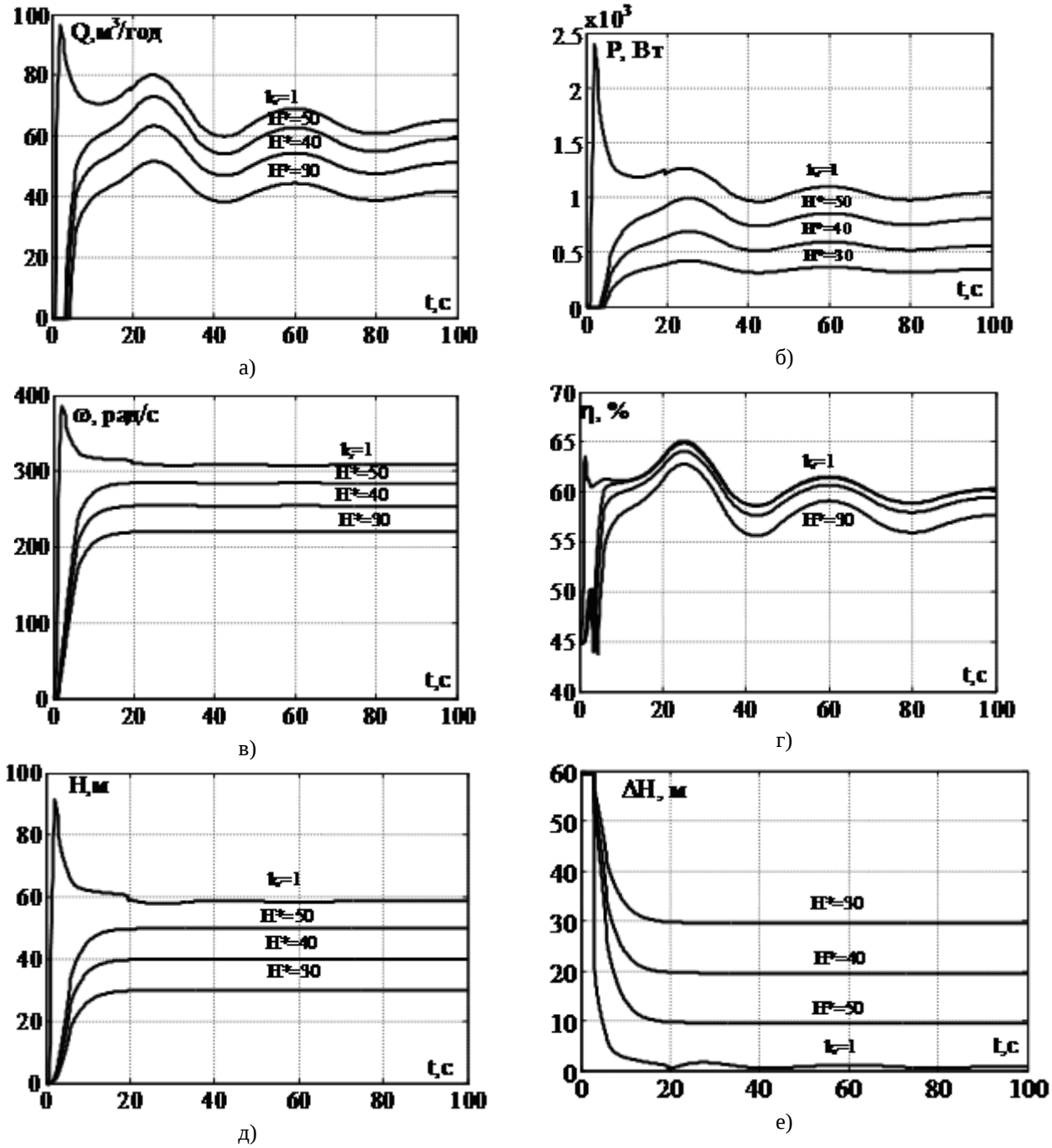


Рис. 5 – Результати моделювання для другого досліду: а) – перехідний процес продуктивності насосу; б) – перехідний процес потужності насосу; в) – перехідний процес швидкості обертання привідногодвигуна

насосу г) – перехідний процес ККД насосу; д) – перехідний процес тиску насосу е) – похибка по тиску

Аналіз отриманих результатів показав, що система з використанням оптимального регулятора має найвищій ККД насосу (підвищується до 3% від максимального значення) при варіаціях гідравлічного опору мережі (рис. 5, г) у порівнянні з системою стабілізації тиску для різних варіантів заданого тиску. Для оптимальної системи похибка за тиском коливалась в межах 1 м.

Висновки. У даній роботі розроблено систему оптимального керування насосною установкою на основі технологічної та енергетичної умов при варіаціях параметрів гідравлічної мережі. Дослідження системи методом математичного моделювання показали, що при плавній зміні гідравлічного опору для різних вагових констант витрати електричної енергії при використанні розробленого регулятора зменшуються в середньому на 3%. Порівняння із системою стабілізації тиску показали, що при роботі оптимальної системи ККД насосу збільшується на 0.7–1%, а похибка за тиском коливається у межах 1 м. Отримані результати доцільно впроваджувати у системи із заздалегідь відомим графіком водоспоживання для більш точної оцінки необхідної швидкості обертання.

Список літератури: **1**. *Piotr Skworcow* Optimal pump scheduling with pressure control aspects: Case studies / *Piotr Skworcow, HossamAbdelMeguid, Bogumil Ulanicki & Peter Bounds* // Integrating Water Systems Boxall & Maksimovi´c. – London – 2010. – pp. 113-119. **2.** *Paul F. Boulos* Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms / *Paul F. Boulos, Zheng Wu, Chun Hou Orr, Michael Moore, Paul Hsiung* – 2009 – pp. 11-17. **3**.Алексеева Ю.А. Динамические режимы экстремальной системы автоматического управления гидротранспортным комплексом / *Ю.А. Алексеева, Т.В.Коренькова* // Наукові праці Донецького національного технічного університету №11 – Донецьк. – 2011р. – с.24-30. **4.** *Бур'ян С.О.* До питання визначення коефіцієнта корисної дії насосу / *С.О. Бур'ян, Д.О. Боднар* // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 10-11 квітня 2014 р. – Кременчук, КрНУ, 2014. – с. 134-135.

Bibliography(transliterated): **1**. *Piotr Skworcow* Optimal pump scheduling with pressure control aspects: Case studies / *Piotr Skworcow, HossamAbdelMeguid, Bogumil Ulanicki & Peter Bounds* // Integrating Water Systems Boxall & Maksimovi´c. – London – 2010. – pp. 113-119. **2.** *Paul F. Boulos* Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms / *Paul F. Boulos, Zheng Wu, Chun Hou Orr, Michael Moore, Paul Hsiung* – 2009 – pp. 11-17. **3**. Alekseeva Yu.A. "Dinamicheskie rezhimyi ekstremalnoy sistemyi avtomaticheskogo upravleniya gidrotransportnyim kompleksom.": Naukovi pratsi Donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu №11. 2011r.24-30.Print. **4.** *Bur'yan S.O.* "Do pytannya vyznachennya koefitsiyenta korysnoyi diyi nasosu." Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modelyuvannya ta optymizatsiyi.: Zbirnyk naukovykh prats' KhII Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i spetsialistiv u misti Kremenchuk 10-11 kvitnya 2014 r. KrNU. 2014. 134-135.Print.

Надійшла (received) 15.07.2015

УДК 621.863.2

Р. С. ВОЛЯНСКИЙ, к.т.н., докторант ДГТУ, Днепродзержинск;
А. В. САДОВОЙ, д.т.н., проректор по научной работе ДГТУ, Днепродзержинск.

СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Введение. Для ряда электромеханических систем высокоточного промышленного оборудования, робототехнических систем и астрономических комплексов наряду с формированием желаемых траекторий движения актуальной является задача обеспечения инвариантности этих траекторий к изменению параметров замкнутых систем, которые вызваны действием большого количества различных дестабилизирующих факторов. В большинстве случаев эта задача осложняется отсутствием точной информации о параметрах объекта.

Известные решения, основанные на использовании робастных, адаптивных, нечетких и других классических и современных методов и подходов [1], не всегда обеспечивают желаемое качество процессов управления, отличаются сложностью технической реализации, элементами субъективизма при определении структуру и параметров регулятора и повышенным энергопотреблением.

Устранить указанные недостатки можно в результате использования на этапе синтеза системы управления методов интервального анализа [2], который является одной из достаточно бурно развивающихся отраслей современной математики. В соответствии с подходами интервального анализа одновременно рассматривается множество траекторий движения замкнутой системы, которые определяются всеми возможными сочетаниями ее параметров, которые определены на наперед заданных интервалах. В настоящее время известны работы, посвященные синтезу систем управления интервальными объектами [3]. Однако вследствие конечных коэффициентов усиления синтезируемых регуляторов такие системы, оставаясь устойчивыми при изменении параметров объекта управления, тем не менее не обеспечивают высокое качество процессов управления и низкую чувствительность к изменению этих параметров. Поэтому задача синтеза высокоточной системы управлении, инвариантной к изменению параметров объекта, параметры которого заданы интервально, является актуальной.

Постановка задачи. Целью данной статьи является синтез алгоритмов управления интервальным электромеханическим объектом первого порядка с иррациональной активационной функцией.

Материалы исследования. Рассмотрим уравнение движения электропривода с безынерционным каналом формирования электромагнитного момента в относительных единицах

$$py = -\frac{1}{T_m}y + \frac{1}{T_m}U\ , \tag{1}$$

где T_m – электромеханическая постоянная времени, $y = \omega / \omega_0$ – скорость двигателя в относительных единицах, U – управляющее воздействие, $p = p / dt$ – оператор дифференцирования.

Будем считать, что точные значения и/или законы изменения параметров объекта управления не известны, а определен только интервал их возможных значений

$$T_m = [T_m^{min}, T_m^{max}]. \tag{2}$$

С учетом интервала (2) уравнение (1) можно представить следующим образом

$$py = -\frac{1}{[T_m^{min}, T_m^{max}]}y + \frac{1}{[T_m^{min}, T_m^{max}]}U \tag{3}$$

или

$$py = \left[-\frac{1}{T_m^{min}}, -\frac{1}{T_m^{max}}\right]y + \left[\frac{1}{T_m^{max}}, \frac{1}{T_m^{min}}\right]U\ . \tag{4}$$

Вводя следующие обозначения

$$b = [b^{min}, b^{max}];\ \ m = [m^{min}, m^{max}], \tag{5}$$

$$b^{min} = -\frac{1}{T_m^{min}};\ \ b^{max} = -\frac{1}{T_m^{max}};\ \ m^{min} = \frac{1}{T_m^{max}};\ \ m^{max} = \frac{1}{T_m^{min}},\ , \tag{6}$$

уравнение (4) можно представить следующим образом

$$py = by + mU\ . \tag{7}$$

В отличие от уравнения (1), которое описывает одну траекторию движения, уравнение (7) позволяет одновременно рассматривать траектории движения, которые соответствуют всем параметрам объекта, определенным на интервалах (2).

Используя принцип преобразования обратной связью по выходу [4] и введя новое управляющее воздействие V, исключим из уравнения движения (7) составляющие с неопределенностью. Такой подход позволяет представить уравнение (3) в виде

$$py = V \quad py = V\ , \tag{8}$$

которое не зависит от параметров объекта (1).

© Р.С. Волянский , А.В. Садовой, 2015

Формирование желаемых траекторий движения объекта (8) осуществляется подачей на его вход соответствующим образом определенного управляющего воздействия. Широкий класс траекторий движения получается в результате использования алгоритма управления вида [5], определенного в открытой области $V \in R$

$$V = g|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y)\,, \tag{9}$$

где g - произвольный коэффициент усиления регулятора, α - показатель степени, определяющий порядок скользящего режима в замкнутой системе [6].

При равенстве траекторий движения (3) и (6) можно записать управляющее воздействие, подаваемое на объект, следующим образом

$$U = \frac{1}{m}V - \frac{b}{m}y \tag{10}$$

или с учетом коэффициентов (5) и (6)

$$U = \frac{1}{\left[\frac{1}{T_m^{max}}, \frac{1}{T_m^{min}}\right]}V + \frac{\left[\frac{1}{T_m^{max}}, \frac{1}{T_m^{min}}\right]}{\left[\frac{1}{T_m^{min}}, \frac{1}{T_m^{max}}\right]}y = [T_m^{max}, T_m^{min}]V + y\,. \tag{11}$$

Интервальный алгоритм управления (11) можно разбить на два алгоритма, применение которых позволяет управлять объектами с минимальными и максимальными параметрами

$$\begin{array}{l} U^{max} = T_m^{max}V + y\,; \\ U^{min} = T_m^{min}V + y\,. \end{array}; \tag{12}$$

Алгоритмы (12) описывают границы трубки управления, которая показана на рис.1.

Задавшись некоторой величиной γ, $\gamma \in [0,1]$, определим внутри этой трубки эквивалентное управляющее воздействие следующим образом

$$U = U_0 + \begin{cases} \gamma g_1 (U^{max} - U^{min})\left|\frac{V}{p} - y\right|^{\beta} & при \quad \frac{V}{p} - y > 0\,; \\ (\gamma - 1) g_1 (U^{max} - U^{min})\left|\frac{V}{p} - y\right|^{\beta} & при \quad \frac{V}{p} - y < 0, \end{cases} \tag{13}$$

где $U_0 = U^{min} + (U^{max} - U^{min})(1 - \gamma)$, $\beta \in [0,1]$ - показатель степени, определяющий нелинейность управляющего воздействия, g_1 – коэффициент, обеспечивающий выполнение условия

$$\frac{V}{p} - y = 0\,. \tag{14}$$

При γ = 0,5 управляющее воздействие (13) с учетом алгоритмов управления (9), (12) и (14) примет вид

$$\begin{array}{l} U = g\frac{T_m^{max} + T_m^{min}}{2}|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y) + y + g_1\left(g\frac{T_m^{max} - T_m^{min}}{2}|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y)\right) \times \\ \times\ \left|\frac{|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y)}{p} - y\right|^{\beta} sign\left(\frac{|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y)}{p} - y\right) \end{array}. \tag{15}$$

Первое слагаемое алгоритма управления (15) осуществляет грубое управление скоростью для объекта с усредненными параметрами, второе слагаемое в соответствии с принципом преобразования динамического объекта обратными связями компенсирует усредненное значение противо-ЭДС двигателя и третье слагаемое осуществляя приближение траекторий движения объекта (1) к траекториям объекта (8), позволяет формировать желаемую траекторию движения рассматриваемого электромеханического объекта, инвариантную к изменениям его параметров.

Результат математического моделирования системы управления объектом (1) при α = 0.5 и β = 0.5 представлены кривой 1 на рис.2. Там же кривыми 2 и 3 показаны результаты исследования той же системы с алгоритмами

$$U = g\frac{T_m^{max} + T_m^{min}}{2}|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y) + y\,, \tag{16}$$

$$U = g\frac{T_m^{max} + T_m^{min}}{2}|y^* - y|^{\alpha} sign\,(y^* - y)\,, \tag{17}$$

соответственно, кривая 4 иллюстрирует изменение постоянной времени T_m. На рис. 3 кривые 1-3 иллюстрируют изменения управляющих воздействий, которые формируются регуляторами с алгоритмами управления (12-14), соответственно. На рис. 3 пунктирными линиями ограничена область, представляющая собой трубку управления, ограниченную сверху и снизу выражениями (12) после подстановки в них управляющего воздействия (9). Результаты моделирования показывают, что алгоритм управления (16) представляет собой усреднение выражений (12) и управляющее воздействие, формируемое в соответствии с этим

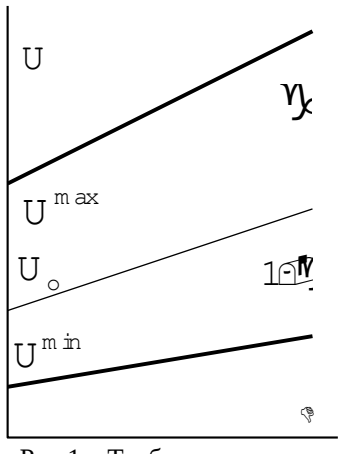


Рис.1 – Трубка управления

алгоритмом, автоматически располагается в центре рассматриваемой трубки.

Управляющее воздействие (17) не учитывает наличие в составе объекта управления внутренней обратной связи и поэтому, выходя за границы найденной трубки управления, не обеспечивает синтезируемой замкнутой системе заданную статическую точность.

Выводы.

Приведенные выше выкладки и результаты численных исследований позволяют сделать следующие выводы:

Использование интервальных вычислений позволяет сформировать трубку управляющего воздействия, которая для замкнутых электромеханических систем с иррациональной активационной функцией в установившемся режиме вырождается в прямую и поэтому по сравнению с системами разрывного управления гарантирует пониженное энергопотребление в установившемся режиме.

Управляющие воздействия, расположенные в найденной трубке, в результате компенсации внутренней обратной связи обеспечивают повышение порядка астатизма замкнутой системы и нулевую статическую ошибку, но не гарантируют низкую чувствительность к изменению параметров объекта.

Инвариантность к изменению параметров объекта управления обеспечивается в результате формирования управляющим воздействием (15) для объекта (1) траектории движения, которая описывается выражениями (8) и (9). Амплитуда синтезированного управляющего воздействия определяется заданными интервалами параметров и переменными состояния объекта управления. Амплитуда найденного таким образом управляющего воздействия уменьшается при стремлении к заданному значению.

Изменение параметров в замкнутой электромеханической системе с алгоритмом (15) приводит к автоматическому формированию дополнительных форсирующих или демпфирующих воздействий, запрещающих отклонения траектории движения системы от описываемых выражениями (8) и (9).

Список литературы: **1.** *Пупков К. А.* Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 5. Методы современной теории автоматического управления [Текст] / *К. А. Пупков, Н. Д. Егупов.* – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.-783с. **2.** *Jaulin L.* Applied interval analysis [Текст] / *Luc Jaulin, Michel Kieffer, Oliver Didrit, Eric Walter.* – London.: Springer, 2001. – 379p. **3.** *Fiedler M.* Linear optimization problem with inexact data [Текст]/ *M.Fiedler et all.* – New York.: Springer, 2006.- 224p. **4.** *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст] / *Д.П. Ким.* - М.: Физматлит, 2004.-464с. **5.** *Волянский Р.С.* Синтез оптимальной системы управления с нелинейной активационной функцией [Текст] / *Р.С. Волянский, А.В. Садовой*// Электротехнические и компьютерные системы №15 (91), 2014. – С.69-71. **6.** *Волянский, Р.С.* Скользящие режимы дробных порядков [Текст] / *Волянский Р.С., Садовой А.В.* // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ» : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. №36 - Вестник НТУ "ХПИ", 2013. – С.66-67.

Bibliography (transliterated): **1.** *Pupkov K. A.* Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. Tom 5. Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija [Tekst] / *K. A. Pupkov, N. D. Egupov.* – M.:Izd-vo MGTU im. N.Je.Baumana, 2004.-783s. **2**. *Jaulin L.* Applied interval analysis [Tekst]/ *Luc Jaulin, Michel Kieffer, Oliver Didrit, Eric Walter.* – London.: Springer, 2001. – 379p. **3.** *Fiedler M.* Linear optimization problem with inexact data [Tekst]/ *M.Fiedler et al.* – New York.: Springer, 2006.- 224p. **4.** *Kim D.P.* Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Mnogomernye, nelinejnye, optimal'nye i adaptivnye sistemy [Tekst] / *D.P.Kim.* - M.: Fizmatlit, 2004.-464s. **5.** *Volianskiy R.S.* Sintez optimal'noy sistemy upravleniya s nelineynoy aktivacionnoy funkciey [Tekst] / *R.S.Voljanskiy, A.V.Sadovoy*// Elektrotehnicheskie i kompyuternye sistemy №15 (91), 2014. – S.69-71. **6.** *Voljanskiy R.S.* Skolzyashhie rezhimy drobnyh poryadkov [Tekst] / *VolianskiyR.S., Sadovoy A.V.* // Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teorija i praktika. №36 - Vestnik NTU "HPI", 2013. – S.66-67.

Поступила (received)

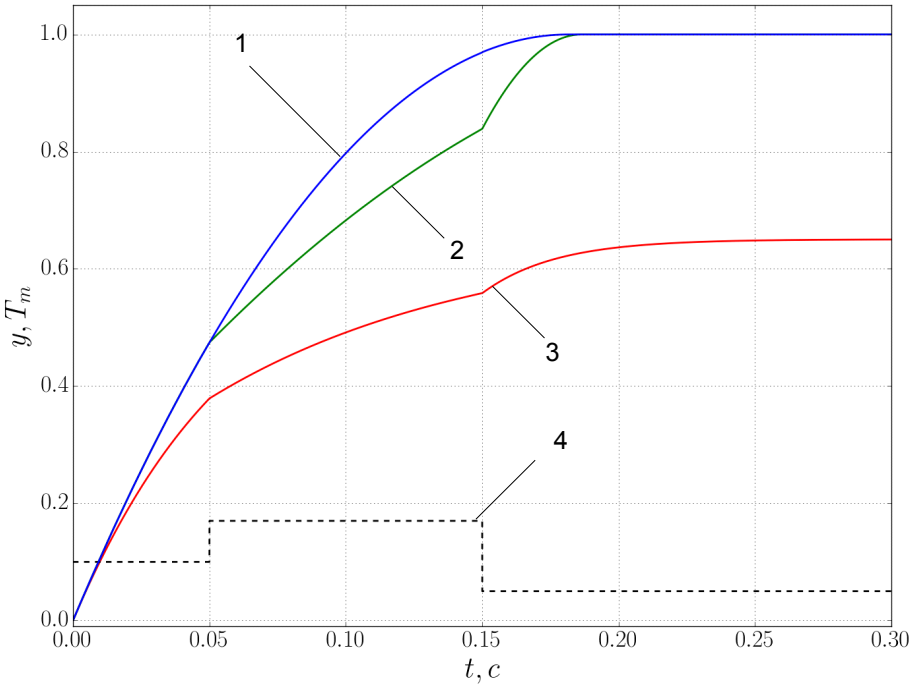


Рис.2 – Процесс разгона синтезированных системах

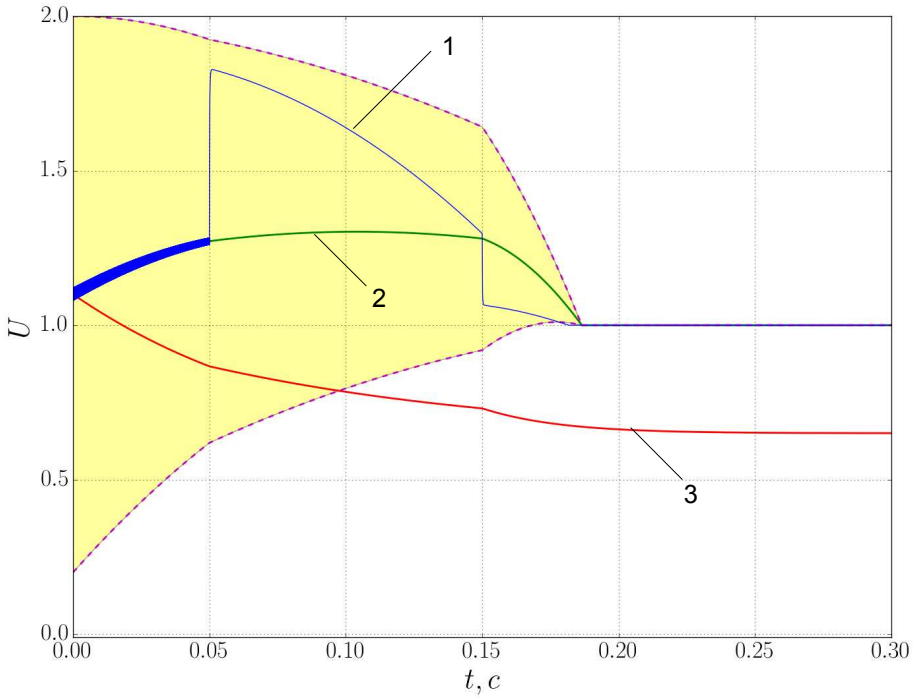


Рис.3. – Управляющие воздействия в синтезированных системах

УДК 62-523.2

В.Б. КЛЕПИКОВ, д.т.н., проф. НТУ «ХПИ»;
А.В. ТИМОЩЕНКО, ст. преп. НТУ «ХПИ».

КОБИНИРОВАНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БУКСОВАНИЯ И ЮЗА КОЛЕС РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Введение. Одной из проблем в рельсовом электротранспорте, является буксование и юз колес [1,2]. При буксовании снижается производительность, а при юзе – безопасность движения. Избыточное проскальзывание колес относительно рельсов вызывает также и другие негативные эффекты: ускоренный износ бандажей колес и рельсов, увеличение потерь энергии, кроме того в таких режимах возможно возникновение, так называемых, фрикционных автоколебаний (АКФ). Шахтные условия (наличие влаги, угольной пыли) благоприятствует возникновению буксования и юза, поэтому для рудничных электровозов (РЭ) устранение вышеуказанных явлений особо актуально. При этом в режимах разгона и торможения целесообразно иметь возможность автоматического обеспечения максимальной силы сцепления. Известен случай, когда на шахтах Донбасса в течение года около 150 РЭ вышли из строя из-за вызванных АКФ поломок осей колесных пар [3]. Для создания системы автоматического обеспечения максимальной силы сцепления необходимо простым и надежным образом определять начало пробуксовки с целью своевременного регулирования скорости электропривода (ЭП). Известные устройства обнаружения буксования избыточного проскальзывания с помощью холостого ролика, радиолокационного метода, на основе эффекта Доплера, по скачку ускорения и другие [4,5], либо малонадежны, либо их использование в шахтных условиях затруднительно. В [6] предложено определять факт возникновения буксования по наличию в токе электродвигателя (ЭД) пульсаций с частотой фрикционных автоколебаний (АКФ). Однако данные автоколебания возникают при наличии в характеристике сцепления так называемого «падающего» участка, на котором увеличение скорости скольжения сопровождается снижением силы сцепления [7]. Между тем из-за наличия влаги, угольной пыли работа рудничного электровоза (РЭ) зачастую протекает в условиях низких значений потенциального (наибольшего) коэффициента сцепления ($\Psi \leq 0.1$) [8]. При таких значениях падающий участок отсутствует, вследствие чего надежность обнаружения избыточного проскальзывания существенно снижается. В [9] экспериментально подтверждено существование фрикционных колебаний (ФК) с частотой пропорциональной скорости колеса и достаточно большой амплитудой. Эти колебания возникают при избыточном проскальзывании вследствие наличия колебания силы нормального давления (СНД), обуславливаемой, например, незначительным эксцентриситетом колеса, порождая вследствие нелинейности характеристики трения даже при отсутствии падающего участка, колебания в кривой тока электродвигателя.

Постановка задачи. В настоящей работе предлагается обеспечить повышение надежности определения факта возникновения буксования за счет одновременного анализа пульсаций в кривой тока ЭД РЭ по двум каналам, один из которых выделяет наличие фрикционных автоколебаний, а второй – фрикционных колебаний, используя для этого программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС).

Материалы исследования. Процедура обработки сигнала тока иллюстрируется рис. 1. Сигнал с датчика тока поступает на фильтр нижних частот (ФНЧ), который устраняет из сигнала тока, составляющие выше 1 кГц. Выходной сигнал ФНЧ поступает на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), а с его выхода – на ПЛИС, в которой реализованы 2 параллельных канала определения буксования.

В канале АКФ определяются пульсации в кривой тока с частотой фрикционных автоколебаний по своему значению, близкой к частоте упругих колебаний. С этой целью в ПЛИС реализован полосовой фильтр (ПФ) с конечной импульсной характеристикой (КИХ), настроенный на частоту вышеуказанных колебаний, который выделяет таким образом сигнал, появляющийся в результате избыточного проскальзывания. Пост-обработка выходного сигнала ПФ, выполняется по алгоритму, показанному на рис. 2, и осуществляет вычисление среднеквадратичного значения сигнала за период колебаний. Данное значение сравнивается с некоторым пороговым значением уставки, исключающим дальнейшее прохождение сигнала от случайных возмущений упругих колебаний. В случае её превышения формируется сигнал буксования. Временные диаграммы, поясняющие процесс определения буксования по пульсациям тока с частотой АКФ показаны на рис. 3. На рис.3а, приведен входной частотно модулированный тестовый сигнал с постоянной составляющей, с диапазоном изменения частот от 0.1 до 150 Гц за временной интервал в 40 с., на рис.3б – выходной сигнал ПФ с КИХ, на рис.3в – сигнал буксования.

Во втором параллельном канале определяется наличие в кривой тока пульсации с частотой ФК. Для этого используется анализатор спектра, в котором выполняются следующие процедуры: размещение последних 4096 измерений АЦП в память ПЛИС; разложение совокупности этих измерений на гармонические составляющие по алгоритму быстрого преобразования Фурье [10]; анализ изменений в спектре по сравнению с предыдущей обработкой. Вывод о наличии буксования производится на основании постоянного мониторинга параметров частоты и амплитуды в спектре измеряемого сигнала тока. Быстрое увели-

© В.Б. Клепиков, А.В. Тимощенко, 2015

чение амплитуды по сравнению с предыдущим измерением выше некоторого порогового значения свидетельствует о начале буксования. Работа канала проиллюстрирована временными диаграммами (рис.4). На рис.4б представлен тестовый частотно модулированный входной сигнал, имитирующий сигнал датчика тока. Данный сигнал содержит постоянную составляющую и колебания тока, имитирующие пульсации от ФК, порожденные изменением СНД на колесо. Этот сигнал показывает, что с течением времени имеет место повышение частоты пульсаций от ФК, но при отсутствии буксования (юза) для данной скорости скольжения уровень переменной составляющей ниже. Также имитирующий сигнал датчика тока содержит временные интервалы движения без буксования, что соответствует перемещению рабочей точки по характеристике сцепления в зоне упругого скольжения, например, 0-60 с., 90-150 с. и т.д. и временные интервалы 60-90 с. 150-180 с. и т.д., на которых в соответствие с [9] имеет место возрастание амплитуды ФК. На рис. 4а показан выходной сигнал буксования канала ФК.

На рис.5 приведен спектральный состав тестового сигнала на 33 и 270 секундах расчета, который используется для проверки корректности работы канала определения ФК. В его спектральный состав входит постоянная составляющая равная 100 А., и две гармоники, с течением времени увеличивающиеся по частоте с разными скоростями, и которые при постоянном увеличении частоты циклически изменяют значения своих амплитуд, имитируя явление усиления колебаний. Выходы двух каналов соединены с логическим элементом «ИЛИ», и в случае появления сигнала буксования в одном из каналов, формируется выходной сигнал, наличия буксования.

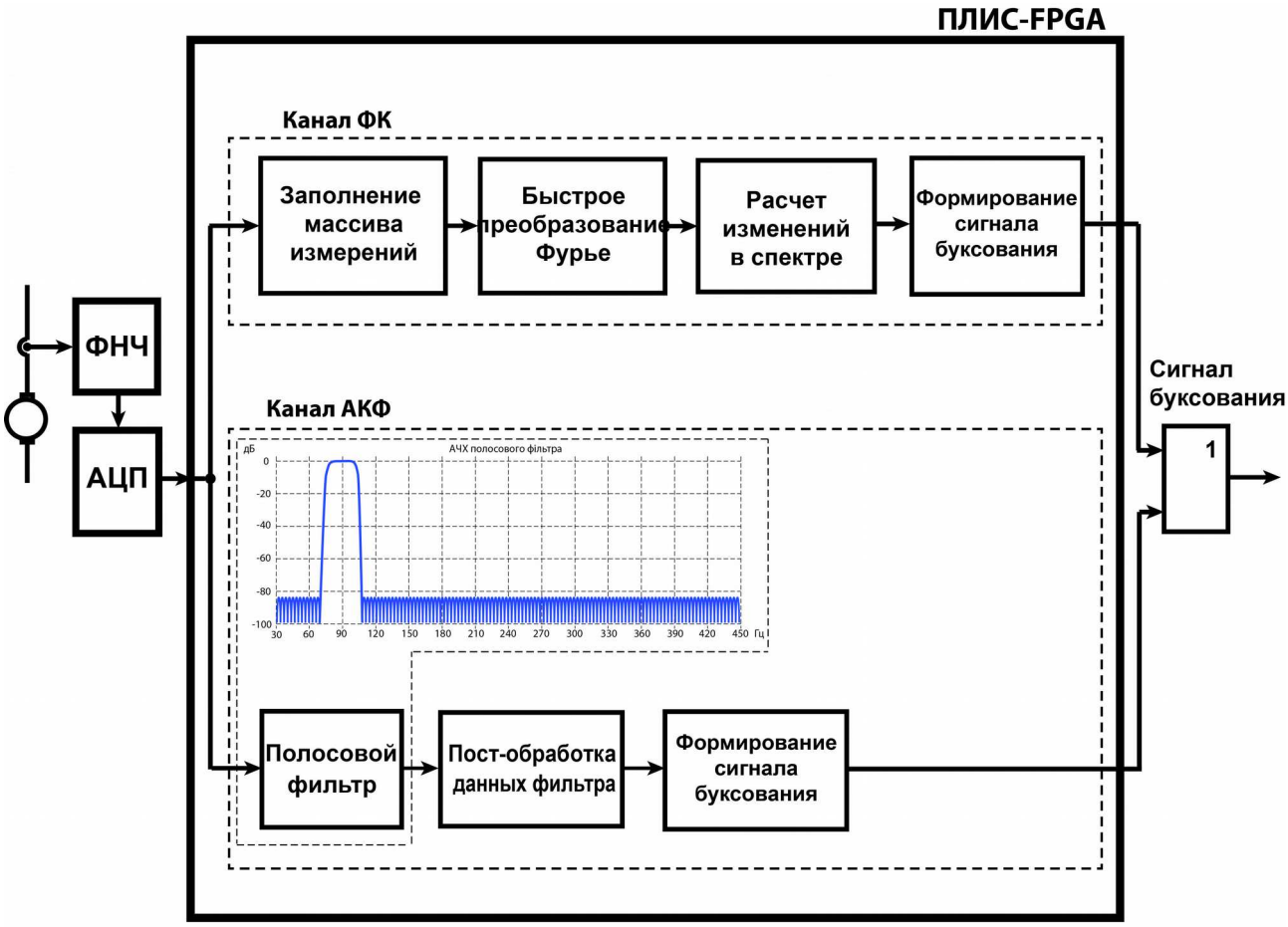


Рис. 1 – Функциональная схема системы определения буксования

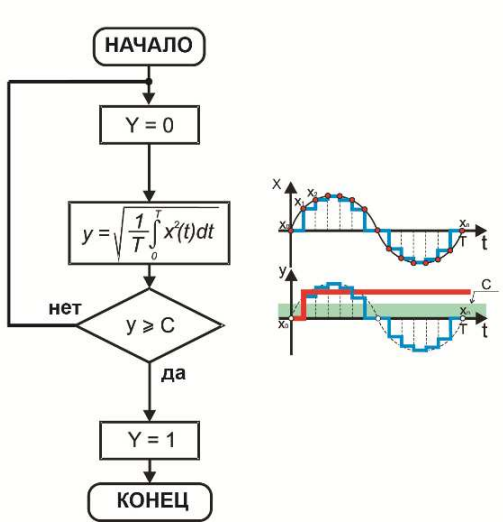


Рис. 2. – Алгоритм пост-обработки данных полосового фильтра

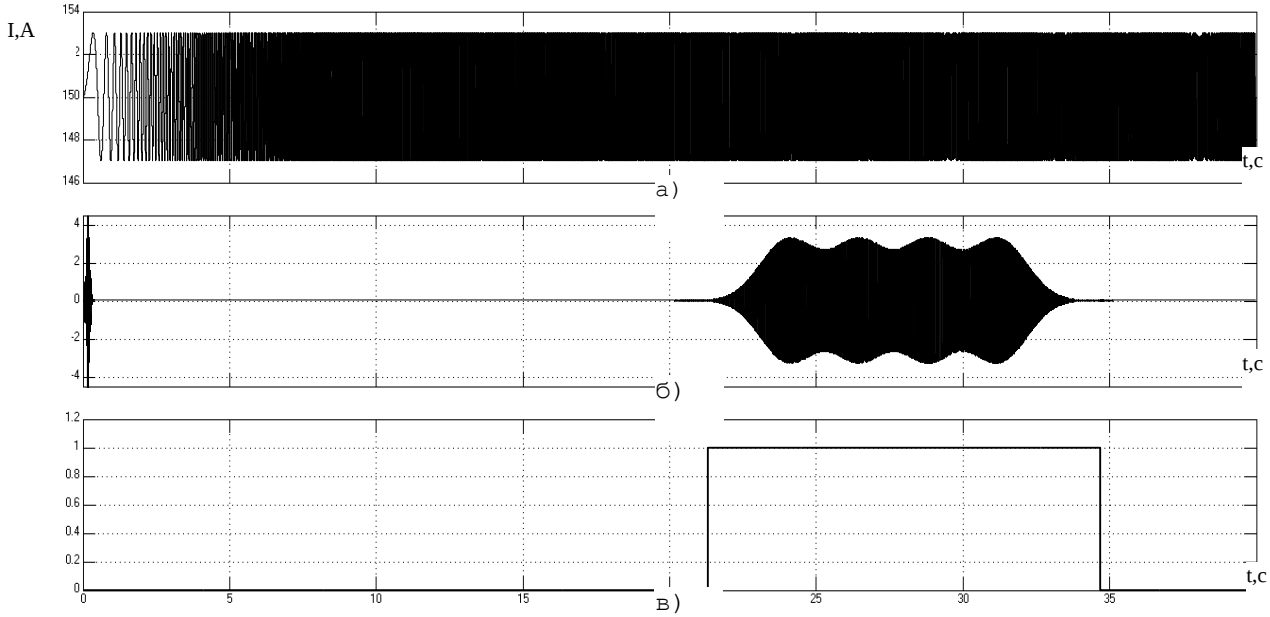


Рис. 3 – Работа канала определения АКФ, где 3а – входной сигнал, 3б – сигнал на выходе полосового фильтра, 3в – сигнал буксования

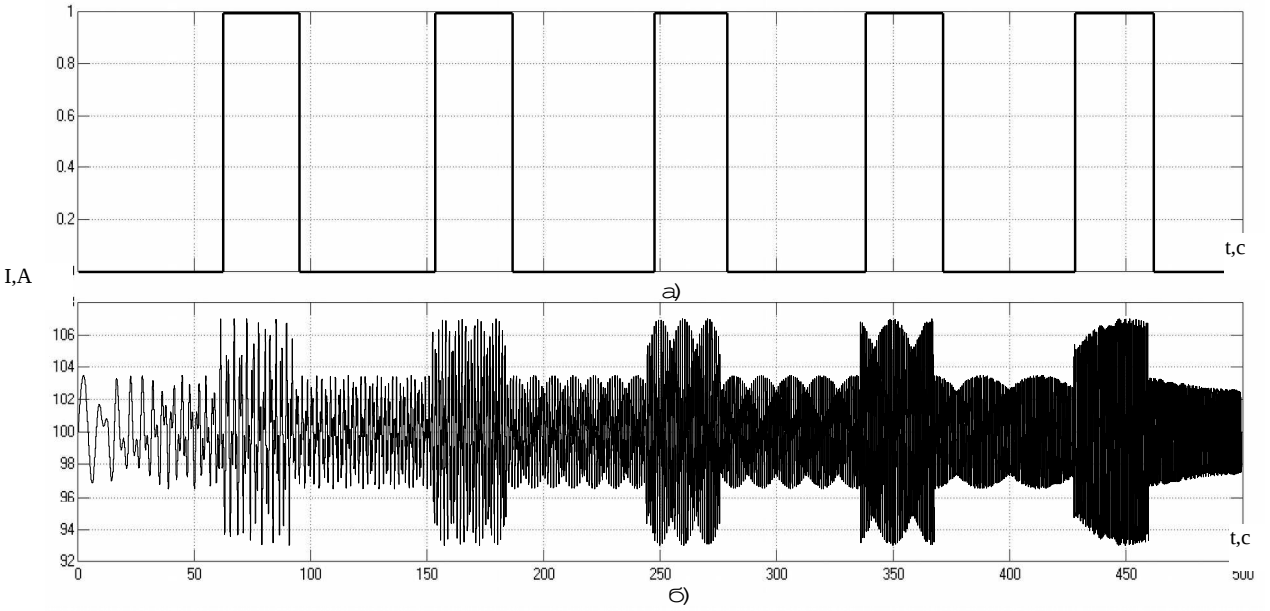


Рис. 4 – Работа канала ФК, где 4а – сигнал буксования, 4б – входной тестовый сигнал

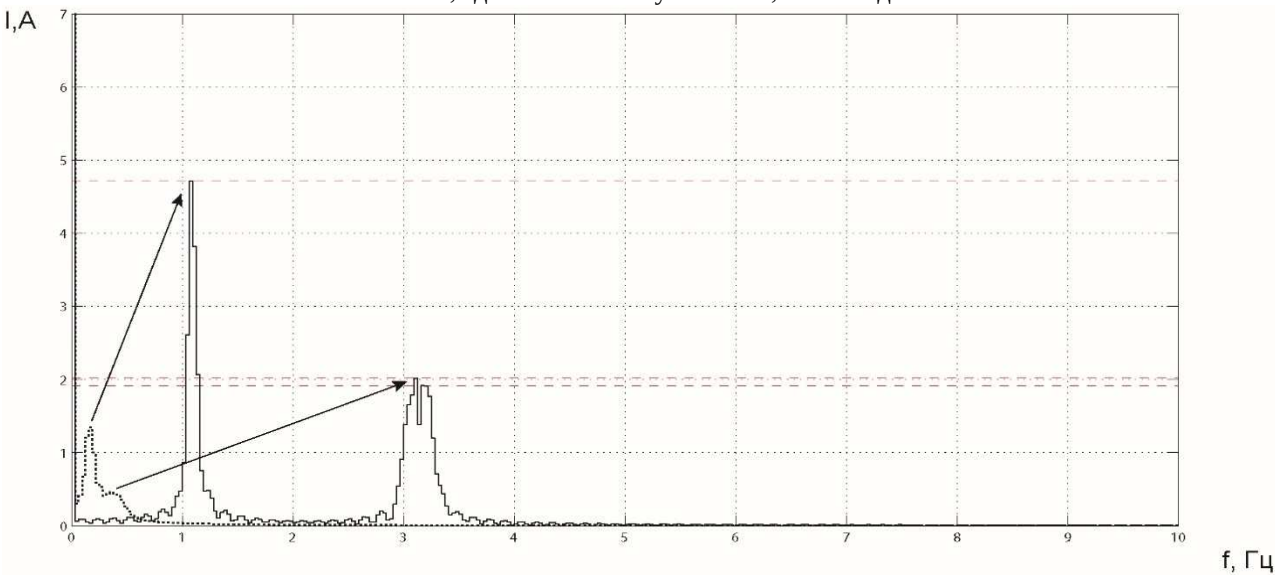


Рис. 5 – Гармонический состав тестового сигнала тока, канала ФК

Вывод. Предложена, подтвержденная компьютерным моделированием, методика простого и надежного определения буксования и юза колес рудничного электровоза по результатам анализа пульсаций в токе тягового электродвигателя с использованием программируемой логической интегральной схемы.

Список литературы: 1. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей, М., Транспорт, 1965, с.268. **2.** Меньшутин Н.Н. Зависимость между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива: Вестник ВНИИЖТ/ I960, №7. **3.** А.А. Ренгевич, П.С. Шахтарь, К.П. Володько и др. Причины поломок осей рудничных электровозов// Вопросы рудничного транспорта: сб. статей. – М.: Госгортехиздат, 1962. – Вып 6. – С. 192-203. **4.** Клепиков В.Б., Кутовой Ю.Н., Касторный П.М, Кеворкян А.Т. Авторское свидетельство СССР № 1641665, Устройство обнаружения буксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей, Бюл. №6, 87 г. **5**. Клепиков В.Б., Кутовой Ю.Н., Касторный П.М и др. Авторское свидетельство СССР № 659425, кл. В 60 L 3/10, 1987 Устройство обнаружения буксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей, Бюл. №31, 88 г. **6**. Клепиков В.Б., Касторний П.М., Колодяжний В.А., Кутовий Ю.М., а.с. СССР № 1418104, Устройство определения буксования и юза колес транспортного засобу з електричною передачею, Бюл. №31, 88 г. **7.** Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография/ Харьков: Підручник НТУ "ХПІ", 2014, 407 с. **8.** Костюкевич А.И., Таран И.А, Ковтанец М.В., Ноженко В.С., Экспериментальные исследования характеристик сцепления в контакте «колесо-рельс» при наличии промежуточной среды// «Автомобіле- та тракторобудування». Вісник НТУ «ХПІ». 2011р, с.56-62 **9.** Клепиков В.Б., Палис Ф., Клепиков А.В. О явлении усиления колебаний в электроприводах машин и механизмов с проскальзыванием//Электротехника, №6, 2004, С.7-11. **10**. Сато Юкио. Без паники! Цифровая обработка сигналов. / Юкио Сато: пер.с яп. Селиной Т.Г. М.: «Додэка-XXI», 2010. – 176 с.

Bibliography (transliterated): 1. Minov D.K. Povyishenie tyagovyih svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey, M., Transport, 1965, s.268. **2.** Menshutin N.N. Zavisimost mezhdu siloy stsepleniya i skorostyu skolzheniya kolesnoy paryi lokomotiva: Vestnik VNIIZhT/ I960, #7. **3.** A.A. Rengevich, P.S. Shahtar, K.P. Volodko i dr. Prichinyi polomok osey rudnichnyih elektrovozov// Voprosyi rudnichnogo transporta: sb. statey / – M.: Gosgortehizdat, 1962. – Vyip #6. 192-203 Print. **4.** Klepikov V.B., Kutovoy Yu.N., Kastornyiy P.M, Kevorkyan A.T. Avtorskoe svidetelstvo SSSR # 1641665, Ustroystvo obnaruzheniya buksovaniya i yuza koles transportnogo sredstva s elektricheskoy peredachey, Byul. #6, 87 g. **5.** Klepikov V.B., Kutovoy Yu.N., Kastornyiy P.M. i dr. Avtorskoe svidetelstvo SSSR # 659425, kl. V 60 L 3/10, 1987 Ustroystvo obnaruzheniya buksovaniya i yuza koles transportnogo sredstva s elektricheskoy peredachey, Byul. #31, 88 g. **6.** Klepikov V.B., Kastorniy P.M., Kolodyazhniy V.A., Kutoviy Yu.M., a.s. USSR № 1418104, Ustroystvo opredeleniya buksovaniya i yuza koles transportnogo zasobu z elektrichnoyu peredacheyu, Byul. №31, 88 g. **7.** Klepikov V.B. Dinamika elektromehanicheskih sistem s nelineynyim treniem: monografiya/ Kharkov: Pidruchnik NTU "HPI", 2014. 407 s. **8.** Kostyukevich A.I., Taran I.A, Kovtanets M.V., Nozhenko V.S., Eksperimentalnyie issledovaniya harakteristik stsepleniya v kontakte «koleso-rels» pri nalichii promezhutochnoy sredyi// «AvtomobIle- ta traktorobuduvannya». VIsnik NTU «HPI». 2011r, 56-62 Print **9.** Klepikov V.B., Palis F., Klepikov A.V. O yavlenii usileniya kolebaniy v elektroprivodah mashin i mehanizmov s proskalzyivaniem//Elektrotehnika, #6, 2004, 7-11 Print. **10.** Sato Yukio. Bez paniki! Tsifrovaya obrabotka signalov. / Yukio Sato: per.s yap. Selinoy T.G. M.: «Dodeka-XXI», 2010. – 176 s.

Поступила (received) 05.06.2015

УДК 621.3.01

Б. И. КУЗНЕЦОВ, д-р. техн. наук, проф., зав. отд. ИТПМ НАН Украины, Харьков;
Т. Б. НИКИТИНА, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. ХНАДУ, Харьков;
В. В. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, доц., директор УНППИ УИПА, Харьков;
В. В. ХОМЕНКО, асп. УИПА, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

Введение. Подавляющее большинство существующих электромеханических следящих систем построены по принципу подчиненного регулирования и содержат контуры момента (тока), скорости и положения с типовыми регуляторами. В связи с наличием сухого трения на валах исполнительного двигателя и рабочего механизма, введение интегральной составляющей в контуре регулирования положения приводит к возникновению незатухающих колебаний. Поэтому в существующих следящих электромеханических системах применяют пропорционально-дифференциальные регуляторы, реализуемые с помощью гироскопических датчиков углового положения и угловой скорости рабочего органа.

Постановка проблемы. Точность управления такими системами в значительной степени определяется наличием нелинейных элементов. При движении рабочего органа с малой скоростью влияние сухого трения на валах исполнительного двигателя и рабочего органа вызывает неравномерность движения, что приводит к ухудшению технических характеристик системы. А при движении с большой скоростью наличие сухого трения практически не оказывает влияние на показатели качества системы. Однако при больших перемещениях время регулирования определяется энергетическими характеристиками исполнительного двигателя – максимальными значениями его момента и скорости вращения.

Наличие упругих элементов между приводным двигателем, редуктором и приводным механизмом также влияет на динамические характеристики системы. По мере повышения быстродействия и расширения полосы пропускания системы собственные механические колебания начинают влиять на динамику: в переходном процессе появляются колебания, в частотной характеристике системы возникают выбросы, а по мере приближения полосы пропускания к первой частоте собственных недемпфированных колебаний механической части система становится неустойчивой.

Анализ литературы. Существующие типовые регуляторы, в основном, исчерпали возможности дальнейшего повышения точности управления [1 – 2]. Постоянное повышение требований к точности работы электромеханических следящих систем обуславливает применение новых современных законов управления. Одним из возможных направлений существенного повышения качества таких систем является реализация управления по вектору состояния, в частности, на основе теории робастного управления [3].

Робастные регуляторы состояния являются линейными регуляторами по вектору состояния исходной линейной системы, восстановленному с помощью линейных робастных наблюдателей. Однако анализ синтезированных систем необходимо проводить с учетом наличия существенных нелинейностей объекта управления, таких как сухое трение на валах двигателя и рабочего механизма, изменение параметров объекта управления в ходе работы системы и другие факторы и при этом необходимо выполнить исследование работы системы в различных режимах работы системы.

Целью данной статьи является исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем с робастными регуляторами по сравнению с системами с типовыми регуляторами.

Изложение материала исследования. Существующие следящие электромеханические системы с пропорционально-дифференциальным регулятором положения являются статическими системами. В процессе наведения рабочего органа основным режимом работы системы является отработка линейно нарастающего, либо линейно убывающего задания по положению объекта сопровождения [1]. Для устранения установившейся ошибки в таком режиме работы, система управления положением рабочего органа должна обладать астатизмом второго порядка. С этой целью при синтезе системы в математическую модель расширенного объекта управления введем два последовательно соединенные интегрирующие звена.

Метод решения. Синтезируем робастный регулятор следящей электромеханической системы [3] с помощью решения [4 – 7] многокритериальной задачи нелинейного программирования с ограничениями [8 – 9**]** на основе построения Парето оптимальных решений [10 – 12] с помощью алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц [13 – 15], что позволяет сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе следящей электромеханической системы в различных режимах [1 – 2].

К проектируемым многомассовым системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах. Как правило, накладываются определенные ограничения на качество переходных процессов – задается время первого согласования, время регулирования,

© Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец, В.В. Хоменко, 2015

перерегулирование и т.д. Обычно также задается максимальная дисперсия ошибки слежения либо стабилизации при отработке случайных задающих воздействий, либо компенсация случайных возмущающих воздействий, и при этом, естественно, должны удовлетворяться ограничения на переменные состояния и управления. Еще одним требованием, предъявляемым к системам управления, является ограничение ошибок отработки задающих, либо компенсации возмущающих воздействий в виде гармонических сигналов. При этом может быть задан входной сигнал одной частоты, либо несколько характерных рабочих частот, а может быть задан диапазон рабочих частот, в котором необходимо выполнить определенные условия. И, наконец, для следящих систем повышенной точности характерным режимом работы является отработка малых скоростей либо малых перемещений. Для этого режима обычно задается неплавность движения в виде соответствующих критериев. Причинами неплавного движения рабочего органа на низких скоростях является наличие нелинейностей типа сухое трение в исполнительных двигателях и рабочих органах и упругих элементов между исполнительным двигателем и рабочим органом, что приводит к срывным колебаниям подвижных частей исполнительного двигателя и рабочего органа, сопровождающихся остановками и срывами подвижных частей относительно положения остановок. Одним из основных требований, предъявляемых к многомассовым системам управления, является также требование робастности синтезированной системы, т.е. способность системы сохранять предъявляемые к ней технические требования при изменении в определенных пределах параметров объекта управления и внешних воздействий.

Результаты моделирования на ЭВМ. Вначале проведем исследование динамических характеристик следящей электромеханической системы с синтезированным робастным регулятором с астатизмом второго порядка при учете всех нелинейностей для трех различных значениях момента инерции объекта управления при наведении на малых скоростях. На рис. 1. показаны переходные процессы в электромеханической следящей системе при наведении на малых скоростях (0,02град/с). На рисунке показаны следующие переменные состояния: а) угла поворота рабочего органа $\varphi(t)$; б) скорости вращения рабочего органа $\omega_м(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_д(t)$; д) тока двигателя $I_я(t)$; е) напряжения на якорной цепи двигателя $U_я(t)$.

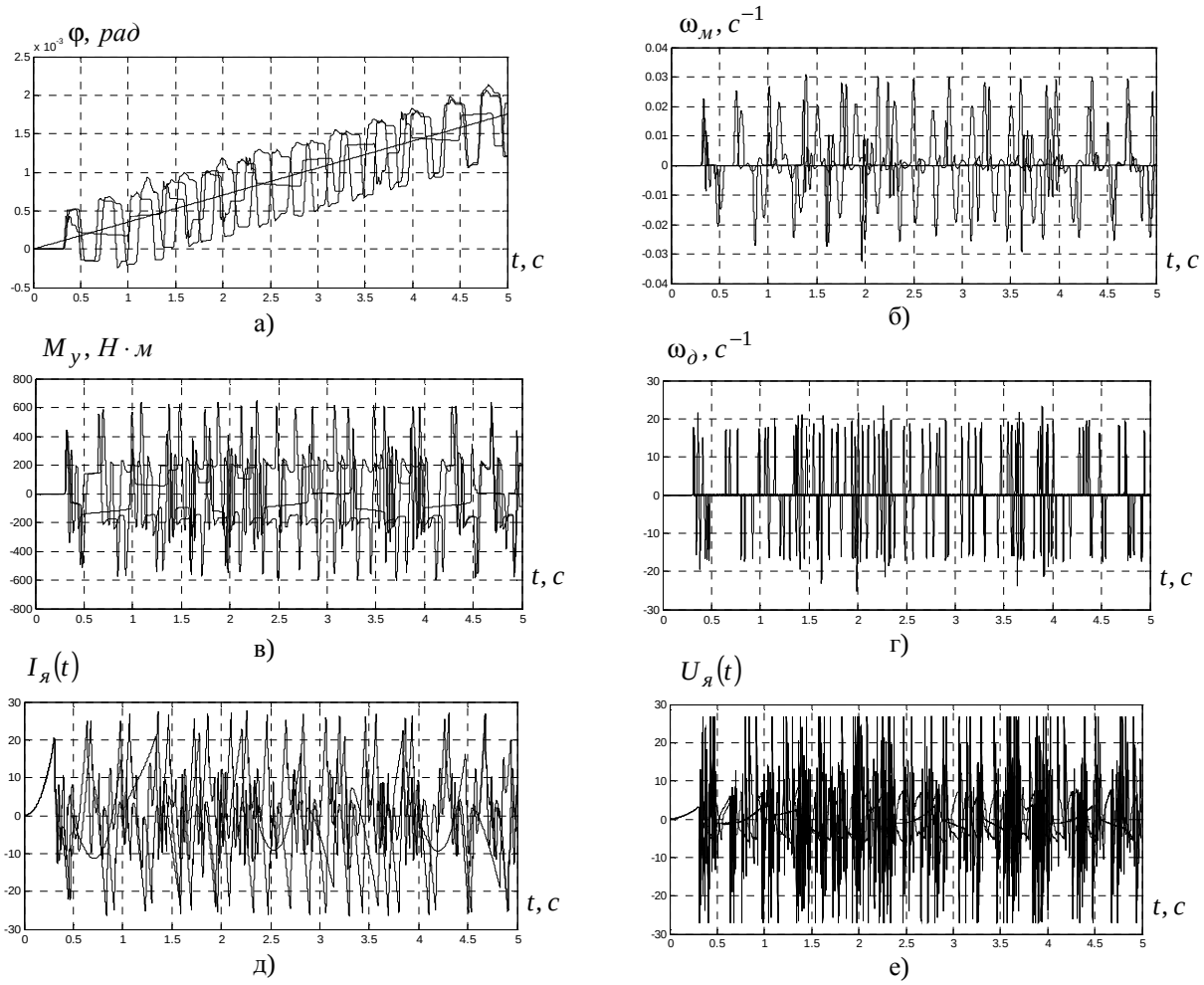


Рис. 1 Переходные процессы при наведении на малых скоростях (0,02град/с): а) угла поворота башенки $\varphi(t)$; б) скорости вращения башенки $\omega_м(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_д(t)$; д) тока двигателя $I_я(t)$; е) напряжения на якорной цепи двигателя $U_я(t)$.

Как видно из этого рисунка, при наведении объекта с малой скоростью установившаяся ошибка при отработке системой линейно-нарастающего сигнала равна нулю, однако движение рабочего органа сопровождается остановками и участками с изменением знака скорости движения относительно заданного значения угла поворота рабочего органа. В целом, несмотря на наличие двух интегрирующих звеньев регулятора для объекта управления, у которого имеется существенное сухое трение на валах двигателя и рабочего органа, система сохраняет устойчивость при изменении момента инерции объекта управления в заданных переделах.

Проведем теперь исследование динамических характеристик следящей электромеханической системы с синтезированным робастным регулятором с астатизмом второго порядка с учетом всех нелинейностей для трех различных значениях момента инерции объекта управления при наведении на больших скоростях. На рис. 2 показаны переходные процессы в электромеханической следящей системе при наведении на больших скоростях (6 град/с). На этом рисунке, так же как и на рис. 1, показаны следующие переменные состояния: а) угла поворота рабочего органа $\varphi(t)$; б) скорости вращения рабочего органа $\omega_м(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_д(t)$; д) тока двигателя $I_я(t)$; е) напряжения на якорной цепи двигателя $U_я(t)$.

Как видно из этого рисунка, при наведении объекта с большой скоростью установившаяся ошибка при отработке системой линейно-нарастающего сигнала равна нулю, и при этом рабочий орган движется достаточно плавно.

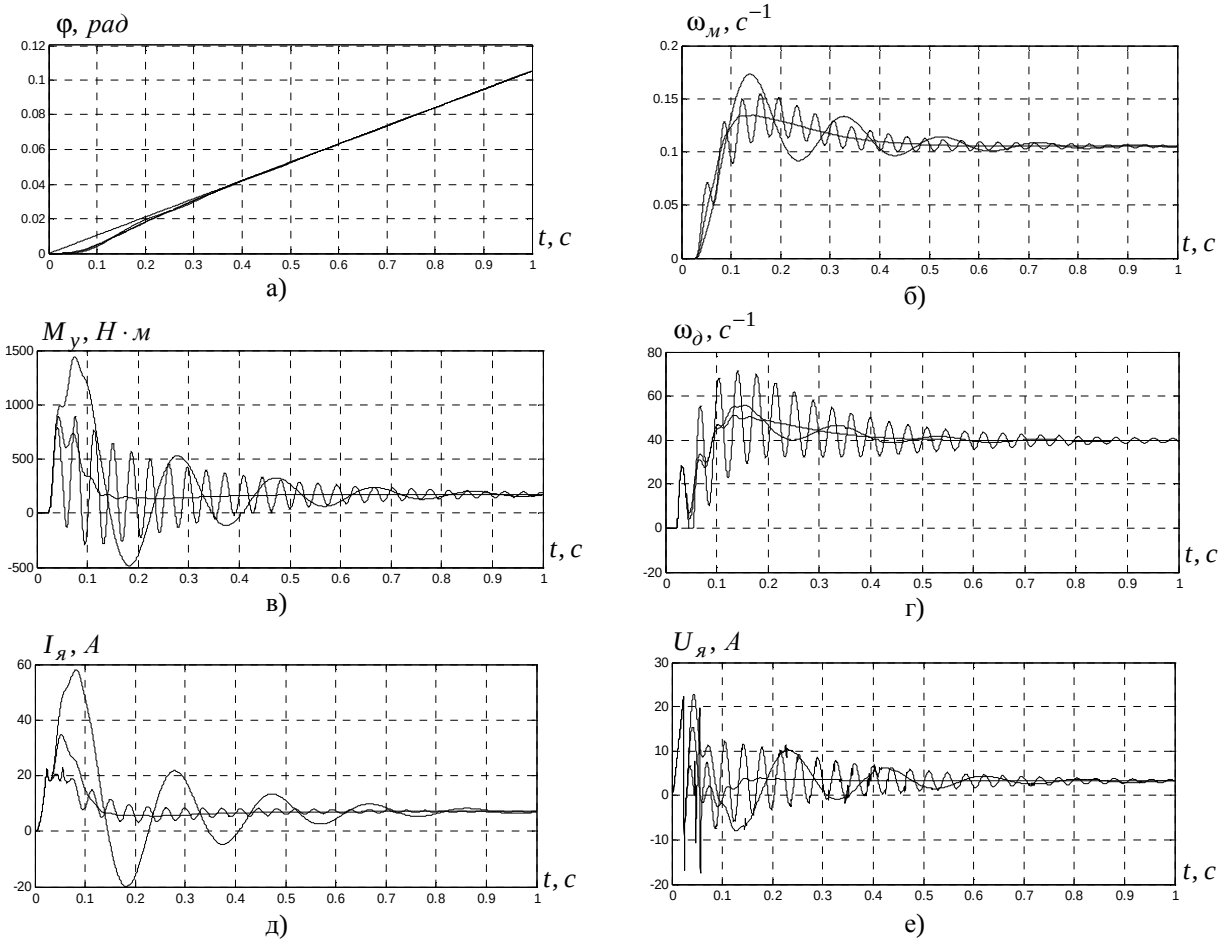


Рис. 2 Переходные процессы при наведении на больших скоростях (6 град/с): а) угла поворота башенки $\varphi(t)$; б) скорости вращения башенки $\omega_м(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_д(t)$; д) тока двигателя $I_я(t)$; е) напряжения на якорной цепи двигателя $U_я(t)$.

Выводы. Наличие нелинейных элементов, а также изменение параметров объекта управления в процессе работы электромеханических следящих систем оказывает влияние на динамические характеристики систем с синтезированными робастными регуляторами состояния. Однако их влияние на динамические характеристики системы с робастными регуляторами существенно меньше по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

В существующих следящих электромеханических системах применяют пропорционально - дифференциальный регулятор положения, так что система является статической. Введение интегральной составляющей в контуре регулирования положения приводит к возникновению незатухающих колебаний в связи с наличием сухого трения на валах исполнительного двигателя и рабочего механизма. В синтезируемой системе с робастным регулятором состояния реализован второй порядок астатизма за счет введения в контур управления двух

интегрирующих звеньев. Это позволило устранить установившуюся ошибку при отработке линейно нарастающего задающего воздействия, в то время как существующая система с пропорционально-дифференциальным регулятором имеет установившуюся статическую ошибку по положению рабочего органа.

Изменение момента инерции рабочего механизма в заданных пределах практически не приводит к изменению динамических характеристик синтезированной системы с робастным регулятором, в то время как в существующей системе с пропорционально-дифференциальным регулятором это изменение динамических характеристик существенно. Таким образом, синтезированная система с робастным регулятором обладает большей робастностью по отношению к изменению параметров объекта управления в сравнении.

Список литературы: 1. *Кузнецов Б.И.* Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем / *Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина,* М.О. Татарченко, *В.В.Хоменко* // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – С. 105 – 107. **2**. *Liu G.P.* Multiobjective Optimization and Control /*G.P. Liu, J.B. Yang, J.F. Whidborne*. – Research Studies Press Ltd, 2003. – 320 p. **3**. *Diamond P.* Anisotropy – based Performance Analysis of Linear Discrete Time Invariant Control Systems / *P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov* / Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42. **4**. *Kennedy J.* Swarm Intelligence / *J. Kennedy, R.C. Eberhart, Y. Shi*. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. **5**. *Clerc M*. Particle Swarm Optimization / *M. Clerc*. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. **6**. *Gazi V.* Swarm Stability and Optimization / *V. Gazi, K.M. Passino*. – Springer, 2011. – 318 p. **7**. *Xin-She Yang*. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications / *Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao,* Amir Hossein Gandomi, Mehmet Karamanoglu. – Elsevier Inc., 2013. – 450 p. **8**. *Kurdukov A.P*. Computing Anisotropic Optimal Controller for System with Parametric Uncertainty via Homotopy – based Algorithm / *A.P. Kurdukov, E.A. Maximov, M.M. Tchaikovsky*. – SicPro'06, Moscow, ICS, CD-ROM, 2006. **9**. *Kurdukov A.P.* Homotopy Method for Solving Anisotropy-based Stochastic H_∞ –optimization Problem with Uncertainty / *A.P. Kurdukov, E.A. Maximov, M.M. Tchaikovsky* / Proc. 5th IFAC Symposium on Robust Control Design. – Toulouse, France, CD-ROM, 2006. **10**. *Zilzter Eckart*. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimizations: Methods and Applications, Ph.D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1999. **11.** *Fonseca C.M.* An overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization / *C.M. Fonseca, P.J. Fleming* / Evolutionary Computation. – 1995. – Vol. 3. –№l. – Pp. 1–16. **12**. *Coello Coello C.A.* A Comprehensive Survey of Evolutionary-based Multiobjective Optimization Techniques / *C.A. Coello Coello* / Knowledge and Information Systems. – 1999. – Vol. 1.– №3. – Pp. 269 – 308. **13.** *Coello Coello C.A.* MOPSO: a Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization / *Coello Coello, Carlos A., Lechuga, Maximino Salazar* / Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2002. **14**. *Hu Xiaohui*. Multiobjective Optimization using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization / *Hu Xiaohui, Eberhart Russell C.* / Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2002. **15**. *Parsopoulos Konstantinos E*. Particle Swarms Optimization Method in Multiobjective Problems / *Parsopoulos Konstantinos E., Vrahatis, Michael N.* / Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing. – 2002. – Pp. 603 – 607.

Bibliography (transliterated): **1**. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Tatarchenko M.O., Khomenko V.V. "*Mnogokriterial'nyj sintez anizotropijnyh reguljatorov mnogomassovyh jelektromehanicheskih sistem*". *Tehnichna elektrodynamika.* no 4. 2014. 105 – 107. Print. **2**. Liu G.P., Yang J.B., Whidborne J.F. Multiobjective Optimization and Control, *Research Studies Press Ltd*, 2003. Print. **3**. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy – based Performance Analysis of Linear Discrete Time Invariant Control Systems. *Int. J. Control*. V. 74. 2001. 28 – 42. Print. **4**. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. Swarm Intelligence. *San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers*, 2001. Print. **5**. Clerc M. Particle Swarm Optimization. *London: ISTE Ltd*, 2006. Print. **6**. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization, *Springer*, 2011. Print. **7**. Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, and Mehmet Karamanoglu. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications. *Elsevier Inc*, 2013. Print. **8**. Kurdukov A.P., Maximov E.A., Tchaikovsky M.M. Computing Anisotropic Optimal Controller for System with Parametric Uncertainty via Homotopy – based Algorithm. *SicPro'06, Moscow: ICS*, 2006. CD-ROM. **9**. Kurdukov A.P., Maximov E.A., Tchaikovsky M.M. Homotopy Method for Solving Anisotropy-based Stochastic H_∞ –optimization Problem with Uncertainty, *Proc. 5th IFAC Symposium on R bust Control Design, Toulouse*, 2006. CD-ROM. **10.** Zilzter Eckart. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimizations: Methods and Applications, Ph.D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich. 1999. Print. **11**. Fonseca C.M., Fleming P.J. An overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization, *Evolutionary Computation.* No. l. 3. 1995. 1 – 16. Print. **12**. Coello Coello C.A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-based Multiobjective Optimization Techniques. *Knowledge and Information Systems*. No. 3. 1. 1999. 269 – 308. Print. **13**. Coello Coello, Carlos A., Lechuga, Maximino Salazar. MOPSO: a Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2002. Print. **14**. Hu Xiaohui, Eberhart Russell C. Multiobjective Optimization using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2002. Print. **15**. Parsopoulos Konstantinos E., Vrahatis, Michael N. Particle Swarms Optimization Method in Multiobjective Problems. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing.* 2002. 603 – 607. Print.

Поступила (received) 29.05.2015

УДК 62-83:621.77, 62-83:681.5

Е. В. ПОЛИЛОВ, канд. техн. наук, доц. ДонГТУ, Алчевск

О ГРАНИЦАХ ДОСТИЖИМОСТИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Актуальность работы. Зависимость эффекта всплеска от спектра матрицы **A** (и других ее характеристик) интересовала специалистов по теории управления с самого начала становления этой научной дисциплины. Пионерской работой в этом направлении явилась статья А. А. Фельдбаума [1] 1948 года. А. А. Фельдбаум получил ряд результатов о связи расположения корней с характеристиками переходного режима. Решения ограничены *частным случаем*, когда все корни вещественны, кроме, быть может, одной комплексной пары. Вопрос о существовании больших уклонений был поставлен в конце 1970-х годов В. Н. Полоцким в ряде работ; см., например, [2, 3]. Достаточно полный ответ на этот вопрос был получен Р. Н. Измайловым в [4] в 1987 году. Показано, что “сдвиг” всех полюсов влево (это способствует более быстрой асимптотической скорости затухания процесса) приводит к неизбежной плате за это – к большим уклонениям траектории на начальном участке. Эти важные результаты Измайлова были несколько обобщены в [5], а их более простое доказательство дано в [6]. Новым шагом было доказательство того, что и при малых собственных значениях возникают большие уклонения, см. [7, 8]; более того, эти эффекты присущи и другим расположениям полюсов. Существенно, но и сами авторы работ позиционируют решения лишь в оценке *нижней границы* всплеска, заведомо полагая, что всплеск всегда больший. В разы? На порядок? Много больший? Стратегическая ошибка сторонников представленного направления исследований и, посему, ставших де-факто полуэмпирическими их решениях – заключается в не учёте *взаимного местоположения* нулей и полюсов передаточной функции проектируемой замкнутой системы, желая пояснить процессы лишь терминами собственными значений матрицы динамики **A** .

Материал и результаты исследований.

Теорема. Для динамически изменяющихся корней $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ нестационарного полинома $f(p)=\sigma_n(t)\,p^n+\sigma_{n-1}(t)\,p^{n-1}+\ldots+\sigma_{n-j}(t)\,p^{n-j}+\ldots+\sigma_1(t)\,p+\sigma_0(t)$ в каждый квант времени $t=t_k$ справедливы формулы Виета:

$$\begin{cases}
\sum\limits_{1\le j\le n} c_j(t)=c_1(t)+\ldots+c_n(t)=-\dfrac{\sigma_{n-1}(t)}{\sigma_n(t)};\\
\sum\limits_{1\le j_1<j_2\le n} c_{j_1}(t)c_{j_2}(t)=c_1(t)c_2(t)+c_1(t)c_3(t)+\ldots+c_2(t)c_3(t)+\ldots+c_{n-1}(t)c_n(t)=\dfrac{\sigma_{n-2}(t)}{\sigma_n(t)};\\
\sum\limits_{1\le j_1<j_2<j_3\le n} c_{j_1}(t)c_{j_2}(t)c_{j_3}(t)=c_1(t)c_2(t)c_3(t)+c_1(t)c_2(t)c_4(t)+\ldots\\
+c_{n-2}(t)c_{n-1}(t)c_n(t)=-\dfrac{\sigma_{n-3}(t)}{\sigma_n(t)};\\
\vdots\\
\underbrace{\sum\limits_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}\underbrace{c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)}_{k\text{ множителей}}}_{C_n^k=\frac{n!}{(n-k)!k!}\text{ слагаемых в каждой }k\text{-й строке}}=(-1)^{2n-k}\dfrac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}\quad k-\text{я строка};\\
\ldots\\
c_1(t)c_2(t)\times\ldots\times c_n(t)=(-1)^n\dfrac{\sigma_0(t)}{\sigma_n(t)}\quad n-\text{я строка}.
\end{cases}\tag{1}$$

Здесь в левой части k-й формулы стоит сумма всевозможных произведений из k чисел, выбранных из $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ (корни учитываются в соответствии с их кратностями). Можно показать, что количество слагаемых в левой части k-й формулы равно $C_n^k=\dfrac{n!}{(n-k)!k!}$, т.е. числу сочетаний из n элементов по k элементов. Так, у полинома 10-го порядка во второй строке левой части формулы Виета количество слагаемых $C_{10}^2=45$. В третьей, например, пятой и девятой строках – $C_{10}^3=120$, $C_{10}^5=252$, $C_{10}^9=10$ соответственно.

Доказательство теорем опустим, концентрируя внимание лишь на содержательной части.

© Е.В. Полилов, 2015

Теорема. *Среднегеометрическое* местоположения мгновенных динамических решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ нестационарного алгебраического уравнения (для $\sigma_n(t)$ и $\sigma_0(t)$ – const)

$$\underbrace{\sigma_n(t)\,p^n+\underbrace{\left(\sigma_{n-1}(t)\,p^{n-1}+\ldots+\sigma_{n-j}(t)\,p^{n-j}+\ldots+\sigma_1(t)\,p\right)}_{\Theta_0(t,p)-\text{любой}}+\sigma_0(t)=0}_{\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right)\,\square\,\sqrt[n]{\sigma_0/\sigma_n}-const} \qquad (2)$$

на комплексной плоскости, $\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right)$, в любой квант времени t_k *неизменно*, и даже не зависит от моментов инжекции любого слагаемого $\sigma_{n-j}\left(t-\tau_j\right)p^{n-j}\ \forall\, j=\overline{1,n-1}$ вложенного полинома $\Theta_0(t,p)$, если это имеет место, равно как и их наличия или же отсутствия вовсе, а также численных значений множителей $\sigma_{n-j}(t)$, как функций времени.

Следствие 1. Местоположение на комплексной плоскости и динамика решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ нестационарного алгебраического уравнения $\sigma_n(t)\,p^n+\Theta_0(t,p)+\sigma_0(t)=0$ порождены *принципиальной невозможностью* сжатия или растяжения их среднегеометрического $\Omega_n(t)=\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right)$ содержимым вложенного полинома $\Theta(t,p)$, как радиуса R_i инварианта в $\underbrace{\sigma_n(t)\,p^n+\cancel{\Theta_0(t,p)}+\sigma_0(t)=0}_{\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right):\,R_i(t)=\sqrt[n]{\sigma_0(t)/\sigma_n(t)}}$. Решения $c_j(t)\ \forall\, j=\overline{1,n}$ в каждый квант времени t_k обладают уникальным феноменом самоорганизации и взаимного геометрического баланса в «командной игре» и противостоянии инжектируемым $\sigma_{n-j}\left(t-\tau_j\right)p^{n-j}\ \forall\, j=\overline{1,n-1}$. Уместно говорить о «сингулярности» (геометрического места бесконечного числа точек на длине окружности), пучке гравитации с известной геометрией $R_i=\Omega_n(t)$, *относительно которой* на комплексной плоскости в каждый квант времени t_k геометрически выстраиваются новые и новые мгновенные решения $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$. Творец Вселенной в силу нестационарности инжектируемых $\sigma_{n-j}\left(t-\tau_j\right)p^{n-j}\ \forall\, j=\overline{1,n-1}$ безынерционно перераспределяет число и позиции «игроков» $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ внутри и вне радиуса $R_i=\Omega_n(t)$, уравновешивая геометрический баланс рычага, опирающегося на «сингулярность».

Следствие 2. В любой квант времени t_k на карте распределения решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ нестационарного уравнения (2) окружность радиусом $R_i(t)=\sqrt[n]{\sigma_0(t)/\sigma_n(t)}$ и их среднегеометрическое $\Omega_n(t)=\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right)$ равны и *неизменны*. Тем самым, даже динамически изменяющиеся корни $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$, ввиду нестационарности множителей $\sigma_{n-j}\left(t-\tau_j\right)\ \forall\, j=\overline{1,n-1}$, как совокупность, оказываются *локализованы*, одним числом. Будем использовать термин радиус инварианта Полилова-Мотченко, R_i.

Пример. Сгенерируем два *случайных* полинома $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)=\left(R_{i(0)}:\alpha_m^*p^m,\alpha_{m-1}^*p^{m-1}\ldots\alpha_0^*\right)$ и $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)=\left(R_{i(\times)}:\beta_n^*p^n,\beta_{n-1}^*p^{n-1}\ldots\beta_0^*\right)$ различных степеней $m<n$ (радиусы инвариантов $R_{i(0)}$, $R_{i(\times)}$ умышленно разведём на несколько порядков для концентрации эффекта, и, даже не суть важно, $R_{i(0)}\,\square\,R_{i(\times)}$ или же, напротив, $R_{i(\times)}\,\square\,R_{i(0)}$. Гурвицевость полиномов необязательна, собственно, её и не требуем), из которых сформируем динамическую SISO-систему с передаточной функцией:

$$W_1\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)=k_0\frac{A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)}{B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)}=k_0\frac{\frac{\alpha_m^*}{R_{i(0)}^m}p^m+\frac{\alpha_{m-1}^*}{R_{i(0)}^{m-1}}p^{m-1}+\ldots+\frac{\alpha_{m-j}^*}{R_{i(0)}^{m-j}}p^{m-j}+\ldots+\frac{\alpha_1^*}{R_{i(0)}}p+\alpha_0^*}{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n+\frac{\beta_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1}+\ldots+\frac{\beta_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j}+\ldots+\frac{\beta_1^*}{R_{i(\times)}}p+\beta_0^*}, \qquad (3)$$

а также сгенерируем ещё один вспомогательный *случайный* полином

$G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)=\left(R_{i(\gamma)}:\gamma_n^* p^n,\gamma_{n-1}^* p^{n-1}\ldots\gamma_0^*\right)$ степени n с собственным, отличным от предыдущих $R_{i(0)}$ и $R_{i(\times)}$ радиусом $R_{i(\gamma)}$:

$$G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)=\frac{\gamma_n^*}{R_{i(\gamma)}^n}p^n+\frac{\gamma_{n-1}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-1}}p^{n-1}+\ldots+\frac{\gamma_{n-j}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-j}}p^{n-j}+\ldots+\frac{\gamma_1^*}{R_{i(\gamma)}}p\ +\gamma_0^*. \quad (4)$$

Обнулим свободный член $\cancel{\alpha_0^*\times 0}$, инжектируем старшую $\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n$ и нулевую β_0^* степени полинома $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)=\left(R_{i(\times)}:\boxed{\beta_n^* p^n},\beta_{n-1}^* p^{n-1},\ldots\boxed{\beta_0^*}\right)$ в числитель $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$ передаточной функции, а также дополним полученную конструкцию $A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ до старшей степени полинома $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$ коэффициентами соответствующих степеней полинома $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$:

$$W_2\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)=k_0\frac{A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)}{B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)}=k_0\frac{\left[\boxed{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n}+\underbrace{\frac{\gamma_{n-1}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-1}}p^{n-1}+\frac{\gamma_{n-2}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-2}}p^{n-2}+\ldots+\frac{\gamma_{m+1}^*}{R_{i(\gamma)}^{m+1}}p^{m+1}}_{\substack{R_{i(\gamma)},\,\gamma_i\text{ -любые, дополнение полинома}\\ \text{числителя } A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)\text{ до степени } n\ldots m}}+\underbrace{\frac{\alpha_m^*}{R_{i(0)}^m}p^m+\frac{\alpha_{m-1}^*}{R_{i(0)}^{m-1}}p^{m-1}+\ldots+\frac{\alpha_{m-j}^*}{R_{i(0)}^{m-j}}p^{m-j}+\ldots+\frac{\alpha_1^*}{R_{i(0)}}p\ +\cancel{\alpha_0^*\times 0}}_{A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)-\alpha_0^*}+\boxed{\beta_0^*}\right]}{\underbrace{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n+\beta_0^*}+\frac{\beta_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1}+\ldots+\frac{\beta_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j}+\ldots+\frac{\beta_1^*}{R_{i(\times)}}p}. \quad (5)$$

Удивительно, но в сгенерированной конструкции $W_2\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)$ среднегеометрические $\underset{j=\overline{1,n}}{gmean}\left(c_j^{(*)}(t)\right)\approx\sqrt[n]{\beta_0^*\frac{R_{i(\times)}^n}{\beta_n^*}}$ абсолютно разных по определению решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ и $c_1^*(t)$, $c_2^*(t)$, …, $c_n^*(t)$ полиномов «гремучей смеси» $A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ и случайного $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ *в каждый квант времени* t_k *одинаковы* для любых наборов случайных векторов **б***, **в*** и **г***, в т.ч. нестационарных $\alpha_i(t)$, $\beta_j(t)$ и $\gamma_j(t)$ $\forall$ $i=\overline{0,m}$; $j=\overline{0,n}$.

Фазовый переход принуждения старшей $\boxed{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n}$ степенью, концентрация и «скачок решений» $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$ и $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$ на орбите $R_{i(\times)}$ полинома $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ (поглощение и слияние всех былых концентрирующих орбит $R_{i(\gamma)}$ и $R_{i(0)}$, равно как и любых иных, если б «гремучая смесь» $A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ была составлена из большего числа вложенных полиномов) становятся очевидны, уравнивая коэффициенты одинаковых степеней тождества:

$$\underbrace{\boxed{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n}+\frac{\tilde{\beta}_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1}+\ldots+\frac{\tilde{\beta}_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j}+\ldots+\frac{\tilde{\beta}_1^*}{R_{i(\times)}}p\ +\boxed{\beta_0^*}}_{\text{новое состояние}}$$

$$\left\langle \begin{array}{l} \boxed{\dfrac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n} + \underbrace{\dfrac{\gamma_{n-1}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-1}}p^{n-1} + \dfrac{\gamma_{n-2}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-2}}p^{n-2} + \ldots + \dfrac{\gamma_{m+1}^*}{R_{i(\gamma)}^{m+1}}p^{m+1} +}_{\substack{R_{i(\gamma)},\ \gamma_i \text{ -любые, дополнение полинома} \\ \text{числителя } A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right) \text{ до степени } n\ldots m}} \\ \underbrace{+\dfrac{\alpha_m^*}{R_{i(0)}^m}p^m + \dfrac{\alpha_{m-1}^*}{R_{i(0)}^{m-1}}p^{m-1} + \ldots + \dfrac{\alpha_{m-j}^*}{R_{i(0)}^{m-j}}p^{m-j} + \ldots + \dfrac{\alpha_1^*}{R_{i(0)}}p + \cancel{\alpha_0^* \times 0} + \boxed{\beta_0^*}}_{A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)-\alpha_0^*} \end{array} \right\rangle, \qquad (6)$$

откуда

$$\frac{\gamma_{n-1}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-1}} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}};\ \frac{\gamma_{n-2}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-2}} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_{n-2}^*}{R_{i(\times)}^{n-2}};\ \ldots;\ \frac{\gamma_{m+1}^*}{R_{i(\gamma)}^{m+1}} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_{m+1}^*}{R_{i(\times)}^{m+1}};$$

$$\frac{\alpha_m^*}{R_{i(0)}^m} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_m^*}{R_{i(\times)}^m};\ \frac{\alpha_{m-1}^*}{R_{i(0)}^{m-1}} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_{m-1}^*}{R_{i(\times)}^{m-1}};\ \ldots;\ \frac{\alpha_{m-j}^*}{R_{i(0)}^{m-j}} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_{m-j}^*}{R_{i(\times)}^{m-j}};\ \ldots;\ \frac{\alpha_1^*}{R_{i(0)}} \sqcup \frac{\tilde{\beta}_1^*}{R_{i(\times)}}.$$

Здесь $\tilde{\beta}_{n-1}^* > \gamma_{n-1}^*$, если поглощена меньшая концентрирующая орбита $R_{i(\times)} > R_{i(\gamma)}$ и $\tilde{\beta}_{n-1}^* < \gamma_{n-1}^*$, если $R_{i(\times)} < R_{i(\gamma)}$. Рассуждения о величинах $\tilde{\beta}_{n-j}^*$ относительно α_{n-j}^*, $\forall j = \overline{m, n-1}$ аналогичны, учитывая радиус второй поглощённой $R_{i(0)}$.

Иными словами, инжектирование любой из компонент $\dfrac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n$ и β_0^* в полином $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right) = \left(R_{i(0)} : \alpha_m^* p^m, \alpha_{m-1}^* p^{m-1} \ldots \alpha_0^*\right)$ *безапелляционно* срывает его решения, переформатируя былой радиус притяжения $\cancel{R_{i(0)}} \to R_{i(\times)}$, как бы перестраивая каждый $\tilde{\beta}_{n-j}^*$, $j = \overline{1, n-1}$ в новую конструкцию-постулат:

$$A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right) = \boxed{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n} + \underbrace{\frac{\tilde{\beta}_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1} + \ldots + \frac{\tilde{\beta}_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j} + \ldots + \frac{\tilde{\beta}_1^*}{R_{i(\times)}}p}_{\text{иная интерпретация, в сущности неизменных величин}} + \boxed{\beta_0^*}, \qquad (7)$$

что, собственно, и изменяет геометрию относительных, $R_{i(\times)}$-кратных решений.

Это очевидно, поскольку инвариант с нулевыми вложениями $A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right) = \dfrac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n + \cancel{\underbrace{\dfrac{\tilde{\beta}_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1} + \ldots + \dfrac{\tilde{\beta}_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j} + \ldots + \dfrac{\tilde{\beta}_1^*}{R_{i(\times)}}p}_{\text{вложения} \times 0}} + \beta_0^* = 0$ априори является *отправной точкой*, донором всех n штук решений. n корней алгебраического уравнения инварианта $\beta_n p^n + \beta_0 = 0$ комплексно-сопряжённые, и на комплексной плоскости *строго равномерно* расположены на окружности радиусом $\Omega_{0(n)} = \sqrt[n]{\beta_0 / \beta_n}$ в центре $(0, j0)$ по границам секторов, кратных $2\pi / n$. Для нечётных n один из корней действительный $\left(-\Omega_{0(n)}, j0\right)$. Любой из вложенных $\dfrac{\tilde{\beta}_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j}$, $\forall j = \overline{1, n-1}$ лишь «искажает» гармонию корней $\beta_n p^n + \beta_0 = 0$ и уводит их с окружности $R_i(t) = \Omega_{0(n)}(t)$.

Последовательным вложением инвариантов младших $\dfrac{\tilde{\beta}_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j}$ степеней, по всей видимости, *геометрически возможно решать* алгебраические уравнения любого порядка. Полученные результаты выходят за рамки статьи и теории автоматического управления в целом, будут представлены отдельно.

Не менее ярка̀ по зрелищности и резистивность скопления решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$, феномен их самоорганизации и взаимного геометрического баланса в «командной игре» и противостоянии инжектируемым $\frac{\tilde{\beta}^*_{n-j}\left(t-\tau_j\right)}{R^{n-j}_{i(\times)}}p^{n-j}\ \forall\, j=\overline{1,n-1}$ с одной единственной миссией – удержания неизменными постулируемых границ инвариантов, $R_{i(\times)}$ и $R_{i(\gamma)}$, например. В каждый квант времени t_k на комплексной плоскости *безынерционно* перераспределяется число и позиции «игроков» $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ внутрь инварианта $R_i(t)=\Omega_{0(n)}(t)$, $1<z<n$ шт., и вне его, $n-z$ шт. соответственно, уравновешивая тем самым *изометрический* баланс виртуального рычага, опирающегося на периметр инварианта притяжения решений.

Положим, в одну из младших степеней $n-j$ полиномов $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ и $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$ инжектировано новое число $1{,}977\times10^{-5}$:

$$\frac{\beta^*_n}{R^n_{i(\times)}}\left\langle\frac{\gamma^*_n}{R^n_{i(\gamma)}}\right\rangle p^n+\frac{\beta^*_{n-1}}{R^{n-1}_{i(\times)}}\left\langle\frac{\gamma^*_{n-1}}{R^{n-1}_{i(\gamma)}}\right\rangle p^{n-1}+\ldots+\underbrace{\frac{\tilde{\beta}^*_{n-j}}{R^{n-j}_{i(\times)}}\left\langle\frac{\tilde{\gamma}^*_{n-j}}{R^{n-j}_{i(\gamma)}}\right\rangle}_{1{,}977\times10^{-5}}p^{n-j}+\ldots+\frac{\beta^*_1}{R_{i(\times)}}\left\langle\frac{\gamma^*_1}{R_{i(\gamma)}}\right\rangle p\ +\beta^*_0\left\langle\gamma^*_0\right\rangle. \tag{8}$$

Несмотря на постоянство $1{,}977\times10^{-5}\,p^{n-j}$, в силу различных $R_{i(\times)}$ и $R_{i(\gamma)}$, постулируемых в этой топологии крайними степенями $\frac{\beta^*_n}{R^n_{i(\times)}}\left\langle\frac{\gamma^*_n}{R^n_{i(\gamma)}}\right\rangle p^n$ и $\beta^*_0\left\langle\gamma^*_0\right\rangle$, одно и то же число $1{,}977\times10^{-5}$ совершенно по-разному $\frac{\tilde{\beta}^*_{n-j}}{R^{n-j}_{i(\times)}}\left\langle\frac{\tilde{\gamma}^*_{n-j}}{R^{n-j}_{i(\gamma)}}\right\rangle$ и будет интерпретировано в $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ и $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$, *предопределяя неодинаковые* $\tilde{\beta}^*_{n-j}\neq\tilde{\gamma}^*_{n-j}$. Они то, в свою очередь, и меняют геометрию относительных*, как факт и масштабируемых $R_{i(\times)}\left\langle R_{i(\gamma)}\right\rangle$-кратных решений.

Пример закончен.

Пример. Положим, нестационарные степенные коэффициенты $\sigma_{n-j}(t)\ \forall j=\overline{0,n-1}$ полинома

$$\underbrace{\underbrace{\sigma_n(t)\,p^n+\sigma_{n-1}(t)\,p^{n-1}+\ldots+\sigma_{n-j}(t)\,p^{n-j}+\ldots+\sigma_1(t)\,p}_{\sigma_{n-j}(t)=\pm1,\,\forall j=\overline{0,n-1}}+\underbrace{\sigma_0(t)}_{(a+jb)\text{-complex}}=0}_{\underset{j=\overline{1,n}}{\mathrm{gmean}}\left(c_j(t)\right)\,\sqrt[n]{\sigma_0(t)/\sigma_n(t)}-\mathrm{var}} \tag{9}$$

подобно битам, принимают лишь два значения ±1. Этот ход, не теряя общности, как если бы этот диапазон $[+1;-1]$ был заполнен и бесконечным числом дробных величин, последовательным перебором их комбинаций ±1 позволяет накопить банк 2^{n-1} решений $\left\langle c_1(t),\ c_2(t),\ \ldots,\ c_n(t)\right\rangle_j$, $j=\overline{1,2^{n-1}}$ для каждого $\sigma_0(t)$.

Тем самым, циклично меняя, например, действительную часть комплексного $\sigma_0(t)=a+jb$ при любом $b=const$, появляется возможность в бумаге, см. рис. 1, покадрово отразить и квази- динамику банка решений $\left\langle c_1(t),\ c_2(t),\ \ldots,\ c_n(t)\right\rangle_j$, $j=\overline{1,2^{n-1}}$ с изменяемым радиусом гравитации $R_{i(n)}=\Omega_n(t)=\mathrm{var}$:

$$\underbrace{\pm p^n\pm p^{n-1}\pm\ldots\pm p^{n-i}\pm\ldots\pm p\pm\underbrace{(a+jb)}_{\sigma_0(t)-\mathrm{var}}=0}_{\underset{j=\overline{1,n}}{\mathrm{gmean}}\left(c_j(t)\right)\,\sqrt[n]{\sigma_0(t)/\sigma_n(t)}-\mathrm{var}}. \tag{10}$$

Создана интерактивная оболочка, позволяющая визуализировать описанное полиномов любого порядка. Результаты исследований 7 полиномов высоких порядков, как неоспоримый аргумент в подтверждение изложенному, представлены видеорядом https://www.youtube.com/watch?v=rljidfK84_w. Радиус инварианта изменяется принудительно, открывая завесу построения качественных адаптивных законов управления *нестационарными динамическими объектами*, об этом позже.

Невероятной красоты клише, след движения корней полиномов $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)=\left(R_{i(\times)}:\beta_n^* p^n,\beta_{n-1}^* p^{n-1}\ldots\beta_0^*\right)$ различных степеней n в определённом диапазоне изменения коэффициентов $\left[\beta_{j\min}^*;\beta_{j\max}^*\right],\forall j=\overline{0,n}$, рис. 1. В это сложно поверить, но на палитре в каждый квант времени t_k лишь n штук точек, решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$! Последовательно перебирая возможные комбинации коэффициентов в заявленном диапазоне, накопительным «наслаиванием кадров» один на другой, динамически изменяя цветовую интенсивность местоположения банка решений при этом, по принципу горячо/холодно, там где они бывают чаще, подобно Творцу Вселенной, становится возможным запечатлеть «рождение и эволюцию» этих фрактальных образований. В клише отчётливо видны прорисованные градацией красного «пучки гравитации», концентрации и притяжения решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ геометрией $R_{i(n)}=\Omega_n(t)$, те самые среднегеометрические, инварианты.

Пример закончен.

В дальнейшем величины $R_{i(n)}=\Omega_n(t)$ будем использовать, как *меру «энергетического потенциала»* динамических систем.

Един ли «пучок гравитации» с геометрией $R_i=\Omega_n(t)$?

Чтобы ответить на этот вопрос, продолжим исследование формул Виеты. Коль скоро в каждой k-й строке C_n^k-штук слагаемых слева

$$\underbrace{\sum_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}\underbrace{c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)}_{k\text{ множителей}}}_{C_n^k=\frac{n!}{(n-k)!k!}\text{ слагаемых в каждой }k\text{-й строке}}\ \square\ (-1)^{2n-k}\frac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}, \tag{11}$$

логично было б усреднить обе части, разделив на их количество

$$\underbrace{\frac{1}{C_n^k}\left[\sum_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}\underbrace{c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)}_{k\text{ множителей}}\right]}_{\textit{среднеарифметическое}\text{ произведений}}\equiv\underbrace{\left|\frac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}\right|\times\frac{1}{C_n^k}}_{\substack{\text{знак отброшен умышленно,}\\ \text{поскольку ищем частоты }>0}} \tag{12}$$

и извлечь k корней для восстановления размерности $[рад/с]$:

$$\Omega_k(t)=\sqrt[k]{\frac{1}{C_n^k}\left[\sum_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)\right]}\ \square\ \frac{1}{\sqrt[k]{C_n^k}}\times\sqrt[k]{\left|\frac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}\right|}. \tag{13}$$

Получен массив частот $\Omega_k(t)$, $k=\overline{1,n}$, первый элемент которого – среднеарифметическое решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$, поскольку корень 1-ой степени не изменяет число:

$$\Omega_1(t)=\underbrace{\frac{1}{n}\sum_{1\le j\le n}c_j(t)=\frac{1}{n}\left(c_1(t)+\ldots+c_n(t)\right)}_{\text{очевидно, }\textit{среднеарифметическое корней }c_i(t)}\ \square\ \frac{1}{n}\times\frac{\sigma_{n-1}(t)}{\sigma_n(t)}; \tag{14}$$

последующие $n-2$ компонент – среднегеометрические среднеарифметических слагаемых *симметрических многочленов* $\underbrace{\sum_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}\underbrace{c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)}_{k\text{ множителей}}}_{C_n^k=\frac{n!}{(n-k)!k!}\text{ слагаемых в каждой }k\text{-й строке}}$ мгновенных динамических решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$:

$$\underbrace{\Omega_k(t)=\sqrt[k]{\frac{1}{C_n^k}\left[\sum_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)\right]}}_{\text{очевидно, }\textit{среднегеометрическое-среднеарифметического}}\ \square\ \frac{1}{\sqrt[k]{C_n^k}}\times\sqrt[k]{\left|\frac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}\right|},\ k=\overline{2,n-1} \tag{15}$$

и, наконец, последний элемент – среднегеометрическое решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$:

$$\Omega_n(t)=\underbrace{\sqrt[n]{c_1(t)c_2(t)\times\ldots\times c_n(t)}=\left(\prod_{i=1}^{n}c_i(t)\right)^{1/n}}_{\text{очевидно, } среднегеометрическое\ корней\ c_i(t)}\cdot\sqrt[n]{\left|\frac{\sigma_0(t)}{\sigma_n(t)}\right|}. \qquad (16)$$

Рис. 1 Клише, след движения корней полинома 21-го и 24-го порядка.
Цветовая интерпретация по принципу горячо/холодно, там где они бывают чаще. Оси {-2-2i, 2+2i}

Рис. 2 Карты распределения 34 нулей (0) и 55 полюсов (x) по Баттерворту стационарной динамической системы Б-34/55 (среднегеометрические $R_{i(0)}=2,5\ рад/с$ и $R_{i(\times)}=50\ рад/с$)

Рис. 3 Точки перегиба $\max\limits_{t=0,\infty}h(t)$ *семейства* ста переходных характеристик $h(t)$ стационарной динамической системы Б-34/55, и одна из них $h(t)$ в точке с $R_{i(\times)}=50,0\ рад/с$ и $k=20$

Теорема. *Среднеарифметическое* $\Omega_1(t)=\frac{1}{n}\sum\limits_{1\le j\le n}c_j(t)$ местоположения мгновенных динамических решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ нестационарного алгебраического уравнения (для $\sigma_n(t)$ и $\sigma_{n-1}(t)$ – const)

$$\underbrace{\sigma_n(t)p^n+\sigma_{n-1}(t)p^{n-1}+\underbrace{\left(\sigma_{n-2}(t)p^{n-2}+\ldots+\sigma_{n-j}(t)p^{n-j}+\ldots+\sigma_0(t)\right)}_{\Theta_1(t,p)-любой}=0}_{\underset{j=1,n}{\text{mean}}\left(c_j(t)\right)\ \frac{1}{n}\times\frac{\sigma_{n-1}(t)}{\sigma_n(t)}\to const} \qquad (17)$$

на комплексной плоскости, $\underset{j=1,n}{\text{mean}}\left(c_j(t)\right)$, в любой квант времени t_k *неизменно*, и даже не зависит от моментов инжекции любого слагаемого $\sigma_{n-j}\left(t-\tau_j\right)p^{n-j}\ \forall\ j=\overline{2,n}$ вложенного полинома $\Theta_1(t,p)$, если это имеет место, равно как и их наличия или же отсутствия вовсе, а также численных значений множителей $\sigma_{n-j}(t)$, как функций времени.

Имеют место Следствие 1 и Следствие 2, по аналогии с предыдущей теоремой, замещением понятий среднегеометрического $\Omega_n(t)=\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right)$ на среднеарифметическое $\Omega_1(t)=\underset{j=1,n}{\text{mean}}\left(c_j(t)\right)$.

Пример. Используем полиномы $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$, $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ и $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$ предыдущего методического примера. Инжектируем старшие степени $\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n$ и $\frac{\beta_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1}$ полинома $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)=\left(R_{i(\times)}:\beta_n^*p^n,\beta_{n-1}^*p^{n-1}\ldots\beta_0^*\right)$ в числитель $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)=\left(R_{i(0)}:\alpha_m^*p^m,\alpha_{m-1}^*p^{m-1}\ldots\alpha_0^*\right)$ ПФ, а также дополним полученную конструкцию $A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ до старшей степени полинома $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$ коэффициентами соответствующих степеней $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)=\left(R_{i(\gamma)}:\gamma_n^*p^n,\gamma_{n-1}^*p^{n-1}\ldots\gamma_0^*\right)$:

$$W_3\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)=k_0\frac{A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)}{B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)}=k_0\frac{\left[\underbrace{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n+\frac{\beta_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1}}+\underbrace{\frac{\gamma_{n-2}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-2}}p^{n-2}+\frac{\gamma_{n-3}^*}{R_{i(\gamma)}^{n-3}}p^{n-3}+\ldots+\frac{\gamma_{m+1}^*}{R_{i(\gamma)}^{m+1}}p^{m+1}}_{\substack{R_{i(\gamma)},\ \gamma_i\text{ -любые, дополнение полинома}\\ \text{числителя } A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)\text{ до степени } n\ldots m}}+\underbrace{\frac{\alpha_m^*}{R_{i(0)}^m}p^m+\frac{\alpha_{m-1}^*}{R_{i(0)}^{m-1}}p^{m-1}+\ldots+\frac{\alpha_{m-j}^*}{R_{i(0)}^{m-j}}p^{m-j}+\ldots+\frac{\alpha_1^*}{R_{i(0)}}p+\alpha_0^*}_{A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)}\right]}{\underbrace{\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n+\frac{\beta_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}p^{n-1}+\ldots+\frac{\beta_{n-j}^*}{R_{i(\times)}^{n-j}}p^{n-j}+\ldots+\frac{\beta_1^*}{R_{i(\times)}}p+\beta_0^*}_{B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)}}. \quad (18)$$

Удивительно, но в сгенерированной конструкции $W_3\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)$ среднеарифметические $\underset{j=1,n}{\text{mean}}\left(c_j^{(*)}(t)\right)\square\frac{1}{n}\times\frac{\beta_{n-1}^*}{R_{i(\times)}^{n-1}}\frac{R_{i(\times)}^n}{\beta_n^*}$ абсолютно разных по определению решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ и $c_1^*(t)$, $c_2^*(t)$, …, $c_n^*(t)$ полиномов «гремучей смеси» $A'\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ и случайного $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)=\left(R_{i(\times)}:\beta_n^*p^n,\beta_{n-1}^*p^{n-1}\ldots\beta_0^*\right)$ *в каждый квант времени* t_k *одинаковы* для любых наборов случайных векторов **б***, **в*** и **г***, в т.ч. нестационарных $\alpha_i(t)$, $\beta_j(t)$ и $\gamma_j(t)$ $\forall\ i=\overline{0,m}$; $j=\overline{0,n}$. Пример закончен.

Теорема. *Среднегеометрическое* $\Omega_k(t)=\sqrt[k]{\frac{1}{C_n^k}\left[\sum_{1\le j_1<j_2<\ldots<j_k\le n}c_{j_1}(t)\times\ldots\times c_{j_k}(t)\right]}$ *среднеарифметических* слагаемых симметрических многочленов мгновенных динамических решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ k-нестационарных алгебраических уравнений (для $\sigma_n(t)$ и $\sigma_{n-k}(t)$ – const)

$$\underbrace{\sigma_n(t)p^n+\sigma_{n-k}(t)p^{n-k}+\underbrace{\left(\sigma_{n-1}(t)p^{n-1}+\ldots+\sigma_{n-j_k}(t)p^{n-j_k}+\ldots+\sigma_0(t)\right)}_{\Theta_k(t,p)-\textit{любой},\quad k=\overline{2,n-1};\ j_k=\overline{2,n-1}\ne k}=0}_{\Omega_k(t)=ga\underset{j=1,n}{\text{mean}}\left(c_j(t)\right)\square\frac{1}{\sqrt[k]{C_n^k}}\times\sqrt[k]{\left|\frac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}\right|}-const,\quad C_n^k=\frac{n!}{(n-k)!k!}} \quad (19)$$

на комплексной плоскости, $ga\underset{j=1,n}{\text{mean}}\left(c_j(t)\right)$, в любой квант времени t_k *неизменно*, и даже не зависит от моментов инжекции любого слагаемого $\sigma_{n-j_k}\left(t-\tau_{j_k}\right)p^{n-j_k}$ $\forall\ j_k=\overline{2,n-1}\ne k$ вложенного полинома $\Theta_k(t,p)$, если это имеет место, равно как и их наличия или же отсутствия вовсе, а также численных значений множителей $\sigma_{n-j_k}(t)$, как функций времени.

Имеют место Следствие 1 и Следствие 2, по аналогии с предыдущей теоремой, замещением соответствующих понятий.

Пример. Используем полиномы $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$, $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ и $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$ предыдущего методического примера. Поочерёдно инжектируем пары степеней $\frac{\beta_n^*}{R_{i(\times)}^n}p^n$ и $\frac{\beta_{n-k}^*}{R_{i(\times)}^{n-k}}p^{n-k}$, $\forall k=\overline{2,n-1}$ полинома $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ в числитель $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$ ПФ, а также дополним каждую полученную конструкцию $A'_k\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ до старшей степени полинома $A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)$ коэффициентами соответствующих степеней полинома $G\left(p_{\Omega_{(\gamma)}}\right)$:

$$W_{4,k}\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)=k_0\frac{A'_k\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)}{B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)}=k_0\frac{\left[\underbrace{\frac{\beta^*_n}{R^n_{i(\times)}}p^n+\frac{\beta^*_{n-k}}{R^{n-k}_{i(\times)}}p^{n-k}}+\underbrace{\frac{\gamma^*_{n-1}}{R^{n-1}_{i(\gamma)}}p^{n-1}+\ldots+\frac{\gamma^*_{n-l_k}}{R^{n-l_k}_{i(\gamma)}}p^{n-l_k}+\frac{\gamma^*_{m+1}}{R^{m+1}_{i(\gamma)}}p^{m+1}}_{\substack{R_{i(\gamma)},\,\gamma_i\text{ -любые, дополнение полинома}\\ \text{числителя }A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)\text{ до степени }n\ldots m}}+\right.}{\underbrace{\left.+\frac{\alpha^*_m}{R^m_{i(0)}}p^m+\frac{\alpha^*_{m-1}}{R^{m-1}_{i(0)}}p^{m-1}+\ldots+\frac{\alpha^*_{m-j}}{R^{m-j}_{i(0)}}p^{m-j}+\ldots+\frac{\alpha^*_1}{R_{i(0)}}p+\alpha^*_0\right]}_{A\left(p_{\Omega_{(0)}}\right)}}}{\underbrace{\frac{\beta^*_n}{R^n_{i(\times)}}p^n+\frac{\beta^*_{n-k}}{R^{n-k}_{i(\times)}}p^{n-k}}+\frac{\beta^*_{n-1}}{R^{n-1}_{i(\times)}}p^{n-1}\ldots+\frac{\beta^*_{n-j_k}}{R^{n-j_k}_{i(\times)}}p^{n-j_k}+\ldots+\frac{\beta^*_1}{R_{i(\times)}}p+\beta^*_0}. \quad (20)$$

Удивительно, но в каждой сгенерированной конструкции $W_{4,k}\left(p_{\Omega_{(0,\times)}}\right)$, $\forall k=\overline{2,n-1}$ среднегеометрические среднеарифметических $\underset{j=\overline{1,n}}{ga\text{mean}}\left(c_j(t)\right)\square\frac{1}{\sqrt[k]{C^k_n}}\times\sqrt[k]{\left|\frac{\sigma_k(t)}{\sigma_n(t)}\right|}$ абсолютно разных по определению решений $\left[c_1(t),\ c_2(t),\ \ldots,\ c_n(t)\right]_k$ и $c^*_1(t),\ c^*_2(t),\ \ldots,\ c^*_n(t)$ полиномов «гремучей смеси» $A'_k\left(p_{\Omega'_{(0)}}\right)$ и случайного $B\left(p_{\Omega_{(\times)}}\right)$ *в каждый квант времени* t_k *одинаковы* для любых наборов случайных векторов **б***, **в*** и **г***, в т.ч. нестационарных $\alpha_i(t)$, $\beta_j(t)$ и $\gamma_j(t)$ $\forall\ \ i=\overline{0,m}$; $j=\overline{0,n}$. Пример закончен.

Иными словами, на комплексной плоскости n-«сингулярностей» (геометрического места бесконечного числа точек на длинах окружностей), пучков гравитации с известной геометрией $R_{i(k)}=\Omega_k(t)$, определяющих правила самоорганизации и взаимного геометрического баланса решений $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_n(t)$ в «командной игре» и противостоянии инжектируемым $\sigma_{n-j}\left(t-\tau_j\right)p^{n-j}\ \forall\ j=\overline{1,n}$.

Теорема. Верхняя грань переходной характеристики $h(t)$ устойчивой нестационарной динамической системы, описываемой линейной передаточной функцией

$$W(p)=k_0\frac{A(p)}{B(p)}=k_0\frac{\sum\limits_{i=0}^{m}\alpha_{m-i}(t)\,p^{m-i}}{\sum\limits_{j=0}^{n}\beta_{n-j}(t)\,p^{n-j}}\quad\forall\,m\le n \quad (21)$$

однозначно определяется среднегеометрическими $\Omega_m(t)=\underset{i=\overline{1,m}}{\text{gmean}}\left(c_i(t)\right)$ и $\Omega_n(t)=\underset{j=\overline{1,n}}{\text{gmean}}\left(c_j(t)\right)$ корней $c_1(t)$, $c_2(t)$, …, $c_{m+n}(t)$ полиномов числителя $A(p)$ и знаменателя $B(p)$ (как *энергетической* количественной меры сил $k=R_{i(\times)}/R_{i(0)}$ сингулярностей двух полиномов $k<1$, $k=1$ и $k>1$):

$$\max_{t=0,\infty}h(t)=\underbrace{M}_{\substack{\text{множитель}\\ \text{(не зависит от}\\ \textit{геометрии}\text{ нулей}\\ \text{и полюсов ПФ)}}}\times\underbrace{\left(R_{i(\times)}/R_{i(0)}\right)^m}_{\substack{k\text{ –кратность}\\ \text{среднегеометрических,}\\ \text{корней полиномов}\\ \text{числителя }A(p)\text{ и}\\ \text{знаменателя }B(p)\text{ ПФ}}}=$$

$$=M\times\left(\left(\prod_{i=1}^{n}c_i(t)\right)^{1/n}\Big/\left(\prod_{j=1}^{m}c_j(t)\right)^{1/m}\right)^m=M\times\underbrace{\frac{\alpha_m(t)}{\alpha_0(t)}\left(\beta_0(t)/\beta_n(t)\right)^{m/n}}_{\substack{\text{категориями коэффициентов}\\ \text{полиномов числителя }A(p)\\ \text{и знаменателя }B(p)\text{ ПФ}}}\Bigg|_{t=t_0}, \quad (22)$$

где $R_{i(0)}(t)=\sqrt[m]{\alpha_0(t)/\alpha_m(t)}$ и $R_{i(\times)}(t)=\sqrt[n]{\beta_0(t)/\beta_n(t)}$ – радиусы инвариантов Полилова-Мотченко (*среднегеометрические* m-шт. нулей (0) и n-шт. полюсов $(\times)$ терминами классической теории автоматического управления).

Множитель $M\equiv 1\ (k_0)\ \forall m=n$ и $M\ \square\ 1\ (k_0)\ \forall m<n$.

Доказательство теоремы осуществлено восстановлением аналитической зависимости $\max\limits_{t=0,\infty} h(t)=f(k)$ вычислительными алгоритмами MATLAB Curve Fitting Toolbox, решая оптимизационную задачу минимизации целевой функции (среднеквадратичной ошибки приближения) при подборе параметров a, b и c в стандартной power2 нелинейной параметрической модели $y=a\cdot x^b+c$, приближающей данные, полагая x и y известными. Общее количество точек перегиба $\max\limits_{t=0,\infty} h(t)$ семейств исследованных переходных характеристик $h(t)$ более 600 (на каждой подобной картинке, см. рис.3, 100 снежинок, 100 динамических систем, 100 модельных экспериментов, 100 всплесков и 100 точек перегиба). Каждая точка *идеально вписана* в соответствующую восстановленную нелинейную параметрическую модель $\max\limits_{t=0,\infty} h(t)=a\cdot x^b+c$, что в точности соответствует заявленному в (22) закону. **Крайне показателен и удивителен результат**, в каждом двустолбцовом массиве splash ведь нет ничего, кроме вещественных чисел $k=[1;2;\ldots;100]$ и амплитуд всплеска $\max\limits_{t=0,\infty} h(t)$ семейства динамических систем, и, когда оболочка Curve Fitting *из ниоткуда* выписывает степени $b\ \square\ m$?! дополняя модель $a\cdot x^b+c$ нулевым свободным членом $c\ \square\ 0$?! решения каждой k-итерации сквозь призму преобразований Лапласа?! дифференциальное уравнение относительно $f(t)$ → Z-преобразование → *алгебраическое уравнение относительно изображения* $F(p)$, *его корни* → изображение $F(p)$ → Z^{-1}-преобразование → *искомая функция* $f(t)$ *и всплеск*?! тоннель между пространством изображений и оригиналов?!

Уместно задуматься о фундаментальности сложившегося паззла…

Выводы. Впервые представлена аналитическая зависимость точки перегиба $\max\limits_{t=0,\infty} h(t)$ т.н. феномена всплеска в управлении динамическими системами произвольного порядка. Всплеск с лёгкостью может быть сгенерирован умышленно в любой передаточной функции с наперёд заданными порядками полиномов числителя и знаменателя $m\le n$, любой геометрии нулей и полюсов, их местоположении относительно мнимой оси, и, что особо примечательно, любой амплитуды. Генерация, как, впрочем, и зеркально противоположное – исключение всплеска, сводятся к примитиву смещения радиусов среднегеометрических $R_{i(\times,0)}\to shift$ корней полиномов числителя и знаменателя «генерирующей» передаточной функции. Терминами (21)-(22) могут быть решены и иные задачи, например, оценки и ограничения реакции замкнутой системы на единичное возмущение $1(t)$, управление по выходу, задачи фильтрации, прогноз амплитуд управлений $\mathbf{u}$ любой динамической системы известными законами управления для режимов слежения и стабилизации, и мн. др.

Условие $R_{i(\times)}/R_{i(0)}<1$ (быстрые нули) есть мерой гарантированного невозникновения всплеска на любых удалениях кластеров корней ПФ любого порядка $m\le n$ от мнимой оси. Величина $R_{i(\times)}/R_{i(0)}$ открывает принципиально иные грани теории управления, являя более естественную с философской точки зрения меру в сравнении с вымышленными H_2, H_∞ и пр. нормами. Тупик ветки «площадных» и «пиковых» норм очевиден, если понять, что любые результаты робастного 1:1 дублируемы в рамках примитива модального управления, зная карту попадания нулей/полюсов. И, никак не наоборот, говоря о качественной динамике, кликом мыши сосчитанной в модальном. Любая робастность достижима, запасом: $U_{\max}>M\left(R_{i(\times)}/R_{i(0)}\right)^m$.

Смещение радиусов среднегеометрических $R_{i(\times,0)}\to shift$ может быть найдено и в классе оптимизационных задач, быть мерой в задачах гарантии робастности к параметрическим $\mathbf{A}+\Delta\mathbf{A}$ адаптивных и неадаптивных законов управления. Достижимые результаты *любых иных методов счёта* k_{ij} известной теории управления поглощены предложенной мерой, легко повторимы, $R_{i(\times,0)}\to shift$. Очевидно, колоссальные уровни управлений нереализуемы, физически. Абсурдна даже мысль угнаться за подобным. Задача нами умышленно представлена так, чтоб выпятить, её, ту самую хрупкую грань достижимости теории автоматического управления $R_{i(\times)}/R_{i(0)}<1$. Иное иллюзии.

Список литературы: 1. *Фельдбаум А. А.* О распределении корней характеристического уравнения систем регулирования // АиТ. 1948. No4. С. 253–279. **2**. *Полоцкий В. Н.* О максимальных ошибках асимптотического идентификатора состояния // АиТ. 1978. No8. С. 26–32. **3**. *Полоцкий В. Н.* Оценки состояния линейных систем с одним выходом при помощи наблюдающих устройств // АиТ. 1980. No12. С. 18–29. **4**. *Измайлов Р. Н.* Эффект “всплеска” в стационарных линейных системах со скалярными входами и выходами // АиТ. 1987. No8. С. 56–62. **5**. *Sussmann H. J., Kokotovic P. V.* The peaking phenomenon and the global stabilization of nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1991. Vol. 36. No. 4. P. 424–439. **6**. *Bushenkov V., Smirnov G.* Stabilization Problems with Constraints: Analysis and Computational Aspects. Amsterdam: Gordon and Breach, 1997. **7**. *Smirnov G., Bushenkov V., Miranda F.* Advances on the transient growth quantification in linear control systems // International Journal of Applied Mathematics and Statistics. 2009. Vol. 14. P. 82–92. **8**. *Polyak B. T., Smirnov G. V.* Large deviations in continuous-time linear single-input control systems // 19th IFAC World Congress. Cape Town, South Africa, August 24–29, 2014. **9**. *Полилов Е. В.* Феномен всплеска в управлении динамическими системами [Текст] // Электротехнические и компьютерные системы – К.: Техника. –2014. – № 15 (91). – С.25-35. **10**. *Полилов Е. В.* и др. Стратегии качественного управления многомассовыми электромеханическими системами [Текст] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36(1009). – С.86-96.

Bibliography (transliterated): 1. Fel'dbaum A. A. O raspredelenii kornei kharakteristicheskogo uravneniya sistem regulirovaniya // AiT. 1948. No4. C. 253–279. **2**. Polotskii V. N. O maksimal'nykh oshibkakh asimptoticheskogo identifikatora sostoyaniya // AiT. 1978. No8. S. 26–32. **3**. Polotskii V. N. Otsenki sostoyaniya lineinykh sistem s odnim vykhodom pri pomoshchi nablyudayushchikh ustroistv // AiT. 1980. No12. S. 18–29. **4**. Izmailov P. N. Effekt “vspleska” v statsionarnykh lineinykh sistemakh so skalyarnymi vkhodami i vykhodami // AiT. 1987. No8. S. 56–62. **5**. Sussmann H. J., Kokotovic P. V. The peaking phenomenon and the global stabilization of nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1991. Vol. 36. No. 4. P. 424–439. **6**. Bushenkov V., Smirnov G. Stabilization Problems with Constraints: Analysis and Computational Aspects. Amsterdam: Gordon and Breach, 1997. **7**. Smirnov G., Bushenkov V., Miranda F. Advances on the transient growth quantification in linear control systems // International Journal of Applied Mathematics and Statistics. 2009. Vol. 14. P. 82–92. **8**. Polyak B. T., Smirnov G. V. Large deviations in continuous-time linear single-input control systems // 19th IFAC World Congress. Cape Town, South Africa, August 24–29, 2014. **9**. Polilov E. V. Fenomen vspleska v upravlenii dinamicheskimi sistemami [Tekst] // Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy – K.: Tekhnika. –2014. – № 15 (91). – S.25-35. **10**. Polilov E. V. i dr. Strategii kachestvennogo upravleniya mnogomassovymi elektromekhanicheskimi siste-mami [Tekst] // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». – Kh.: NTU «KhPI». – 2013. – № 36(1009). – S.86-96.

Поступила (received) 02.09.2015

УДК 681.5.033+681.587’57

А.А. ХУДЯЕВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ИТЕРАЦИОННОГО ДВУХКАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ С ДВУМЯ ВИНТОВЫМИ ПАРАМИ

Постановка задачи. Одним из наиболее простых и надежных вариантов технической реализации высокоточных итерационных следящих электроприводов (ЭП) является двухканальный привод с суммирующим дифференциальным редуктором – механическим дифференциалом (МД) [1,2]. Однако в соответствующем двухканальном дифференциальном ЭП механизма подачи (МП), например станка, значительно повышается инерционность приводного механизма (ПМ) по сравнению с аналогичным одноканальным безредукторным ЭП подачи [3]. Кроме того, двухканальный ЭП с МД теряет возможность эффективной реализации режима последовательно-параллельной работы отдельных приводов, обеспечивающего итерационным следящим системам с разделенной нагрузкой сравнительный выигрыш в быстродействии при любых допустимых задающих воздействиях. Отмеченные свойства отрицательно сказываются на динамических возможностях двухканальных дифференциальных ЭП МП и при определенных значениях управляющих сигналов по положению приводят к проигрышу таких приводов в быстродействии по сравнению с традиционными одноканальными ЭП подачи [3]. Полностью устранить данный недостаток двухканальных ЭП подачи с МД не удается не только нежелательным повышением мощности исполнительных двигателей (ИД) приводов каналов управления, но и повышением быстродействия силовой части второго, уточняющего привода. В работе в качестве альтернативного варианта двухканальному дифференциальному ЭП МП предлагается двухканальный ЭП подачи инерционного рабочего органа (РО) на базе двухдвигательного безредукторного МП с двумя винтовыми парами (ВП), реализующего механическую безлюфтовую передачу движений с двумя степенями свободы и обеспечивающего возможность частичного разделения нагрузки.

Целью работы является построение упрощенной схемы конструкции, получение кинематической схемы и математической модели движения (с учетом динамического взаимовлияния между каналами по нагрузке) итерационного двухканального ЭП на базе двухдвигательного безредукторного МП с двумя ВП применительно к подаче РО тяжелого координатного многоцелевого металлорежущего станка с ЧПУ особо высокой точности модели 24К70АФ4.

Материал исследования. Предлагаемый итерационный двухканальный ЭП МП с двумя ВП включает первый (основной) К-1 и второй (уточняющий) К-2 каналы управления по углу с соответствующими подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум. Основной канал К-1 используется для управления приводом вращения ходового винта (ХВ1) первой ВП (ВП1), а уточняющий канал К-2 – приводом вращения ходового винта (ХВ2) второй ВП (ВП2). Такой двухканальный ЭП при условии компенсации в нем (с помощью блока компенсаторов $C_{12}\text{-}C_{21}$) негативного динамического взаимовлияния каналов (ДВВК) по нагрузке, обусловленного наличием общих элементов в ПМ, может быть отнесен к классу собственно итерационных многоканальных систем автоматического управления (САУ) [4].

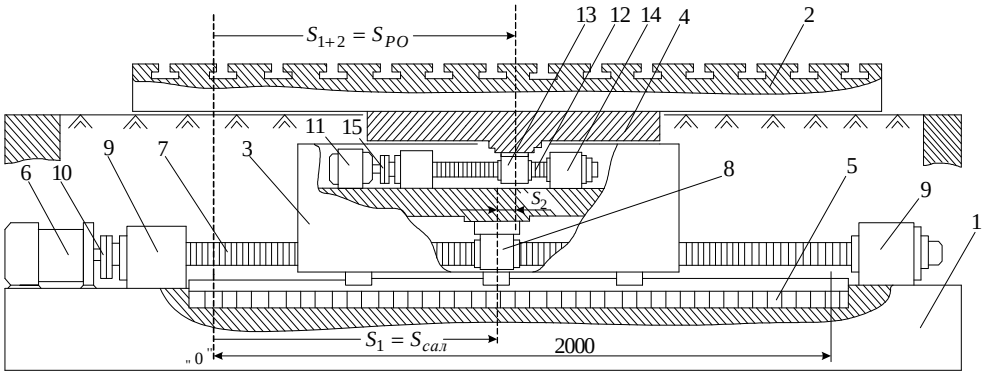


Рис. 1. Вариант упрощенной схемы конструкции двухдвигательного безредукторного МП с двумя ВП для продольной (ось X) подачи РО (рабочего стола с изделием) металлорежущего станка

В основном канале К-1 двухканального ЭП предполагается использовать современный комплектный транзисторный ЭП постоянного тока с силовой частью типа ШИП-ДПТ, например модуль регулирования серии MR-DC, а в уточняющем канале К-2 − широкополосный ЭП переменного тока с частотно-токовым векторным управлением (типа ПЧТ-АД). В качестве ИД Д1 основного и Д2 уточняющего приводов двухканального ЭП могут быть использованы соответственно высокомоментный ДПТ с постоянными магнитами серии 2ПБВ типа 2ПБВ132S и сопоставимый по мощности АД с короткозамкнутым ротором типа АИР112МВ8 специального исполнения.

Результаты исследования. Вариант упрощенной схемы конструкции двухдвигательного безредукторного МП с двумя ВП для продольной (ось X) подачи РО (рабочего стола с изделием) металлорежущего станка по- казан на рис. 1, где обозначены: *1* – станина станка; *2* – рабочий стол с системой гидроразгрузки направляющих

© А.А. Худяев, 2015

скольжения подачи стола; *3* – специальные салазки, имеющие собственные опоры скольжения (качения) и жестко соединенные с ходовой гайкой (ХГ1) ВП1; *4* – подвижная опора рабочего стола (ПОРС), жестко соединенная с рабочим столом и с ходовой гайкой (ХГ2) ВП2; *5* – линейка оптического (лазерного) интерферометра цифрового датчика положения рабочего органа (ДПРО); *6* – закрепленный на станине ИД Д1 привода винта ХВ1; *7* и *8* – ходовой винт ХВ1 и ходовая гайка ХГ1 ВП1; *9* – жестко закрепленные на станине опоры винта ХВ1; *10* и *15* – жесткие соединительные муфты СМ1 и СМ2; *11* – закрепленный на салазках ИД Д2 привода винта ХВ2; *12* и *13* – ходовой винт ХВ2 и ходовая гайка ХГ2 ВП2; *14* – жестко закрепленные на салазках опоры винта ХВ2.

Кинематическая схема рассматриваемой двухканальной электромеханической системы с двумя ВП приведена на рис. 2, где обозначены: *Салазки* – специальные салазки МП РО, обеспечивающие возможность установки второго двигателя Д2 и второй ВП в МП РО; C_{XB1} и C_{XB2} – коэффициенты передачи винтов ХВ1 и ХВ2, м/рад; $\omega_{Д1}$, $\varphi_{Д1}$, $M_{Д1}$ и $\omega_{Д2}$, $\varphi_{Д2}$, $M_{Д2}$ – угловые скорости, углы поворота и моменты, создаваемые соответственно ИД Д1 и Д2; V_1, S_1, Q_1 и V_2, S_2, Q_2 – линейные скорости, перемещения и осевые силы подачи, реализуемые соответственно ВП1 и ВП2; $V_{PO} = V_{1+2}$ и $Q_{PO} = Q_{1+2}$ – результирующие (абсолютные) скорость подачи и осевая сила подачи РО, реализуемые МП РО двухканального ЭП; S_{PO} – результирующее (абсолютное) перемещение РО станка, м:

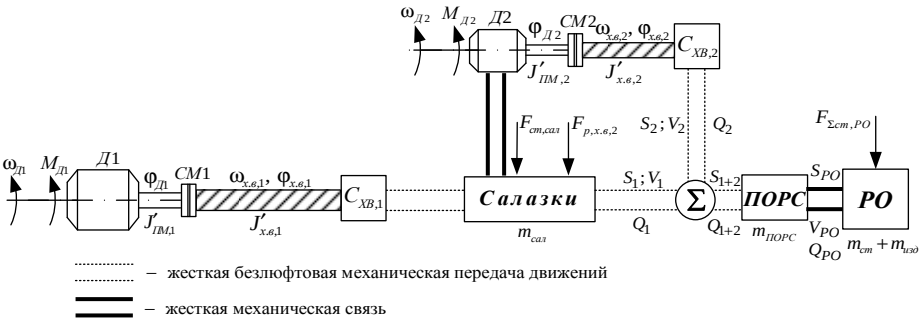


Рис. 2. Кинематическая схема итерационного двухканального электропривода МП с двумя ВП для подачи РО металлорежущего станка

$$S_{PO} = S_{1+2} = S_1 \pm S_2 = C_{XB1}\varphi_{Д1} \pm C_{XB2}\varphi_{Д2}; \qquad (1)$$

$J'_{x.в,1}$, $J'_{x.в,2}$ и $J'_{ПМ,1}$, $J'_{ПМ,2}$ – моменты инерции ПМ, приведенные соответственно к валам винтов ХВ1, ХВ2 и двигателей Д1, Д2 при автономной работе первого и второго приводов в составе двухканального ЭП, $J'_{ПМ,1,макс} = 0{,}356795\ \text{кг}\cdot\text{м}^2$, $J'_{ПМ,2,макс} = 0{,}0518708\ \text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Суммарные масса $m'_{PO,ХГ2}$ и момент инерции $J'_{PO,XB2}$ РО, приведенные соответственно к гайке ХГ2 и к валу винта ХВ2 ВП2, связаны соотношениями:

$$m'_{PO,ХГ2} = m'_{ПОРС} + m'_{ст} + m'_{изд}; \qquad J'_{PO,XB2} = m'_{PO,ХГ2} r^2 = m'_{PO,ХГ2}\left(\frac{V_{ХГ2}}{\omega_{экв,XB2}}\right)^2 = m'_{PO,ХГ2}\left(\frac{t_{в,2}}{2\pi}\right)^2, \quad (2)$$

где $m'_{PO,ХГ2,макс} = 8500$ кг, $J'_{PO,XB2,макс} = 0{,}0215308\ \text{кг}\cdot\text{м}^2$; r – радиус приведения к валу ХВ2 момента инерции РО, $r = C_{XB2} = t_{в,2}/2\pi$, м/рад; $V_{ХГ2} \equiv V_{PO}$ и $\omega_{экв,XB2}$ – абсолютные скорости поступательного и эквивалентного вращательного движений ВП2 при подаче РО двухканальным ЭП, отнесенные соответственно к гайке ХГ2 и к винту ХВ2; $t_{в,2}$ — шаг резьбы винта ХВ2, м.

Суммарная осевая сила подачи РО Q_{PO} связана с окружной силой на радиусе резьбы $F_{\Sigma,XB2}$ и соответствующим моментом на валу $M_{PO,XB2}$ винта ХВ2 зависимостями [5]:

$$Q_{PO} = \frac{F_{\Sigma,XB2}}{\operatorname{tg}(\alpha+\rho)} = \frac{F_{\Sigma,XB2}\left(1-\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\rho\right)}{\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\rho}; \qquad F_{\Sigma,XB2} = \frac{2\cdot10^3 M_{PO,XB2}}{d_{в,2}},$$

откуда получаем

$$Q_{PO} = \frac{2\cdot10^3 M_{PO,XB2}}{d_{в,2}\operatorname{tg}\alpha}\cdot\frac{1-\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\rho}{1+\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{tg}\rho} = \frac{2\cdot10^3\pi\left(1-\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\rho\right)M_{PO,XB2}}{t_{в,2}\left(1+\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{tg}\rho\right)} = \frac{2\cdot10^3\pi\left[1-t_{в,2}f_{ВП2}/\left(\pi d_{в,2}\right)\right]M_{PO,XB2}}{t_{в,2}\left(1+\pi d_{в,2}f_{ВП2}/t_{в,2}\right)}, \quad (3)$$

где

$$M_{PO,XB2} = \frac{i_1\eta_1 t_{в,2}}{t_{в,1}}M_{PO,Д1} + i_2\eta_2 M_{PO,Д2}; \qquad (4)$$

$M_{PO,Д1}$ и $M_{PO,Д2}$ – вращающие моменты двигателей Д1 и Д2 при их совместной работе, необходимые для преодоления момента нагрузки, создаваемого РО на винте ХВ2, Н·м; α – угол подъема резьбы винта ХВ2, $\alpha =$

$\operatorname{arctg}[t_{в,2}/(\pi d_{д,2})]$, рад; ρ – угол трения в передаче винт-гайка ВП2, $\rho = \operatorname{arctg} f_{ВП2}$, рад; $f_{ВП2}$ – коэффициент трения в передаче винт-гайка ВП2; $t_{в,1}$ и $t_{в,2}$ – шаги резьбы соответственно винтов ХВ1 и ХВ2, мм; $d_{в,2}$ – номинальный диаметр винта ХВ2, мм; i_j и η_j (j = 1, 2) – передаточное отношение и КПД кинематической цепи от j-го ИД к j-му ХВ.

Учитывая, что для промышленных стандартных винтовых передач, например ВП типа винт-гайка качения, выполняются соотношения [5]:

$$0,03 \le \frac{t_{в,2}}{\pi d_{в,2}} \le 0,1; \qquad f_{ВП2} = f_к = (57 \div 85)\cdot 10^{-5},$$

нетрудно заметить, что $t_{в,2} f_{ВП2}/(\pi d_{в,2}) \approx 0$ и $\pi d_{в,2} f_{ВП2} / t_{в,2} \gg 1$. Поэтому для осевой силы подачи $Q_{РО}$, определяемой соотношениями (3), (4), с большой степенью точности можно принять

$$Q_{РО} = 10^3 C_{ХВ2}^{-1} M_{РО,ХВ2} = \frac{2\cdot 10^3 \pi M_{РО,ХВ2}}{t_{в,2}} = 2\cdot 10^3 \pi \left(\frac{i_1\eta_1}{t_{в,1}} M_{РО,Д1} + \frac{i_2\eta_2}{t_{в,2}} M_{РО,Д2} \right). \qquad (5)$$

Выражение (5) используется в качестве расчетного соотношения для определения суммарной осевой силы подачи $Q_{РО}$.

Система уравнений движения привода МП РО, соответствующая кинематической схеме на рис. 1, построена при допущениях абсолютной жесткости соединительных муфт СМ1 и СМ2 и механических звеньев кинематической цепи привода, и при пренебрежении вследствие относительной малости моментами инерции СМ1 и СМ2.

Математическая модель движения итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП в установившихся режимах механообработки станка, полученная с учетом соотношений (1), (2) и (5), имеет вид

$$S_{РО}(t) = S_{1+2}(t) = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{t_{в,1}}{i_1}\varphi_{Д1}(t) \pm \frac{t_{в,2}}{i_2}\varphi_{Д2}(t) \right]; \qquad (6)$$

$$Q_{РО}(t) - m'_{РО,ХГ2} p^2 S_{РО}(t) - Q'_{с,РО,ХГ2} = 0; \qquad (7)$$

$$M_{Д1}(t) - J_{\Sigma,1} p^2 \varphi_{Д1}(t) \mp \frac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \cdot \frac{J'_{РО,ХВ2}}{i_1 i_2 \eta_1} p^2 \varphi_{Д2}(t) - M'_{с,ХВ1,1} - M'_{с,ХВ2,1} = 0; \qquad (8)$$

$$M_{Д2}(t) - J^*_{\Sigma,2} p^2 \varphi_{Д2}(t) - \frac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \cdot \frac{J'_{РО,ХВ2}}{i_1 i_2 \eta_2} p^2 \varphi_{Д1}(t) - M'_{с,ХВ2,2} = 0, \qquad (9)$$

где $Q'_{с,РО,ХГ2}$ – сила сопротивления нагрузки, создаваемая РО на оси винта ХВ2 и приведенная к гайке ХГ2, Н:

$$Q'_{с,РО,ХГ2} = 10^3 C_{ХВ2}^{-1} M'_{с,РО,ХВ2} = \frac{2\cdot 10^3 \pi M'_{с,РО,ХВ2}}{t_{в,2}}; \qquad (10)$$

$J_{\Sigma,1}$ и $J^*_{\Sigma,2}$ – суммарные моменты инерции ПМ, приведенные к валам двигателей Д1 и Д2 при их совместной работе в составе двухканального ЭП, кг·м^2:

$$J_{\Sigma,1} = J'_{ПМ,1} + \left(\frac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \right)^2 \frac{J'_{РО,ХВ2}}{i_1^2 \eta_1}; \qquad (11)$$

$$J^*_{\Sigma,2} = \begin{cases} J'_{ПМ,2} + \dfrac{J'_{РО,ХВ2}}{i_2^2 \eta_2} & \text{– при согласном вращении Д2 по отношению к вращению Д1;} \\ J'_{ПМ,2} - \dfrac{J'_{РО,ХВ2}}{i_2^2 \eta_2} & \text{– при встречном вращении Д2 по отношению к вращению Д1;} \end{cases} \qquad (12)$$

$M'_{с,ХВ1,1}$, $M'_{с,ХВ2,1}$ и $M'_{с,ХВ2,2}$ – суммарные моменты сопротивления нагрузки, действующие на валах винтов ХВ1 и ХВ2 и приведенные соответственно к валам ИД Д1 и Д2, Н·м:

$$M'_{с,ХВ1,1} = \frac{1}{i_1\eta_1}\left(M'_{тр,сал,ХВ1} + M'_{с,ВП1,ХВ1} \right); \qquad M'_{с,ХВ2,1} = \frac{t_{в,1}}{i_1\eta_1 t_{в,2}}\left(M'_{с,РО,ХВ2} + M'_{с,ВП2,ХВ2} \right); \qquad (13)$$

$$M'_{с,ХВ2,2} = \frac{1}{i_2\eta_2}\left(M'_{с,РО,ХВ2} + M'_{с,ВП2,ХВ2} \right); \qquad (14)$$

знаки «+» и «–» перед вторым слагаемым в правой части уравнения (6) и знаки «–» и «+» перед третьим слагаемым в левой части уравнения (8) соответствуют согласному и встречному вращениям двигателя Д2 по отношению к вращению двигателя Д1; $p \equiv d/dt$ – оператор дифференцирования по времени t. Учет влияния ДВВК

по нагрузке на движение приводов каналов математически определяется третьими слагаемыми в левых частях уравнений (8) и (9).

В частных случаях движения двухканального ЭП уравнения (8) и (9) принимают вид:

1) основной привод (канал К-1) работает в двигательном режиме, а уточняющий привод (канал К-2) – в режиме динамического торможения, т.е. $\varphi_{Д2}(t)=0$ и двигатель Д2 удерживает реактивный момент на валу от подачи РО двигателем Д1

$$M_{Д1}(t)-J'_{ПМ,1}p^2\varphi_{Д1}(t)-M'_{с,XB1,1}-M'_{с,XB2,1}=0; \tag{15}$$

$$M_{Д2}(t)-\frac{t_{в,1}}{t_{в,2}}\cdot\frac{J'_{РО,XB2}}{i_1 i_2\eta_2}p^2\varphi_{Д1}(t)=0; \tag{16}$$

2) уточняющий привод (канал К-2) работает в двигательном режиме, а основной привод (канал К-1) – в режиме динамического торможения, т.е. $\varphi_{Д1}(t)=0$ и двигатель Д1 удерживает реактивный момент на валу от подачи РО двигателем Д2

$$M_{Д1}(t)-\frac{t_{в,1}}{t_{в,2}}\cdot\frac{J'_{РО,XB2}}{i_1 i_2\eta_1}p^2\varphi_{Д2}(t)+M'_{с,XB1,1}=0; \tag{17}$$

$$M_{Д2}(t)-J'_{ПМ,2}p^2\varphi_{Д2}(t)-M'_{с,XB2,2}=0. \tag{18}$$

Моменты сопротивления нагрузки, приведенные к валам винтов ХВ1 и ХВ2 и входящие в соотношения (10), (13), (14), определяются следующим образом: $M'_{тр,сал,XB1}$ – момент на валу ХВ1 от силы трения скольжения (качения) салазок МП РО о направляющие станины:

$$M'_{тр,сал,XB1}=\begin{cases}M_{п,сал}=\dfrac{\left(m_{сал}gf_{п,сал}+F_{нат,XB1}\right)t_{в,1}}{2\pi} & \text{– при пуске (трогании) привода перемещения салазок;}\\ M_{ск,сал}=\dfrac{m_{сал}gf_{ск,сал}t_{в,1}}{2\pi} & \text{– при движении салазок с постоянной (ограниченной) скоростью подачи (например, в режиме механообработки);}\end{cases} \tag{19}$$

$M'_{с,РО,XB2}$ – момент на валу ХВ2 от сил, создаваемых перемещением (подачей) РО станка и определяемых силой трения скольжения (качения) опор рабочего стола о направляющие станины (с учетом гидроразгрузки направляющих) и составляющими (с учетом конкретного вида механообработки) окружной силы резания P_z:

$$M'_{с,РО,XB2}=\begin{cases}M_{тр,п,РО}=\dfrac{\left[\left(m_{ПОРС}+m_{ст}+m_{изд}\right)gf_{п,РО}+F_{нат,XB2}\right]t_{в,2}}{2\pi}\\ \text{– при пуске (трогании) привода перемещения РО станка;}\\ M_{тр,ск,РО}+M_{h,рез}+M_{тр,рез}=\\ =\dfrac{\left(m_{ПОРС}+m_{ст}+m_{изд}\right)gf_{ск,РО}t_{в,2}}{2\pi}+\dfrac{k_{зап}P_h t_{в,2}}{2\pi}-\dfrac{P_x f_{ск,РО}t_{в,2}}{2\pi}\\ \text{– при движении РО станка с постоянной (ограниченной) скоростью подачи в режиме торцового фрезерования;}\end{cases} \tag{20}$$

$M'_{с,ВП1,XB1}$ и $M'_{с,ВП2,XB2}$ – моменты на валах ХВ1 и ХВ2 от сил трения соответственно в ВП1 и ВП2, определяемых трением в паре винт-гайка и трением в подшипниках опор ходового винта (при наличии предварительного натяга в ВП) [6]:

$$M'_{с,ВП1,XB1}=M'_{тр,винта,XB1}+M'_{тр,подш,XB1}=\frac{\left(0,032t_{в,1}+2,21\cdot10^{-7}k_{п,в,1}d_{п,в,1}\right)P'_{h,ХГ1}}{3}; \tag{21}$$

$$M'_{с,ВП2,XB2}=M'_{тр,винта,XB2}+M'_{тр,подш,XB2}=\frac{\left(0,032t_{в,2}+2,21\cdot10^{-7}k_{п,в,2}d_{п,в,2}\right)P'_{h,ХГ2}}{3}; \tag{22}$$

В соотношениях (19)÷(22) обозначены: g – ускорение силы тяжести, $g\approx9,81$ м/с^2; $f_{п,сал}$, $f_{ск,сал}$ и $f_{п,РО}$, $f_{ск,РО}$ – коэффициенты трения покоя и скольжения (качения) соответственно салазок МП РО и опор самого РО; $k_{п,в,j}$ и $d_{п,в,j}$ (j=1,2) – количество и внутренний диаметр подшипников в опорах соответствующих ХВ: $k_{п,в,1}=10$, $k_{п,в,2}=8$, $d_{п,в,j}=d_{в,j}$, м.

В определениях моментов сопротивления нагрузки (19)÷(22) используются следующие силы: $F_{нат,ХВ1}$ и $F_{нат,ХВ2}$ – осевые силы на валах винтов ХВ1 и ХВ2 от предварительного натяга, создаваемого соответственно ИД Д1 и Д2, Н:

$$F_{нат,ХВ1} = \alpha_{пр,сал} S_{пр,сал}; \qquad F_{нат,ХВ2} = \alpha_{пр,РО} S_{пр,РО}; \tag{23}$$

$\alpha_{пр,сал}$, $\alpha_{пр,РО}$ и $S_{пр,сал}$, $S_{пр,РО}$ – удельные силы прилипания [Н/см^2] и площади прилипания [см^2] взаимнотрущихся поверхностей соответственно для опор салазок и для опор РО; $P'_{h,ХГ1}$ и $P'_{h,ХГ2}$ – суммарные осевые силы подачи на винтах ХВ1 и ХВ2, приведенные к гайкам ХГ1 и ХГ2 и определяемые горизонтальной составляющей окружной силы резания P_h и соответствующими силами трения скольжения (качения) салазок $P_{h,тр,сал}$ и опор РО (рабочего стола) $P_{h,тр,РО}$, Н:

$$P'_{h,ХГ1} = P_h + P_{h,тр,сал} + P_{h,тр,РО}; \qquad P'_{h,ХГ2} = P_h + P_{h,тр,РО}; \tag{24}$$

$$P_h = k_{hz} P_z, \quad P_z = K f_{сл} = K \cdot t \cdot s_z; \quad P_{h,тр,сал} = m_{сал} g f_{ск,сал}; \quad P_{h,тр,РО} = \left(m_{ПОРС} + m_{ст} + m_{изд}\right) g f_{ск,РО}; \tag{25}$$

K – нормативная удельная сила резания, Н/мм^2; $f_{сл}$ – сечение срезаемого слоя, мм^2; t – заданная глубина резания (например, при фрезеровании), мм; s_z – заданная подача РО на один зуб фрезы, мм/зуб; k_{hz} – нормативный коэффициент преобразования окружной силы резания P_z в силу подачи P_h; P_x – осевая составляющая силы резания, определяемая из P_z с помощью нормативного коэффициента k_{xz}: $P_x = k_{xz} P_z$, Н.

Операторы компенсаторов C_{12} и C_{21} перекрестных связей между объектами управления (ОУ) контуров скорости, обусловленных наличием в двухканальном ЭП с двумя ВП негативного взаимовлияния по нагрузке между основным К-1 и уточняющим К-2 каналами, при условии пренебрежения обратной связью по ЭДС E_1 двигателя Д1 определяются соотношениями:

$$C_{ij}(p) = -K_{ОУ,ij}(p) K_{ОУ,j}(p) \frac{k_{м,j} W_{ОКТ,j}(p)}{k_{м,i} W_{ОКТ,i}(p)}, \qquad i, j = 1,2 \ \ (i \neq j), \tag{26}$$

где с учетом (8), (9), (11) и (12) обозначены: $K_{ОУ,ij}(p)$ – оператор направленной перекрестной связи между ОУ контуров скорости j-го (выход) и i-го (вход) каналов управления:

$$K_{ОУ,12}(p) = \mp \frac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \cdot \frac{J'_{РО,ХВ2}}{i_1 i_2 \eta_1} p; \qquad K_{ОУ,21}(p) = -\frac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \cdot \frac{J'_{РО,ХВ2}}{i_1 i_2 \eta_2} p; \tag{27}$$

$K_{ОУ,j}(p)$ – оператор механической части ОУ в прямой цепи контура скорости j-го канала:

$$K_{ОУ,1}(p) = \frac{i_1^2 \eta_1}{\left[i_1^2 \eta_1 J'_{ПМ,1} + \left(t_{в,1} / t_{в,2}\right)^2 J'_{РО,ХВ2}\right] p}; \tag{28}$$

$$K_{ОУ,2}(p) = \begin{cases} \dfrac{i_2^2 \eta_2}{\left[i_2^2 \eta_2 J'_{ПМ,2} + J'_{РО,ХВ2}\right] p} & \text{– при согласном вращении Д2 по отношению к вращению Д1;} \\ \dfrac{i_2^2 \eta_2}{\left[i_2^2 \eta_2 J'_{ПМ,2} - J'_{РО,ХВ2}\right] p} & \text{– при встречном вращении Д2 по отношению к вращению Д1;} \end{cases} \tag{29}$$

$W_{ОКТ,j}(p)$, $W_{ОКТ,i}(p)$ и $k_{м,j}$, $k_{м,i}$ – операторы оптимизированных на технический оптимум контуров тока и коэффициенты передачи ИД по моменту соответственно j-го и i-го каналов управления.

Из (26) для операторов компенсаторов $C_{12}(p)$ и $C_{21}(p)$ с учетом (27)÷(29) получаем

$$C_{12}(p) = \pm k_1^* \frac{2T_{\mu,1} p + 1}{2T_{\mu,2} p + 1} = \pm \left(\frac{k_1^* T_{т,1} p}{T_{т,2} p + 1} + \frac{k_1^*}{T_{т,2} p + 1} \right); \qquad C_{21}(p) = k_2 \frac{2T_{\mu,2} p + 1}{2T_{\mu,1} p + 1} = \frac{k_2 T_{т,2} p}{T_{т,1} p + 1} + \frac{k_2}{T_{т,1} p + 1}, \tag{30}$$

где $T_{т,j} = 2T_{\mu,j}$, $T_{\mu,j} = T_{ШИП,j}$, $j = 1,2$;

$$k_1^* = \begin{cases} \dfrac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \dfrac{k_{м,2} k_{т,1} i_2 \eta_2 J'_{РО,ХВ2}}{k_{м,1} k_{т,2} i_1 \eta_1 \left(i_2^2 \eta_2 J'_{ПМ,2} + J'_{РО,ХВ2}\right)} & \text{– при согласном вращении Д2 по отношению к вращению Д1;} \\ \dfrac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \dfrac{k_{м,2} k_{т,1} i_2 \eta_2 J'_{РО,ХВ2}}{k_{м,1} k_{т,2} i_1 \eta_1 \left(i_2^2 \eta_2 J'_{ПМ,2} - J'_{РО,ХВ2}\right)} & \text{– при встречном вращении Д2 по отношению к вращению Д1;} \end{cases} \tag{31}$$

$$k_2 = \frac{t_{в,1}}{t_{в,2}} \cdot \frac{k_{м,1} k_{т,2} i_1 \eta_1 J'_{PO,XB2}}{k_{м,2} k_{т,1} i_2 \eta_2 \left[i_1^2 \eta_1 J'_{ПМ,1} + \left(t_{в,1} / t_{в,2} \right)^2 J'_{PO,XB2} \right]}; \quad (32)$$

$T_{ШИП,j}$ и $k_{т,j}$ $(j = 1, 2)$ – некомпенсируемая постоянная времени широтно-импульсного преобразователя и коэффициент передачи обратной связи по току контура тока j-го канала управления; знаки «+» и «–» в правой части первого соотношения выражения (30), как и ранее, соответствуют согласному и встречному вращениям двигателей Д1 и Д2.

Компенсирующие перекрёстные связи (КПС) устанавливаются в управляющей части двухканальной САУ между выходами регуляторов скорости и входами контуров тока соответствующих каналов управления. Такие связи, реализуемые блоком компенсаторов C_{12}-C_{21}, обеспечивают полную автономность работы каналов управления К-1 и К-2 двухканального ЭП, что, в свою очередь, определяет возможность типовой (стандартной) настройки каналов, например по принципу СПР.

Из соотношений (30) нетрудно видеть, что КПС представляют собой суммы реального дифференцирующего и апериодического звеньев, содержащих соответствующую перекрестной связи реальную инерционность $1/(T_{т,j} p + 1)$ $(j = 1, 2)$, и могут быть легко технически реализованы с помощью свободных ячеек электронных блоков управления, входящих обычно в систему УБСР-АИ.

Компьютерные исследования показали потенциальную работоспособность построенной математической модели движения (6)÷(25) и достаточно высокую эффективность полученных компенсаторов ДВВК по нагрузке C_{12} и C_{21} (30)÷(32) при моделировании электродинамических процессов в рассмотренном двухканальном ЭП с СПР-настройкой каналов и МП с двумя ВП применительно к подаче РО станка модели 24К70АФ4. Сравнительные результаты исследований будут рассмотрены в последующих работах.

Выводы. 1. Предложена упрощенная схема конструкции двухдвигательного безредукторного механизма подачи с двумя ВП, реализующего механическую безлюфтовую передачу движений с двумя степенями свободы. Аналогов схемы конструкции применительно к приводам подач РО станков и механизмов в открытой печати не обнаружено.

2. Получена кинематическая схема и разработана математическая модель установившегося движения (с учетом ДВВК по нагрузке) двухканального ЭП подачи, построенного по итерационному принципу на базе двухдвигательного МП с двумя ВП. В математической модели движения выполнен учет всех основных статических моментов сопротивления нагрузки, действующих в рассмотренном двухканальном ЭП применительно к подаче РО (рабочего стола с изделием) металлорежущего станка в режиме механообработки (торцового фрезерования) изделия.

3. Получены операторы связей, определяющих негативное динамическое взаимовлияние по нагрузке (ДВВК по нагрузке) между основным К-1 и уточняющим К-2 каналами управления. Определены и построены операторы компенсирующих перекрестных связей (компенсаторов ДВВК), обеспечивающих полную автономность работы каналов управления К-1 и К-2 двухканального ЭП МП с двумя ВП. Показано, что операторы КПС обладают возможностью их реальной технической реализации.

4. Применение итерационных двухканальных программно-управляемых ЭП подачи на базе МП с двумя ВП целесообразно в тех случаях, когда от традиционного одноканального ЭП подачи требуются очень высокие быстродействие и точность отработки (особенно в динамических режимах) небольших заданий по положению при значительных инерционных нагрузках на выходе привода. Такие требования в полной мере соответствуют растущим требованиям к качеству работы МП РО современных прецизионных станков и механизмов.

Список литературы: 1. *Следящие приводы*. В 2-х кн. / Под ред. *Б. К. Чемоданова*. – М.: Энергия, 1976. – Кн. 1. – 480 с. **2**. *Кузнецов Б. И.* Проектирование многоканальных систем оптимального управления / *Б. И. Кузнецов, Б. В. Новоселов, И. Н. Богаенко* и др. – К.: Техніка, 1993. – 245 с. **3**. *Худяев А. А.* Высокоточная квазиитерационная двухканальная электромеханическая система с механическим дифференциалом / *А. А. Худяев, Т. Ю. Кунченко* // Техническая электродинамика. – 2015. – № 1. – С. 21–28. **4**. *Кузнецов Б. И.* Многоканальные итерационные системы управления: Монография / *Б. И. Кузнецов, А. А. Худяев, И. Н. Богаенко* и др. – К.: НПК «КИА», 1998. – 224 с. **5**. *Марголит Р. Б.* Наладка станков с программным управлением: Учеб. пособие / *Р. Б. Марголит*. – М.: Машиностроение, 1983. – 253 с. **6**. *Справочник* по автоматизированному электроприводу / Под ред. *В. А. Елисеева* и *А. В. Шинянского*. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

Bibliography (transliterated): 1. Chemodanov, B. K. *Sledjashchie privody*. Moscow: Energija, 1976. Print. **2.** Kuznecov, B. I., Novoselov, B. V., Bogaenko, I. N. and oth. *Proektirovanie mhogokanal'nyh sistem optimal'nogo upravlenija*. Kyiv: Tehnika, 1993. Print. **3.** Hudjaev, A. A. and Kunchenko, T. Yu. "Vysokotochnaja kvaziiteracionnaja dvuhkanal'naja jelektromehanicheskaja sistema s mehanicheskim differencialom." *Tehnicheskaja electrodinamika.* No. 1. 2015. 21–28. Print. **4.** Kuznecov, B. I., Hudjaev, A. A., Bogaenko, I. N. and oth. *Mnogokanal'nye iteracionnye sistemy upravlenija.* Kyiv: NPK "KIA", 1998. Print. **5.** Margolit, R. B. *Naladka stankov s programmnym upravleniem: Ucheb. posobie*. Moscow: Mashynostroenie, 1998. Print. **6.** Eliseev, A. V., Shinjanskij, A. V. *Spravochnik po avtomatizirovannomu jelektroprivodu.* Moscow: Jenergoatomizdat, 1983. Print.

Поступила (received) 30.07.2015

УДК: 62-83:625.43

Б. М. ЧУНАШВИЛИ, д-р техн. наук, проф., начальник департамента Груз.ТУ, Тбилиси, Грузия;
А. М. ПЕТРОСЯН, академический доктор, асоцир. проф. Груз.ТУ, Тбилиси, Грузия;
Г. В. ШАВЕЛАШВИЛИ, канд. техн. наук, асоцир. проф. Груз.ТУ, Тбилиси, Грузия;
М. А. ТУГУШИ, канд. техн. наук, асоцир. проф. Батумской Морской Академии, Батуми, Грузия

УЛУЧШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ГРУППОВЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Введение. Вслед за научно-техническим прогрессом, развитием новых технологий и внедрением созданных на их основе электротехнологических установок и комплексов существенно возросли требования к качеству электроэнергии потребляемой из сети электроснабжения. В свою очередь, режимы работы новых технологических установок оказывают значительное влияние как на элементы сети электроснабжения так и на режимы работ и технико-экономические показатели подключенных к сети электропотребителей.

Исходя из этого на современном этапе, в условиях создавшегося энергетического кризиса, одной из главных задач ученных и практических деятелей занимающихся в области электроэнергетики представляет собой повышение энергоэффективности в полном цикле: производства, передача, распределение и потребление электроэнергии. В связи с этим, необходимо отметить, что основной резерв повышения энергоэффективности имеется на этапе потребления, обусловленный низкими энергетическими показателями электроприемников, среди которых значительное место занимает асинхронный электропривод.

Внедрение современных электротехнологических установок привело к увеличению потребления реактивной мощности из сети, т.к. они оснащены устройствами с большой индуктивностью. Ввиду этого увеличилась и проводимая сетью полная мощность, что в свою очередь привело к перегрузке сети и соответственно увеличению потерь напряжения и мощности в ее элементах.

Постановка задачи. В связи с этим, одним из основных требований, предъявляемых электроприемникам, представляет собой эффективное преобразование получаемой от сети электроснабжения электроэнергии, т.е. наличие высоких энергетических показателей, как в установленном, так и в переходных режимах работы.

В числе других причин низких энергетических показателей электроприемников, одно из основных мест занимает значительное потребление реактивной мощности (РМ) и в результате, обусловленные этим, увеличенные потери электрической энергии и напряжении в силовых элементах сети электроснабжения.

В связи с этим, во многих странах этот вопрос является приоритетным и решается на государственном уровне. Приводимая информация основана на фактической структуре тарифных ставок, общепринятых в Европе и направленных на стимулирование потребителей минимизировать потребление реактивной мощности [1].

При этом, в тарифах учитывается не количество потребляемой от сети реактивной энергии а коэффициент реактивной мощности.

Однако, данный подход к решению проблемы ставит в неравные условия потребителей большой и малой мощности.

Исходя из этого, для полной разгрузки сети необходимо лимитировать не величину коэффициента мощности (cosφ), а величину потребляемой от сети PM - $Q_п$, что является более справедливым по отношению к потребителям относительно малой мощности.

Учитывая вышеизложенное, в работе была поставлена задача, повысить энергетические показатели технологического комплекса с групповым асинхронным электроприводом, путем полной разгрузки элементов сети от требуемой комплексом реактивной мощности, с учетом потерь реактивной мощности в силовом трансформаторе питающей сети.

Материалы исследования. Для решения поставленной задачи, в первую очередь, были проанализированы технические возможности системы управления (СУ) современных компенсирующих установок выпускаемых ведущими фирмами мира. При этом, было выбрано два варианта систем: ступенчатым регулированием секций блока статических конденсаторов [2] и плавным регулированием синхронного компенсатора [3].

Несмотря на то, что установки компенсации реактивной мощности, основанные на статических конденсаторах, выпускаемые даже многоступенчатым регулированием, требуемая от сети мощность ни полностью компенсируется. Это особенно ярко выражается, когда нагрузка изменяется в больших диапазонах и, при этом, результат компенсации не превышает 50%.

Синхронные компенсаторы имеют способность плавного регулирования реактивной мощности в большем диапазоне, но установленная мощность серийно выпускаемых составляет 10 - 160 мВАр, а номинальное напряжение - 6.6-15.75кВ [4]. В связи с этим, для практического применения так же неприемлемы, поскольку их мощность на много превышает величину максимальной реактивной мощности технологических комплексов функционирующих в нашей стране.

В работе предложен способ управления плавного регулирования генерируемой мощности установки

© Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Шавелашвили Г.В., Тугуши М.А., 2015

компенсации реактивной мощности выполненной на базе статических конденсаторах и на его основе разработана система управления (СУ) преимущественно для группового асинхронного электропривода. При этом, конденсаторная батарея является несекционированной.

Блок-схема разработанной системы управления устройства компенсации реактивной мощности представлена на рис.1.

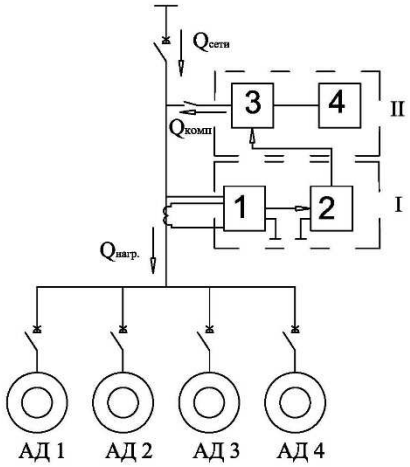


Рис. 1. Блок-схема системы управления плавного регулирования устройства компенсации реактивной мощности

Схема состоит из силовой части I и СУ II. Силовая часть охватывает: ограничитель емкостного тока конденсаторов 3, который представляет собой транзисторный ограничитель реактивного тока; несекционированную конденсаторную батарею (4). В состав системы управления входят: трансформатор тока (ТТ); датчик реактивной мощности (1); система управления (2).

Принцип работы разработанной системы управления заключается в следующем:

Группа асинхронных электроприводов (АД1,АД2,АД3,АД4) от сети принимает реактивную мощность $Q_{нагр}$. Величина нагрузки изменяется и зависит от режима работы электродвигателей, определяющие технологическим процессом. Следовательно, на входе датчика реактивной мощности (1), через трансформатора тока (ТТ) подается ток соответствующей нагрузки $I_{нагр}$. В результате на выходе датчика появляется задающий сигнал реактивной нагрузки и подаётся на входе систем управления (2). Соответственно, система управления вырабатывает управляющий сигнал, который подается на вход ограничителя емкостного тока конденсаторов (3). Следовательно, ограничитель емкостного тока открывается и пропускает емкостный ток равный индуктивной нагрузки. То есть, величина емкостной (компенсационной) мощности вырабатываемой компенсатором $Q_{комп} = Q_{нагр}$, но направления векторов этих мощностей противоположные.

В итоге, потребляемая от сети реактивная мощность равна:

$$Q_{сети} = Q_{нагр} - Q_{комп} . \quad (1)$$

При изменении реактивной нагрузки $Q_{нагр}$ пропорционально изменяются величины всех входных и выходных сигналов элементов устройства. Соответственно компенсатор генерирует емкостную мощность $Q_{комп}$ равной реактивной нагрузке $Q_{нагр}$.

Таким образом, разработанная система управления установки, в результате плавного регулирования вырабатываемой мощности, обеспечивает полную компенсацию потребляемой от сети реактивной нагрузки электроприводом.

При этом, для надежной работы устройства, мощность (емкость) конденсаторных батарей выбирается по условию:

$$Q_{кон} \geq Q_{max\ нагр} , \quad (2)$$

где $Q_{max.нагр}$ – максимальная реактивная нагрузка асинхронного многодвигательного электропривода.

Однако, рассмотренная система не обеспечивает контроль конечных результатов, т.е. она является разомкнутой.

В связи с этим, в работе предложен улучшенный вариант СУ. Функциональная схема которого представлена на рис. 2.

В данном варианте изменена структура Блок-схемы и потребляемая от сети реактивная мощность контролируется с учетом компенсационной мощности, в результате чего, система управления получается практически замкнута по требуемой от сети реактивной мощности.

Вместе с этим, расширяется функции системы управления (2) ограничителя емкостного тока конденсаторов и она выполняет функции сравнения сигналов. При этом, на один из его входов подключается задатчик уровня компенсации (5).

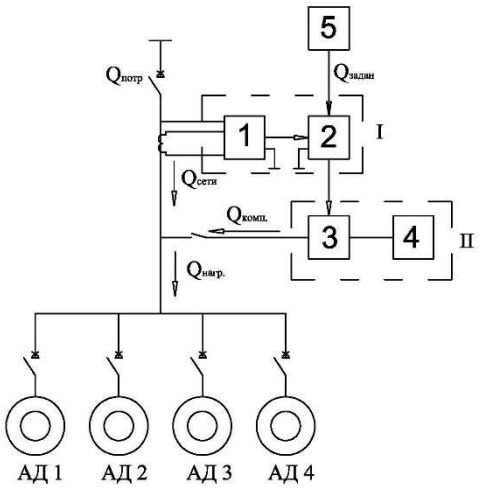


Рис. 2. Блок-схема СУ установки компенсации реактивной мощности асинхронного многодвигательного электропривода (замкнутая система управления).

Принцип работы блок-схема улучшенной СУ установки, представленная на рис. 2, заключается в следующем:

На одном входе системы 2, от задатчика уровня компенсации (5) подается сигнал соответствующий максимальной допустимой потребляемой от сети (лимитированной от энергосистемы) значения реактивной мощности $Q_{задан}$, а на втором – от датчика реактивной мощности (1) сигнал соответствующий реальной реактивной нагрузки электроприводов. После сравнения сигналов система (2) вырабатывает и подает управляющий сигнал на вход ограничителя емкостного тока (3). В результате, устройство вырабатывает компенсационную емкостную мощность:

$$Q_{комп} = Q_{нагр} - Q_{задан} . \quad (3)$$

По формуле (1) реактивная мощность потребляемая от сети ровна:

$$Q_{сети} = Q_{задан} . \quad (4)$$

Таким образом, система обеспечивает поддерживать потребляемую от сети реактивную нагрузку в размере лимитированного значения.

Рассмотренные выше системы обеспечивают компенсацию реактивной мощности тока для групп электропривода, а для электропотребителей имеющих собственную понижающую подстанцию, они не эффективны, так как в них не учитываются потери реактивной мощности в силовом трансформаторе.

Для расширения сферы использования разработана усовершенствованная СУ компенсатора, Блок-схема которого предоставлена на рис. 3.

Она состоит из следующих элементов:

Силового трансформатора Т; выключатель силового трансформатора SQ1; выключатель потребителя SQ2; выключатель конденсаторной батареи SQ3; трансформаторов тока технологического комплекса с групповым асинхронным электроприводом (нагрузка) $TI_н$; датчика полной и реактивной нагрузки потребителя 1; блока вычисления потерь реактивной мощности холостого хода силового трансформатора 2; блока вычисления потери реактивной мощности нагрузки в силовом трансформаторе 3; системы управления компенсатора раективной мощности 4; СУ ограничителя емкостного тока конденсаторов 5; ограничителя емкостного тока конденсаторов 6; несекционированная статическая конденсаторная батарея 7.

Предложенная схема работает следующим образом:

Сумарная активная и реактивная нагрузка технологического комплекса зависит от режимов работы электроприводов. При этом, информация о напряжении Uн и токе нагрузки Iн комплекса получаемая от сборной шины и от трансформатора тока TIн, установленная на выходе выключателя QS2, подается на вход датчика полной и реактивной нагрузки потребителя 1. Следовательно, на выходах датчика одновременно появляются сигналы соответствующие реактивной $Q_п$ и полной $S_п$ нагрузки потребителя. Сигнал полной нагрузки подается на вход блока вычисления потерь реактивной мощности силового трансформатора 3.

Одновременно, на выходе блока 2 появляется сигнал соответствующий потерям реактивной мощности холостого хода трансформатора $\Delta Q_{тхх}$. Полученные сигналы подаются на входе сумматора 4. От сумматора сигнал поступает на вход СУ ограничителя емкостного тока конденсаторов 5. В результате устройство вырабатывает сигнал компенсационной мощности:

$$Q_к = Q_п + \Delta Q_{тн} + \Delta Q_{тхх} . \quad (6)$$

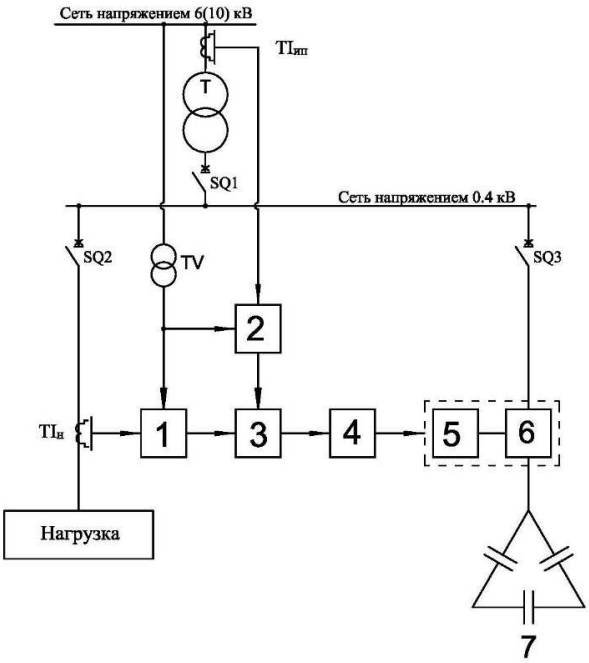


Рис. 3. Блок-схема усовершенствованной системы управления устройства компенсации реактивной мощности плавного регулирования.

В результате, ограничитель емкостного тока конденсаторов 6 пропускает ток батарей силовых конденсаторов, соответствующего получившего управляемого сигнала и устройство генерирует величину реактивной мощности $Q_к$.

Таким образом, разработанная усовершенствованная система управления устройства компенсации реактивной мощности плавного регулирования обеспечивает полную компенсацию потребляемой от сети реактивной мощности с учетом потерь в силовом трансформаторе. Это позволяет полностью разгрузить силовые элементы сети электроснабжения от прохождения реактивной нагрузки уменьшить потери электроэнергии повысить энергетические показатели.

Результаты работы:

1. Предложен способ плавного регулирования генерируемой мощности установки компенсации реактивной мощности выполненной на базе несекционированной статической конденсаторной батарей.

2. На основе предложенного способа разработаны системы управления преимущественно для группового асинхронного электропривода. При этом, разработанная усовершенствованная система управления устройства компенсации реактивной мощности плавного регулирования обеспечивает полную компенсацию потребляемой от сети реактивной мощности с учетом потерь в силовом трансформаторе.

3. Даются функциональные и структурные схемы разработанных систем управления устройств компенсации реактивной мощности.

4. Предложена методика расчета параметров элементов системы управления.

5. Разработанные системы позволяет полностью разгрузить силовые элементы сети электроснабжения от прохождения реактивной нагрузки, уменьшить потери электроэнергии, повысить энергетические показатели и энергоэффективности.

Список литературы: 1. Руководство по устройству электроустановок. Технические решения Schneider Electric. 2009 – С. 46. 2. Руководство по проектированию и исполнению шкафов компенсации реактивной мощности для сетей 400/415В–50Гц. // Schneider Electric. 2007 – С. 52. 3. Б.М. Чунашвили, М.И. Кобалия, К.О. Церетели, А.М. Петросян Повышение энергетических показателей асинхронных многодвигательных электроприводов. Электротехнические и электросберегающие системы.– Темат.вып.«Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», №3/2012(19), Кременчук 2012– С. 225–226. 4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах./ Том 2 3-е изд.- М.: Издательский дом МЭИ. 2006.- 532с.

Bibliography (transliterated): 1. Rukovodstvo po ustroistvu elektoustanovok. Tekhnicheskie reshenia Schneider Electric. 2009 – S. 469. 2. rukavodstvo po proektirovaniu i reaktivnoi moshnosti dlya setey 400/415V – 50Hz. // Schneider Electric. 2007 – S. 52. 3. B.M. Chunashvili, M.I. Kobalia, K.O. Tsereteli, A.M. Petrosian Povishenie energeticheskikh pokazatelei asinkhronnikh mnogodvigatelnikh elektroprivodov. Elektrotekhnicheskie y elektrosberegayushchie sistemi. – Temat.vip. “problemi avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoria y praktika” Выпуск 3/2012(19) – S. 225–226. 4. Ivanov-Smolensky A.V. Elektricheskie mashini: uchebnik dlya vuzov. V dvukh tomakh./ Tom 2 3-e izd.-M.:Izdatelsky dom MEI. 2006 g.-532 s.

Поступила (received)

УДК 621.331

А. В. СЕМИКОВ, асп. НТУ «ХПИ»

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СУПЕРКОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

Вступление. В последние десятилетия большинство мировых автопроизводителей начали выпуск электромобилей и разрабатывают новые модели. По ряду оценок в ближайшие десятилетия ожидается значительный рост числа электромобилей [1]. В связи с этим на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» открыта новая специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и создан лабораторный образец электропривода (ЭП), который установлен в автомобиль «Ланос».

Одним из достоинств ЭП по сравнения с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является возможность рекуперативного торможения, которое сокращает расход электроэнергии и увеличивает дальность проезда на одном заряде в городских условиях движения, сопряжённых с частыми разгонами и торможениями. Но многие типы аккумуляторов либо не способны принимать мощность возможную в режимах рекуперативного торможения либо могут быстро изнашиваться при частых торможениях электромобиля. Решением является использование дополнительного накопителя электроэнергии – суперконденсаторной батареи (СКБ), обладающей большим ресурсом и удельной мощностью, по сравнению с аккумуляторной батарей (АБ). [2]

Целью работы является оценка расхода электроэнергии в различных стандартных городских циклах движения на примере автомобиля «Ланос» и сравнение энергетического эффекта от рекуперации при использовании ЭП по двум ниже описываемым структурам.

Материалы и результаты исследований. В процессе заряда и разряда напряжение на АБ не должно меняется более чем на 20…30 %, в отличие от СКБ, у которых оно может меняться в несколько раз, во избежание существенного сокращения срока службы АБ, поэтому параллельное соединение АБ с СКБ не целесообразно. В литературе [2] представлены различные структуры ЭП с СКБ и АБ с широтно-импульсными преобразователями (ШИП) между АБ и СКБ. В данной работе рассматривается 2 варианта структуры ЭП с СКБ и АБ без использования ШИП между ними. В запатентованном [3] кафедрой «АЭМС» варианте, показанном на рис. 1, СКБ всегда подключена к ШИП, питающему двигатель, а АБ подключена к ней через диод, предотвращающий её заряд. В данной схеме отбор энергии от аккумулятора начинается, когда напряжение на СКБ опускается ниже АБ, а в тормозном режиме энергия накапливается в СКБ, повышая её напряжение выше АБ. Во втором варианте, показанном на рис. 2, АБ и СКБ подключаются к преобразователю через силовой коммутатор К по очереди в зависимости от режима работы ЭП: в двигательном режиме подключается АБ, если напряжение СКБ ниже максимального возможного ЭДС якоря, а в генераторном режиме подключается СКБ. Переключение производится в бестоковые паузы. Основным недостатком обоих схем является двукратное изменение питания ШИП, что требует расчёта его и электрической машины на работу с повышенным напряжением питания относительно номинального.

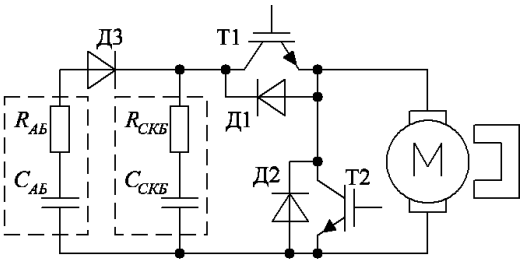


Рис. 1 — схема с диодом между АБ и СКБ

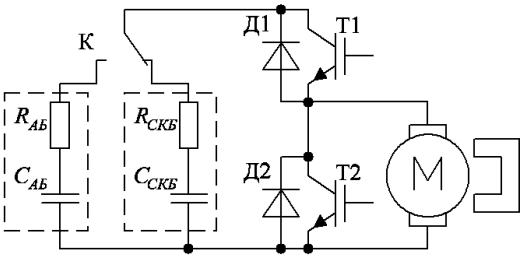


Рис. 2 — схема с переключением между АБ и СКБ

В соответствии с расчётом ранее опубликованной работе [4] выбраны основные силовые компоненты: машина постоянного тока с постоянными магнитами (МПТ с ПМ) 2×LEM200-D135-RAGS [5] максимальной мощностью 72 кВт, номинальным током 200 А и массой 30 кг; АБ из $N_{Посл}$ = 60 последовательно соединённых параллельных сборок по $N_{Пар}$ = 40 литий-ионных элементов NCR18650 [6] ёмкостью по Ah = 2,9 А·ч с максимальным напряжением U_{MAX} = 4 В и минимальным U_{MIN} = 3,2 В и общей массой 110 кг; 150 ионисторов BCAP1200 [7] последовательно соединённых в СКБ общей массой 40 кг.

Компьютерная модель сделана в программе Matlab в пакете Simulink. Работа АБ предполагается на линейном участке зарядно-разрядной характеристики с неизменным внутренним сопротивлением и достаточно малым током, чтобы считать её ёмкость неизменной, поэтому она представлена в виде последовательных конденсатора ёмкостью CАБ = 3600 $N_{Пар} \cdot Ah$ / ($U_{MAX} - U_{MIN}$) / $N_{Посл}$ = 8700 Ф и резистора с сопротивлением RАБ = $N_{Пар} \cdot R_{Эл}$ / $N_{Посл}$ = 0,1 Ом. Ёмкость и внутреннее сопротивление СКБ, также как и аккумуляторов, в данной модели принято независимым от напряжения и тока, поэтому они тоже представлены в виде конденсатора ёмкостью $C_{СКБ} = C_{Ион} / N_{Ион}$ = 8 Ф с последовательным резистором сопротивлением $R_{СКБ} = R_{Ион} \cdot N_{СКБ}$ = 0,05 Ом. В качестве МПТ с ПМ используется блок DC Machine из библиотеки SimPowerSystems, соответствующий уравнению якорной цепи $U_Я = K \cdot Ф \cdot \omega + R_Я \cdot I_Я + L_Я \cdot dI_Я / dt$ с неизменными параметрами, которые состав-

© А. В. Семиков, 2015

ляют $R_я$ = 0,025 Ом, $L_я$ = 0,000125 Гн и К · Ф = 0,42. Силовые ключи в открытом состоянии моделируются, как резисторы сопротивлением 0,004 Ом, а в закрытом 100000 Ом, переключение предполагается мгновенным. Переходные процессы токов и напряжений в цепях ЭП после каждого изменении состояния ключей моделировались, так как они влияют на устойчивость системы управления и на потери электроэнергии. Трансмиссия предполагается с неизменяемым радиусом приведения ρ = 0,0674 м, состоящая из дифференциала и кардана, её КПД принят η = 95%. При движении на электромобиль действует сила сопротивления воздуха (зависящая от аэродинамического коэффициента c_a и площади лобового сопротивления S) и трение качения (зависящее от коэффициента трения μ и массы m), поэтому момент сопротивления в модели для каждого шага вычисления рассчитывается по зависимости:

$$M_C = \rho\,(c_a \cdot S \cdot \rho^2 \cdot \omega^2 / 2 + \mu \cdot m \cdot g) / \eta.$$

Моделирование произведено для нескольких стандартных городских циклов движения: ECE-15, New European Driving Cycle (NEDC), Common Artemis Driving Cycles (CADC), Japan 10 Mode Cycle (J10m), Japan 10-15 Mode Cycle (J10-15m), JC08, US FTP 72 [8], отличающихся скоростями и ускорениями, что позволяет более точно определить энергоэффективность. Временные зависимости скорости (V), тока якоря ($I_я$), тока АБ ($I_{АБ}$) и СКБ ($I_{СКБ}$), напряжение АБ ($U_{АБ}$) и СКБ ($U_{СКБ}$) при движении в цикле J10m представлены на рис. 3—7.

В начальный момент времени при трогании расходуется остаточный заряд СКБ от предыдущего торможения, который может храниться несколько недель благодаря медленному саморазряду СКБ. При этом ток аккумулятора остаётся равным нулю в схеме с диодом (рис. 4), так как напряжение на СКБ выше, чем на АБ и диод Д3 предотвращает заряд АБ, а в схеме с переключением (рис. 5), так как к ШИП подключена только СКБ.

В схеме с диодом по мере разряда при достижении напряжения СКБ напряжения АБ (рис. 6) начинает идти ток через диод Д3, плавно нарастая по мере увеличения разницы напряжений АБ и СКБ, которая прикладывается к внутреннему сопротивлению АБ. В схеме с переключением СКБ отключается при снижении напряжения (рис. 7) до максимально возможной ЭДС якоря, так как при дальнейшем разряде исчезает возможность контролировать ток якоря на максимальных скоростях. Преимуществом этой схемы является независимость минимального напряжения СКБ, следовательно, полное использования её ёмкости при любом напряжении АБ, в отличие от варианта с диодом, где оно ограничено текущим зарядом АБ.

С началом торможения в схеме с диодом начинает расти напряжение СКБ, повышаясь выше напряжения АБ и её ток становиться равным нулю из-за последовательного диода Д3. В схеме с переключением между накопителями при задании генераторного тока якоря МПТ с ПМ отключается АБ и подключается СКБ в момент нулевого тока якоря и, соответственно,

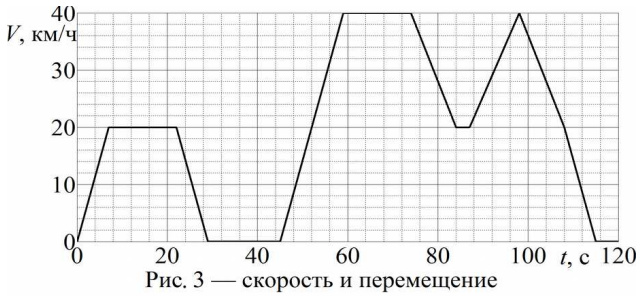


Рис. 3 — скорость и перемещение

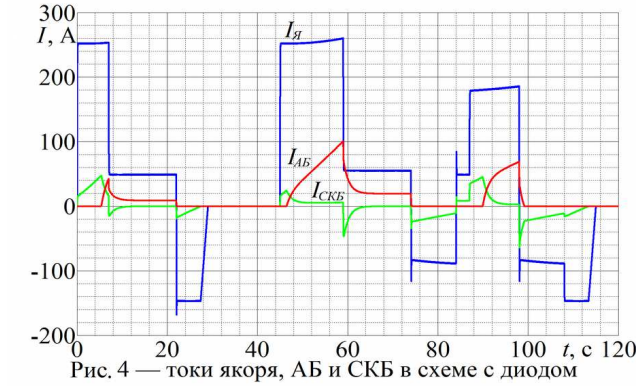


Рис. 4 — токи якоря, АБ и СКБ в схеме с диодом

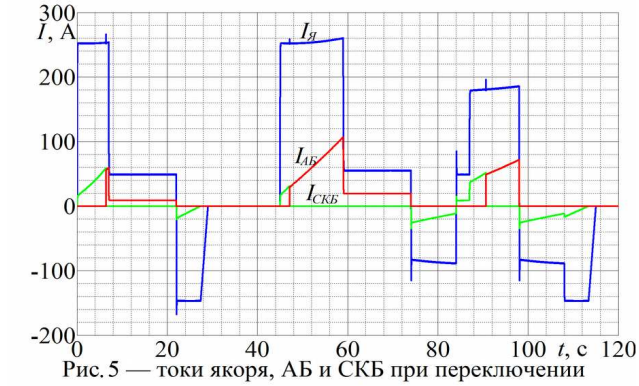


Рис. 5 — токи якоря, АБ и СКБ при переключении

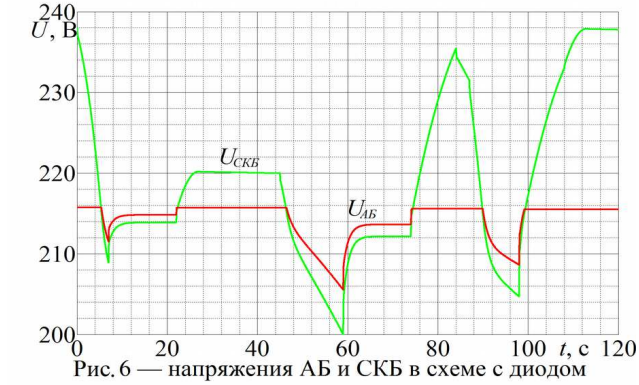


Рис. 6 — напряжения АБ и СКБ в схеме с диодом

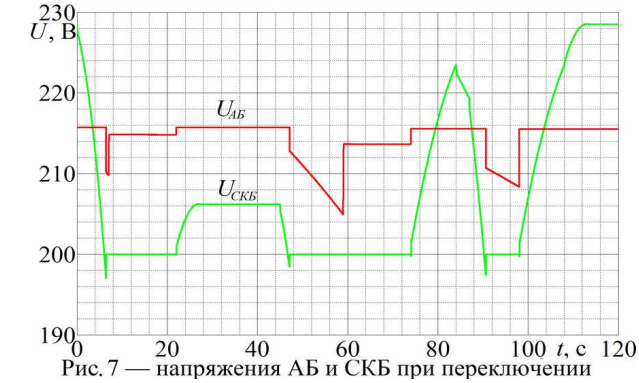


Рис. 7 — напряжения АБ и СКБ при переключении

накопителей.

На основе полученных временных зависимостей токов и напряжений для каждого цикла были рассчитаны значения расхода электроэнергии и среднеквадратичных токов якоря, АБ и СКБ и занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – затраты электроэнергии и токи силовых компонентов при движении в различных циклах

Цикл движения		ECE15	NEDC	CADC	J10m	J10-15m	JC08	FTP72
Расход электроэнергия при движении, кВт·ч/100км	без рекуперации	17,97	17,18	28,74	19,57	18,51	19,05	19,79
	с диодом	14,79	14,98	22,50	15,40	14,72	15,06	16,67
	с переключением	14,77	14,97	22,71	15,44	15,59	15,1	16,73
Экономия энергии при использовании рекуперации	с диодом	17,8%	12,9%	21,7%	21,3%	20,5%	20,9%	15,8%
	с переключением	17,8%	12,9%	21,0%	21,1%	20,3%	20,7%	15,4%
Дальность проезда на одном заряде с рекуперацией, км		146	144	95	140	147	143	130
Среднеквадратичный ток АБ, А	без рекуперации	26,81	39,55	46,75	29,23	34,25	41,50	47,74
	с диодом	24,7	37,83	38,57	25,2	30,39	34,15	41,62
	с переключением	25,34	38,30	42,94	27,04	31,93	35,81	44,18
Уменьшение среднеквадратичного тока АБ при использовании рекуперации	с диодом	7,9%	4,4%	17,5%	12,2%	9,9%	17,7%	12,8%
	с переключением	5,5%	3,2%	8,2%	7,5%	6,8%	13,7%	7,5%
Среднеквадратичный ток СКБ, А	с диодом	11,81	13,60	24,41	13,87	15,47	16,77	22,21
	с переключением	12,23	14,90	23,49	14,09	15,80	16,92	21,61
Среднеквадратичный ток двигателя, А		122	119	189	131	122	139	163

Выводы. Компьютерное моделирование продолжительных режимов движения показало:

- значения среднеквадратичных токов ниже допустимых продолжительных, следовательно, выбранные компоненты подходят по нагреву;

- рекуперативное торможение с использование СКБ массой 40 кг позволяет сократить расход электроэнергии на 13…22%, при этом он одинаков для обоих рассмотренных вариантов схем;

- расход электроэнергии составляет 15…23 кВт·ч / 100 км, что обеспечивает на порядок меньшие денежные затраты, чем на приобретение углеводородных топлив для автомобилей с ДВС

- на одном заряде можно проехать 95…147 км при массе 110 кг выбранной литий-ионной АБ для электромобиля массой 1500 кг, что является достаточным для большинства, так как более 85% проезжают в день менее 120 км [9];

- применение СКБ позволяет снизить среднеквадратичный ток АБ на 3…18%, что уменьшает её износ;

- среднеквадратичные токи АБ и СКБ меньше в схеме с диодом, так как процесс перераспределения мощности между накопителями плавный, в результате АБ и СКБ меньше греются и медленнее стареют, поэтому эта схема предпочтительней, чем с переключением между накопителями, более полно использующая ёмкость СКБ.

Список литературы: 1. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. — Taylor & Francis Group, 2009. — 471с. **2.** J. Cao, A. Emadi, “A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, IEEE Transactions on power electronics, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2012. **3.** Патент Украины №85585 «Електропривод електромобіля», НТУ «ХПИ». **4.** Гончар А.С., Семиков А.В. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе электромобиля с ионисторами // Зб. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2012. – С. 342–343. **5.** Характеристики МПТ с ПМ 2×LEM200-D135-RAGS [Электронный ресурс]. — режим доступа: http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html **6.** Характеристики аккумуляторов NCR18650 [Электронный ресурс]. — режим доступа: http://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/ncr18650.pdf **7.** Характеристики ионисторов BCAP1200 [Электронный ресурс]. — режим доступа: http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html **8.** Параметры циклов [Электронный ресурс]. — режим доступа: http:// www.dieselnet.com/standards/ **9.** Seth Leitman, Bob Brant. Build your own electric vehicle. — McGraw-Hill Companies, 2009. — 329с.

Bibliography (transliterated): 1. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. — Taylor & Francis Group, 2009. — 471s. **2.** J. Cao, A. Emadi, “A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, IEEE Transactions on power electronics, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2012. **3.** Patent Ukrainyi #85585 «Elektroprivod elektromobIlya», NTU «HPI». **4.** Gonchar A.S., Semikov A.V. K realizatsii rekuperativnyih rezhimov v elektroprivode elektromobilya s ionistorami // Zb. mater. konf. «ElektromehanIchnI ta energetichnI sistemi, metodi modelyuvannya ta optimIza-tsIYi». – Kremenchuk, 2012. – S. 342–343. **5.** Harakteristiki MPT s PM 2×LEM200-D135-RAGS [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html **6.** Harakteristiki akkumulyatorov NCR18650 [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: http://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/ncr18650.pdf **7.** Harakteristiki ionistorov BCAP1200 [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html **8.** Parametryi tsiklov [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: http:// www.dieselnet.com/standards/ 9. Seth Leitman, Bob Brant. Build your own electric vehicle. — McGraw-Hill Companies, 2009. — 329s.

Поступила (received) 20.07.2015

УДК 62-83

А. Л. ДЕРЕЦ, канд.техн.наук, доц. ДГТУ, Днепродзержинск;
А. В. САДОВОЙ, д-р техн.наук, проф. ДГТУ, Днепродзержинск

ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РЕЖИМА «БОЛЬШОГО ТРЕУГОЛЬНИКА» РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕТВЁРТОГО ПОРЯДКА МЕТОДОМ N-i ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Введение. Релейная система подчинённого регулирования (СПР) скорости, синтезированная методом N-i переключений [1], способна сформировать оптимальный по быстродействию процесс разгона электропривода с упругой кинематической цепью. Настройки такой системы определяются уровнями ограничения канонических координат, которые обусловлены предельно допустимыми значениями промежуточных координат объекта управления.

Постановка задачи исследования. Уровень ограничения ускорения двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) диктуется допустимым максимумом упругого момента. Однако данный максимум, рассчитываемый на основании конструктивных характеристик ЭМС, в ряде динамических режимов не может быть достигнут по условиям реализуемости оптимальной по быстродействию переходной траектории. К таким режимам относится, в частности, процесс разгона двухмассовой ЭМС, в котором старшие производные скорости рабочего органа достигают предустановленных уровней ограничения, а максимум ускорения является функцией заданной скорости [2]. На основе аналогии с традиционной классификацией режимов позиционирования он может быть назван режимом «большого треугольника» по форме временной диаграммы ускорения. Самонастройка релейной системы управления электроприводом на данный режим в реальном времени может эффективно осуществляться на основе метода N-i переключений благодаря простоте его математического аппарата. Целью настоящей работы является адаптация настроек релейной СПР четвёртого порядка к оптимальной по быстродействию отработке режима «большого треугольника».

Материалы исследования. Система дифференциальных уравнений невозмущённого движения двухмассовой электромеханической системы имеет вид

$$\left.\begin{aligned} p\,\Omega &= \frac{M_y}{J} = \frac{C_ж\left(k_p\varphi_{дв} - \varphi_{ив}\right)}{J} \\ pM_y &= C_ж\left(k_p\omega_{дв} - \Omega\right); \\ p\,\omega_{дв} &= \frac{M_{дв} - k_p M_y}{J_{дв}}; \\ pM_{дв} &= c\cdot\frac{u - R\cdot M_{дв}/c - c\cdot\omega_{дв}}{L}, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где $\varphi_{ив}$, $\varphi_{дв}$, Ω, $\omega_{дв}$, M_y, $M_{дв}$ M – соответственно угловые положения и скорости исполнительного вала и вала двигателя, упругий момент и момент двигателя, $k_р\varphi_{дв} - \varphi_{ив} = \Delta\varphi$ – угол закручивания упругого элемента, u – напряжение преобразователя; $k_р$, R, L, J, $J_{дв}$, $C_ж$, $c = k\Phi$ – параметры электромеханической системы, $p = d / dt$.

Канонические координаты невозмущенного движения системы стабилизации скорости исполнительного вала выражаются через координаты системы (1) следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} p\,\Omega &= \varphi = \frac{M_y}{J}; \\ p^2\,\Omega &= \omega = \frac{C_ж}{J}\left(\omega_{дв}k_p - \Omega\right); \\ p^3\,\Omega &= \epsilon = k_n\left(M_{дв} - k_o M_y\right); \\ p^4\,\Omega &= a = k_n\left[\frac{c}{L}u - \frac{R}{L}M_{дв} - \left(\frac{c^2}{L} + C_ж k_p k_o\right)\omega_{дв} + C_ж k_o\Omega\right], \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где $k_n = \frac{C_ж k_p}{J_{дв}J}$, $k_o = \frac{Jk_p^2 + J_{дв}}{Jk_p}$ – коэффициенты прямого канала и обратной связи по упругому моменту соответственно.

Величины первой и второй производных скорости исполнительного вала Ω линейно связаны с углом и скоростью закручивания упругого элемента соответственно. Аналогичным образом третья и четвертая производные регулируемой координаты связаны с величинами угловых ускорения и рывка исполнительного вала в системе координат, привязанной к валу двигателя. Это позволяет использовать для канонических координат буквенные обозначения:

© Дерец А.Л., Садовой А.В., 2015

$$\left(\Omega, p\Omega, p^2\Omega, p^3\Omega, p^4\Omega\right)=\left(\Omega, \varphi, \omega, \varepsilon, a\right). \quad (3)$$

В таких обозначениях математическое описание каскада регуляторов релейной системы подчинённого регулирования имеет вид:

$$\left.\begin{array}{c} u_{R1}=u_{R\Omega}=\varphi^*=-\varphi_{max}\cdot sign\left(\Omega-\Omega^*+K_{\Omega\varphi}\cdot\varphi+K_{\Omega\omega}\cdot\omega+K_{\Omega\epsilon}\cdot\varepsilon\right); \\ u_{R2}=u_{R\varphi}=\omega^*=-\omega_{max}\cdot sign\left(\varphi-\varphi^*+K_{\varphi\omega}\cdot\omega+K_{\varphi\epsilon}\cdot\varepsilon\right); \\ u_{R3}=u_{R\omega}=\varepsilon^*=-\varepsilon_{max}\cdot sign\left(\omega-\omega^*+K_{\omega\epsilon}\cdot\varepsilon\right); \\ u_{R4}=u_{R\epsilon}=u=-U_{max}\cdot sign\left(\varepsilon-\varepsilon^*\right), \end{array}\right\} \quad (4)$$

где u_{Ri} – сигнал i-го (считая от входа) регулятора; символом «*» отмечены заданные значения координат, как входное, так и формируемые регуляторами; индексами «*max*» отмечены уровни ограничений канонических координат.

Параметрический синтез внутренних контуров данной системы подчинённого регулирования и аналитическое исследование их устойчивости выполнены в работе [1] в системе обозначений (3), что обеспечивает преемственность результатов синтеза коэффициентов $K_{\varphi\omega}$, $K_{\varphi\varepsilon}$, $K_{\omega\epsilon}$ при оптимизации по быстродействию систем более высоких порядков:

$$K_{\omega\varepsilon}=\frac{\varepsilon_{max}}{2\cdot a_{max}},\quad K_{\varphi\omega}=\frac{\omega_{max}}{2\cdot\varepsilon_{max}}+\frac{\epsilon_{max}}{2\cdot a_{max}},\quad K_{\varphi\varepsilon}=\frac{\omega_{max}}{4\cdot a_{max}}+\frac{\varepsilon_{max}^2}{12\cdot a_{max}^2}. \quad (5)$$

Для синтеза коэффициентов обратных связей $K_{\Omega\varphi}$, $K_{\Omega\omega}$, $K_{\Omega\varepsilon}$ регулятора R_1 = R_Ω системы (4) методом N-i переключений необходимо вывести аналитические выражения координат характерных точек $\boldsymbol{X}^{11}$, $\boldsymbol{X}^{12}$, $\boldsymbol{X}^{13}$ переключения R_1 на прогнозируемой траектории оптимального по быстродействию переходного процесса. Вид временных диаграмм канонических координат системы для оптимизируемого режима разгона представлен на рисунке 1, где характерные точки показаны секущими с соответствующими подписями, заключёнными в окружности, в дополнение к сквозной нумерации точек излома траектории, приведенной на нижней оси времени. Интервалы стабилизации относительных рывка, ускорения и скорости обозначены на рисунке 1 как $T_{s\alpha}$, $T_{s\varepsilon}$, $T_{s\omega}$.

Особенность представленных на рисунке 1 временных диаграмм по сравнению с их наиболее общим видом, положенным в основу синтеза параметров в работе [1], состоит в равенстве нулю интервала $T_{s\varphi}$ стабилизации первой производной скорости $\varphi(t)$, которая начинает снижение в момент достижения своего максимума, а сам максимум φ_{max} не определён до начала разгона и является функцией задания скорости:

$$T_{s\varphi}=0, \quad (6)$$

$$\varphi_{max}=var. \quad (7)$$

В отличие от расчетной траектории, принятой за основу в работе [2] и представляющей собой предельный случай трапецеидальной диаграммы с нулевым интервалом стабилизации угла закручивания упругого вала, представленная на рисунке 1 траектория требует для её реализации минимальное число переключений регуляторов, в полной мере соответствуя критерию оптимальности по быстродействию. Специфика формы данной траектории позволяет отступить от принятого в методе N-i переключений правила, привязывающего характерные точки переключения регуляторов к моментам начала снижения производных регулируемой координаты в очерёдности их порядка. Благодаря реализации реверса скорости закручивания упругого вала $\omega(t)$ в промежутке времени 5 – 7 на едином интервале стабилизации $\varepsilon(t)$, первая точка переключения регулятора R_1 может быть сдвинута из точки 6 в более ранний момент времени 4. На рисунке 1 перенос $\boldsymbol{X}^{11}$ показан большой стрелкой. Подобная мера, апробированная на системах третьего порядка [3], способствует снижению колебательности синтезируемого регулятора в скользящем режиме.

С учётом симметрии оптимальной траектории относительно секущей в точке 6, координаты реальных характерных точек конечного участка траектории можно получить [1] из координат симметричных им точек начального участка траектории с помощью преобразования

$$X_k^{i,j}=(-1)^{(k+i+1)}\cdot\hat{X}_k^{i,j}, \quad (8)$$

где i - номер регулятора, считая от входа, j - номер характерной точки по порядку переключений во времени, k - индекс канонической координаты, знак «^» отмечает расчетные точки, отображаемые в реальные.

В итоге при синтезе R_1 прогнозированию подлежат вместо точек 4,9,12 точки 1,3,8, что позволяет заметно сократить объём расчётов.

Также следует заметить, что в методе N-i переключений [1, 2] принимается допущение о постоянстве N-й производной выходной координаты на интервалах постоянства управляющего воздействия. Благодаря этому допущению приращения координат на всех промежутках между соседними точками излома траектории рассчитываются как суммы ряда Тейлора с конечным числом членов.

При нулевых начальных условиях выполним интегрирование по времени системы (2) на участке 0-1 с постоянным рывком $\alpha_{0\text{-}1} = \alpha_{max}$, в результате получим координаты состояния в точке 1 оптимальной траектории:

$$\varepsilon_1 = a_{max} \cdot T_{sa} = \epsilon_{max}; \;\; \omega_1 = a_{max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2}; \;\; \varphi_1 = a_{max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}; \;\; \Omega_1 = a_{max} \cdot \frac{T_{sa}^4}{24}. \tag{9}$$

Значения вектора состояния в точке 2 получим путем интегрирования по времени системы (2) на участке 1-2 при начальных условиях, соответствующих состоянию в точке 1, и нулевом рывке $\alpha_{0\text{-}1} = 0$. В связи с громоздкостью аналитических выкладок опустим промежуточные результаты и координаты точек, непосредственно не задействованных в процедуре синтеза регулятора, приведя лишь координаты необходимых для синтеза точек. К ним относятся расчётные характерные точки переключения 1,3,8 и точка 6 максимума $\varphi(t)$.

Значения вектора состояния в точке 3 получим путем интегрирования системы (2) на участке 2-3 при начальных условиях, соответствующих состоянию в точке 2, и постоянном отрицательном рывке $\alpha_{2\text{-}3} = -\alpha_{max}$:

$$\begin{gathered}\varepsilon_3 = a_{max} \cdot T_{sa}; \;\; \omega_3 = a_{max}\left(T_{sa}^2 + T_{sa} \cdot T_s \varepsilon\right) = \omega_{max}; \;\; \varphi_3 = a_{max}\left(T_{sa}^3 + \frac{3}{2} T_{sa}^2 \cdot T_{s\varepsilon} + \frac{1}{2} T_{sa} \cdot T_{s\varepsilon}^2\right); \\ \Omega_3 = a_{max}\left(\frac{7}{12} T_{sa}^4 + \frac{7}{6} T_{sa}^3 \cdot T_{s\varepsilon} + \frac{3}{4} T_{sa}^2 \cdot T_{s\varepsilon}^2 + \frac{1}{6} T_{sa} \cdot T_{s\varepsilon}^3\right).\end{gathered} \tag{10}$$

Выполнив интегрирование системы (2) до точки 12, можно получить величину воспроизводимого скачка $\Omega^* = \Omega_{12}$, однако с учетом симметрии расчетной траектории допустимо при установлении связи заданной скорости с максимумами промежуточных координат ограничиться равенством

$$\Omega^* = 2 \cdot \Omega_6 . \tag{11}$$

Для достижения точки 6 необходимо выполнить интегрирование на интервалах 3-4, 4-5 и 5-6, длительности которых равны $T_{s\omega}$, T_{sa} и $T_{s\varepsilon 1}$ соответственно. Для оптимизируемого динамического режима максимумы координат ω, ε, a являются предустановленными, что делает известными также длительности интервалов T_{sa} и $T_{s\varepsilon}$. Длительность $T_{s\varepsilon 1}$ можно определить, подставив в равенство $\omega_6 = \omega_3 - a_{max} \frac{T_{sa}^2}{2} - \varepsilon_{max} T_{se\,1} = 0$ выражения ω_3 и $\varepsilon_{\max}$ согласно (9), (10):

$$a_{max}\left(T_{sa}^2 + T_{sa} \cdot T_{s\varepsilon}\right) - a_{max} \frac{T_{sa}^2}{2} - a_{max} T_{sa} T_{se\,1} = 0 . \tag{12}$$

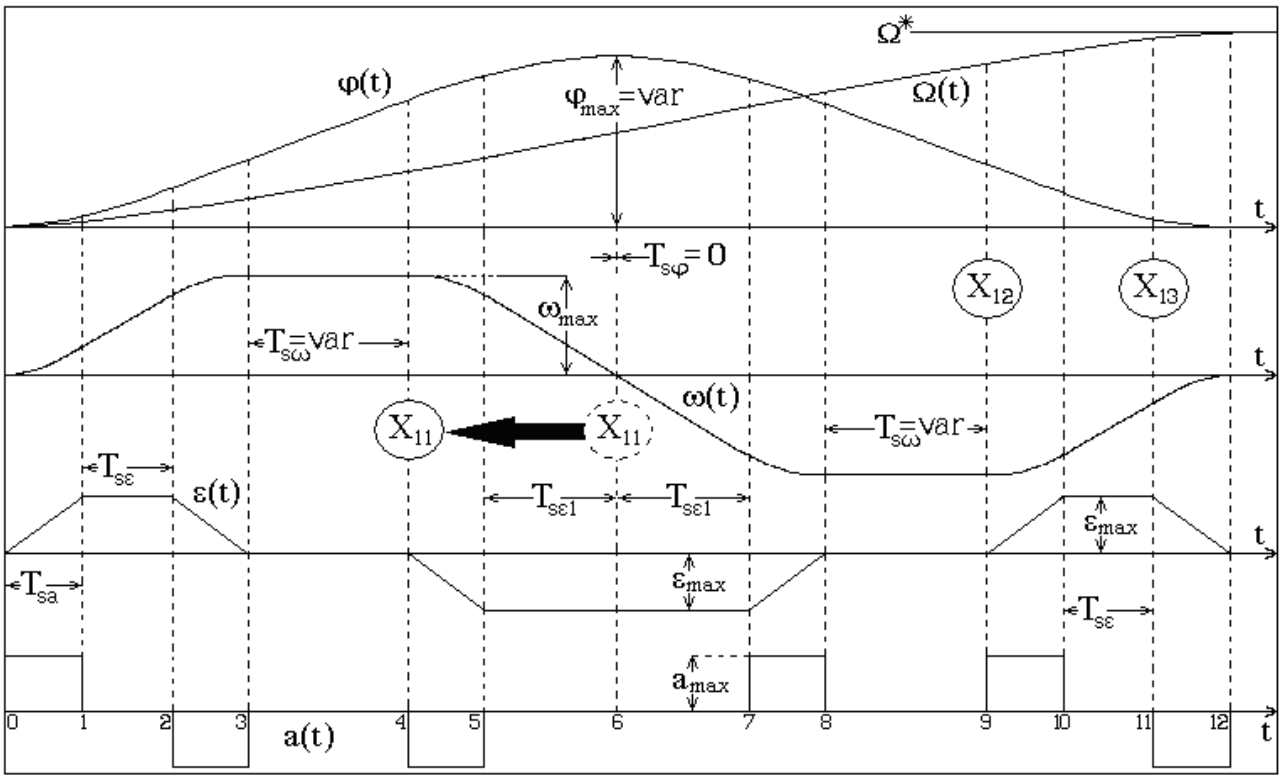


Рис. 1. Временные диаграммы режима «большого треугольника»

Решив уравнение (12) относительно $T_{s\%iepsilon1}$, получим

$$T_{se1}=T_{s\epsilon}+\frac{1}{2}T_{sa}\,. \tag{13}$$

Установленная взаимосвязь $T_{s\varepsilon1}$ с известными интервалами T_{sa} и $T_{s\varepsilon}$ актуальна для всего диапазона скоростей, воспроизводимых с разгоном по рассматриваемой траектории. Соотношение (13) позволяет избежать введения в расчёт новых переменных, что способствует повышению компактности выводимых далее аналитических выражений.

Для определения $T_{s\omega}$ и $\varphi_{\max}$ продолжим расчёт до точки 6, для которой получим выражения координат состояния:

$$\begin{gathered}\varepsilon_6=-a_{max}\cdot T_{sa};\;\; \omega_6=0;\;\; \varphi_6=a_{max}\left(\frac{47}{24}T_{sa}^3+3T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^2+T_{sa}^2\cdot T_{s\omega}+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}\cdot T_{s\omega}\right)=\varphi_{max};\\ \Omega_6=a_{max}\left(3\cdot T_{sa}^4+\frac{13}{2}T_{sa}^3\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{9}{2}T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}^2+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^3+T_{s\omega}\cdot\left(\frac{5}{2}T_{sa}^3+4\cdot T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{3}{2}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^2\right)+\frac{1}{2}T_{s\omega}^2\cdot\left(T_{sa}^2+T_{sa}\cdot T_{s\epsilon}\right)\right).\end{gathered} \tag{14}$$

Специфика режима «большого треугольника», отражаемая равенствами (6), (7), обусловливает вариативность расчётного интервала стабилизации второй производной скорости $T_{s\omega}$, взаимосвязь которого с $\varphi_{\max}$ имеет вид

$$T_{s\omega}=\frac{\varphi_{max}-\varphi_{pm}}{\omega_{max}}\,, \tag{15}$$

где $\varphi_{pm}=\varphi_3-\varphi_3+\varphi_6-\varphi_4$ – суммарный угол закручивания интервалов разгона 0-3 и торможения 4-6.

Приведём формулу φ_{pm}, опустив вывод:

$$\varphi_{pm}=a_{max}\left(\frac{47}{24}T_{sa}^3+3T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^2\right). \tag{16}$$

Заметим, что φ_{pm} не зависит от искомой длительности $T_{s\omega}$, поскольку в разност $\varphi_6-\varphi_4$ все приращения угла, приобретаемые на интервале $T_{s\omega}$, взаимно уничтожаются, то есть для рассматриваемой формы траектории величина φ_{pm} является известной константой.

Подставив формулу (15) в выражение Ω_6 из (14), а результат этой подстановки - в равенство(11), получим квадратное уравнение относительно уровня ограничения φ_{max} первой производной скорости, неотрицательный корень которого связывает φ_{max} с заданным значением скорости Ω^*:

$$\varphi_{max}=\sqrt{\left(\frac{\omega_{max}^2}{2\cdot\varepsilon_{max}}\right)^2+\Omega^*\cdot\omega_{max}}+\varphi_{pm}-\omega_{max}\left(\frac{3\cdot\omega_{max}}{2\cdot\varepsilon_{max}}+\frac{\varepsilon_{max}}{a_{max}}\right). \tag{17}$$

Формула (17) позволяет выполнить настройку уровня ограничения регулятора R_1 каскада (4) на текущий максимум $\varphi(t)$, соответствующий заданному значению $\Omega(t)$. Подстановка формулы (17) в выражение (15) делает определёнными координаты всех точек излома оптимальной по быстродействию траектории, выражения которых зависят от $T_{s\omega}$, а именно с 4-й по 12-ю. Продолжив построение траектории до точки 8, получим координаты последней расчётной характерной точки переключения R_1:

$$\begin{gathered}\varepsilon_8=0;\;\; \omega_8=-a_{max}\left(T_{sa}^2+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}\right)=-\omega_{max};\\ \varphi_8=a_{max}\left(T_{sa}^3+\frac{3}{2}T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{1}{2}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^2+T_{sa}^2\cdot T_{s\omega}+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}\cdot T_{s\omega}\right);\\ \Omega_8=a_{max}\left(\frac{65}{12}T_{sa}^4+\frac{71}{6}T_{sa}^3\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{33}{4}T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}^2+\frac{11}{6}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^3+T_s\omega\left(4\,T_{sa}^3+\frac{13}{2}T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{5}{2}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^2\right)+\frac{1}{2}T_{s\omega}^2\left(T_{sa}^2+T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}\right)\right).\end{gathered} \tag{18}$$

Подставив определяемые выражениями (9), (10), (18) координаты состояния системы (2) в точках 1,3,8, соответствующих расчётным точкам переключения $\hat{\boldsymbol{X}}^{13},\hat{\boldsymbol{X}}^{12},\hat{\boldsymbol{X}}^{11}$, после выполнения преобразования (8) в уравнение переключения R_1 вида

$$\Delta\Omega+K_{\Omega\varphi}\cdot\varphi+K_{\Omega\omega}\cdot\omega+K_{\Omega\varepsilon}\cdot\varepsilon=0$$

составим систему уравнений

$$\left.\begin{aligned}-\Omega_8+K_{\Omega\varphi}\varphi_8-K_{\Omega\omega}\cdot\omega_8+K_{\Omega\varepsilon}\cdot\varepsilon_8=0\\ -\Omega_3+K_{\Omega\varphi}\varphi_3-K_{\Omega\omega}\cdot\omega_3+K_{\Omega\varepsilon}\cdot\varepsilon_3=0\\ -\Omega_1+K_{\Omega\varphi}\varphi_1-K_{\Omega\omega}\cdot\omega_1+K_{\Omega\varepsilon}\cdot\varepsilon_1=0\end{aligned}\right\}. \tag{19}$$

Решение системы (19) позволяет получить формулы коэффициентов обратных связей регулятора R_1 из со-

става каскада регуляторов (4) релейной СПР четвёртого порядка, настроенного на выполнение переключений в трёх (N-i = 4-1 = 3) точках переходной траектории, соответствующих точкам 4, 9, 12 (рисунок 1):

$$K_{\Omega\varphi}=3T_{sa}+2T_{s\varepsilon}+\frac{1}{2}T_{s\omega};$$

$$K_{\Omega\omega}=\frac{29}{12}T_{sa}^2+\frac{35}{12}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{5}{6}T_{s\varepsilon}^2+\frac{1}{2}T_{sa}\cdot T_{s\omega}+\frac{1}{4}T_{s\varepsilon}\cdot T_{s\omega}; \quad (20)$$

$$K_{\Omega\varepsilon}=\frac{3}{4}T_{sa}^3+\frac{9}{8}T_{sa}^2\cdot T_{s\varepsilon}+\frac{5}{12}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}^2+\frac{1}{6}T_{sa}^2\cdot T_{s\omega}+\frac{1}{8}T_{sa}\cdot T_{s\varepsilon}\cdot T_{s\omega}.$$

Выражения (20) наряду с (17), (15), (5) обеспечивают настройку каскада регуляторов (4) на формирование оптимального по быстродействию переходного процесса отработки Ω^* в режиме «большого треугольника». Вместе с тем, алгоритм адаптации системы к воспроизведению представленных на рисунке 1 диаграмм должен включать проверку текущей величины задающего воздействия на принадлежность диапазону реализуемости данной формы траектории $[\Omega^*_{min\,\Delta}, \Omega^*_{max\,\Delta})$.

Верхняя граница диапазона $\Omega^*_{max\,\Delta}$ может быть найдена подстановкой предустановленного максимума первой производной φ^*_{max}, рассчитанного по конструктивным ограничениям ЭМС (1), в формулу (15) с последующей подстановкой полученного $T_{s\omega}$ в формулу (11), в которой Ω_6 определена согласно (14). Нижняя граница вычисляется из условия существования ненулевого интервала стабилизации второй производной $\Omega(t)$

$$T_{s\omega}\geq 0\ .$$

Подставив предельное условие $T_{s\omega} = 0$ в выражение Ω_6 з системы (14), а результат – в формулу (11), найдём $\Omega^*_{min\,\Delta}$. Заметим, что вычисление границ диапазонов реализуемости различных форм переходной траектории выполняется при инициализации контроллера, а в цикл управления наряду с расчётом параметров каскада (4) входит только проверка условий

$$\Omega^*\geq\Omega^*_{min\,\Delta},\quad \Omega^*<\Omega^*_{max\,\Delta} \quad (21)$$

при ступенчатом изменении Ω^*.

Выводы. Установленная в настоящей работе взаимосвязь между величиной задающего воздействия и параметрами каскада релейных регуляторов позволяет использовать метод N-i переключений для настройки системы управления на отработку оптимальной по быстродействию траектории режима «большого треугольника». Благодаря своей простоте процедура параметрического синтеза СПР, сводящаяся к проверке условий (21) и последовательности расчетов по формулам (17), (15), (20), (5), может служить элементом алгоритма управления адаптивных цифровых систем, осуществляющих самонастройку в режиме реального времени. Полученные аналитические выражения коэффициентов относятся к каноническим координатам системы, что позволяет распространить результаты данной работы на все системы четвертого порядка, замкнутые по старшим производным выходной величины.

Список литературы: 1.*Садовой А.В.* Параметрический синтез релейной системы подчинённого регулирования скорости электропривода с упругой связью / *Садовой А.В., Дерец А.Л.* // Вестник КГПУ – Кременчуг: КГПУ, – выпуск 3/2008(50). – часть 1. – С.83 – 87. **2.***Дерец А. Л.* Оптимизация по быстродействию системы регулирования скорости электропривода методом N-i переключений при неопределённом максимуме упругого момента / *Дерец А. Л., Садовой А. В.*// Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск .– 2013. – Вып. 1 (21). С.150 – 156. **3.***Дерец А. Л.* Оптимизация по быстродействию позиционного электропривода методом N-i переключений в контексте теоремы об N интервалах / *Дерец А. Л., Садовой А. В.*// Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск .– 2013. – Вып. 3 (23). С.93 – 97.

Bibliography (transliterated): 1. Sadovoi A.V. “Parametricheskii sintez releinoi sistemy podchinennogo regulirovaniya skorosti elektroprivoda s uprugoi svyaz'yu”. *Vestnik KGPU.* 3.50 (2008):83 – 87.Print. **2.** Derets A. L., Sadovoi A. V. “Optimizatsiya po bystrodeistviyu sistemy regulirovaniya skorosti elektroprivoda metodom N-i pereklyuchenii pri neopredelennom maksimume uprugogo momenta”. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU*. 1.21 (2013): 150 – 156. **3.** Derets A. L., Sadovoi A. V. “Optimizatsiya po bystrodeistviyu pozitsionnogo elektroprivoda metodom N-i pereklyuchenii v kontekste teoremy ob N intervalakh”. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU.* 3.23 (2013): 93 – 97.

Поступила (received) 02.07.2015

УДК 621.313.333.2

В.С. ПЕТРУШИН, д-р техн. наук, проф. ОНПУ;
А.М. ЯКИМЕЦ, канд. техн. наук, доц. ОНПУ;
Р.Н. ЕНОКТАЕВ, магистр ОНПУ

МНОГОАСПЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗНЫХ ЗАКОНАХ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Введение. Многообразие законов частотного управления, используемых в регулируемых электроприводах, предопределяет процедуру выбора определенного закона, что связано с характером, величиной и режимом работы нагрузки привода, а также требуемым диапазоном регулирования. Такой выбор возможен только после сопоставления эксплуатационных характеристик регулируемого асинхронного двигателя (РАД), полученных в результате многоаспектного моделирования. Во ряде научных трудов [1-4] рассматривались электроприводы с различными законами частотного управления.

Постановка задачи. Законы частотного управления при использовании преобразователей частоты – источников регулируемого по величине и частоте напряжения можно разделить на две группы. К первой группе относятся законы, связывающие величины и частоты питающего двигатель напряжения (U/f=const, U/f^2=const, $U/\sqrt{f}$ = const и др.). Ко второй – законы, обеспечивающие постоянство различных магнитных величин электрической машины: потока в воздушном зазоре Φ_δ и потокосцеплений статора Ψ_1 и ротора Ψ_2. Для законов второй группы нахождение величин питающего двигатель напряжения, соответствующего определенной частоте питания обмотки и частоте вращения ротора, может быть выполнено по аналитическим зависимостям [5-8]. Для упрощения эти же значения напряжений используются и при решении системы нелинейных уравнений, описывающих динамические режимы. Для каждого закона частотного управления различными являются нелинейные коэффициенты уравнений (параметры схем замещения), потери в стали магнитопровода, добавочные и механические потери. Эти составляющие потерь, определенные для статических режимов, позволяют рассматривать энергетические показатели в переходных режимах [8-11]. При расчете динамических характеристик должен приниматься во внимание характер нагрузки. Только при «лифтовой» нагрузке момент на валу двигателя остается неизменным. При других характерах нагрузки следует учесть изменение момента на каждом шаге интегрирования системы уравнений. Вид динамических характеристик зависит также от момента инерции привода и скорости нарастания параметра регулирования – частоты преобразователя.

Результаты исследований. Для исследования эксплуатационных характеристик РАД в соответствии с принципами системного подхода обеспечивается совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок [8], что реализовано в программном продукте DIMASDrive [12], разработанном на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета.

С целью ограничения исследований далее рассмотрен электропривод с транзисторным преобразователем частоты с автономным инвертором напряжения и ШИМ- регулированием. Приводным двигателем являлся серийный асинхронный двигатель 4А160S4 со схемой соединения обмотки статора «Y». Анализировались законы частотного управления, связывающие величины и частоты питающего двигатель напряжения (U/f = const и U/f^2=const), а также закон, обеспечивающий постоянство потокосцепления ротора (Ψ_2=const). При моделировании использовалась «вентиляторная» нагрузка, описываемая выражением $M(n) = 0{,}5 + 10^{-5}\cdot n^2$. Рассматривался диапазон регулирования от 200 до 2500 об/мин.

На рис.1 представлено изменение в диапазоне регулирования значений фазных напряжений двигателя при рассматриваемых законах.

Регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических, тепловых, механических, виброакустических величин от числа оборотов, могут быть получены при использовании семейств характеристик, в том числе и механических, при различных параметрах регулирования, на которые накладываются характеристики нагрузочного механизма. На рис.2 представлено семейство механических характеристик и заданной нагрузки, соответствующие различным законам частотного регулирования.

Далее в статье приведены только характеристики, вид которых отличается для рассматриваемых законов частотного управления, что позволяет сравнивать эти законы.

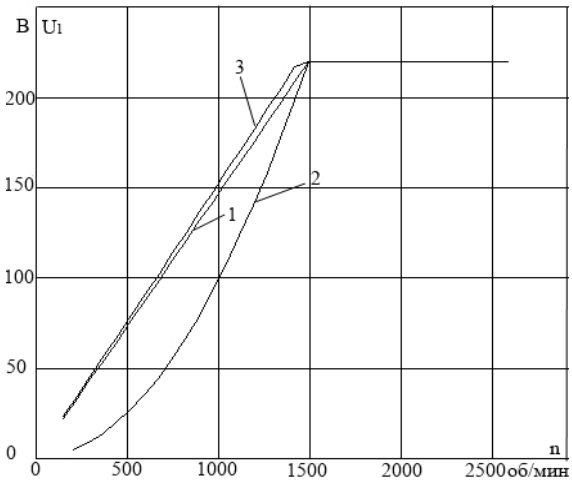


Рис.1 – Изменение фазных напряжений в диапазоне регулирования: 1 – U/f =const; 2 – U/f 2 = const; 3 – Ψ2 =const

© В.С. Петрушин, А.М. Якимец, Р.Н. Еноктаев, 2015

При таком сочетании механических характеристик и нагрузки наблюдается двухзонность, которая проявляется на характере регулировочных характеристик.

В пределах каждой зоны имеет место однообразное изменение механических характеристик и характеристики загрузки.

На рис.3-6 представлены некоторые регулировочные характеристики РАД. Расчет виброакустических показателей (рис.7, 8) магнитного происхождения может быть выполнен по методике, Ю.А. Шумилова и В.Г. Герасимчука [13].

Динамические характеристики были рассмотрены для различных законов при работе на заданную тахограмму (2 с на 1000 об/мин, 1 с – 2000 об/мин) с учетом переходных процессов. Управление двигателем в динамических режимах при законе Ψ_2 =const – скалярное. Результаты моделирования частоты вращения, потребляемого тока и вращающего момента представлены на рис.9-11. На рис.15 представлены расчетные динамические зависимости виброскорости $З_v=f(t)$ и магнитного шума $S_n=f(t)$, полученные для разных законов.

Методика расчета вентиляционного шума серийных асинхронных двигателей хорошо отработана и подтверждена экспериментальными данными [14]. В РАД частота вращения вентилятора изменяется в диапазоне регулирования, что обусловливает изменение аэродинамического шума. В динамических режимах (рис.14) вентиляционный шум нарастает пропорционально частоте вращения, достигая значений, соответствующих установившемуся режиму.

Известная методика расчета механических вибраций для обычных асинхронных короткозамкнутых двигателей [14] предназначена для жестких роторов, к которым относятся роторы АД единых серий. В динамических режимах механические вибрации нарастают пропорционально частоте вращения, достигая значений, соответствующих установившемуся режиму. Характеристики механических вибраций как в статических, так и в динамических режимах мало отличаются при различных законах частотного управления.

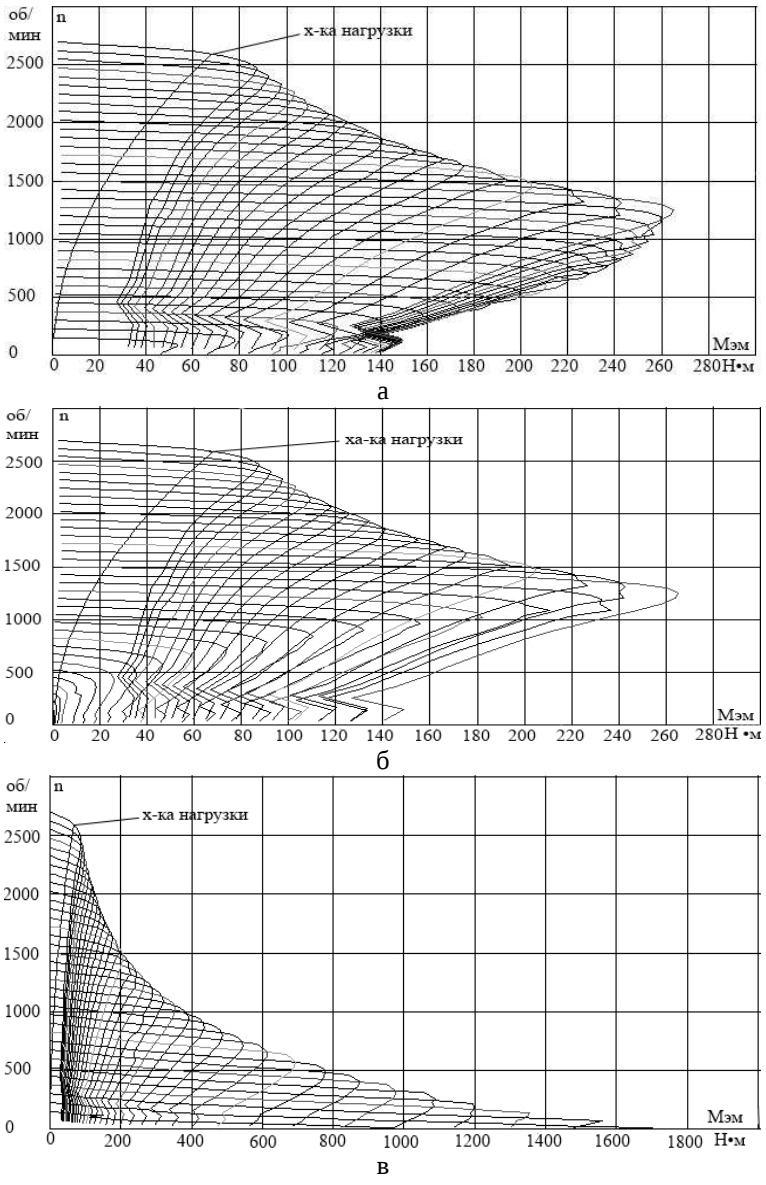


Рис.2 – Семейства механических характеристик при различных законах: а – U/f=const; б – U/f2=const; в – Ψ2 =const

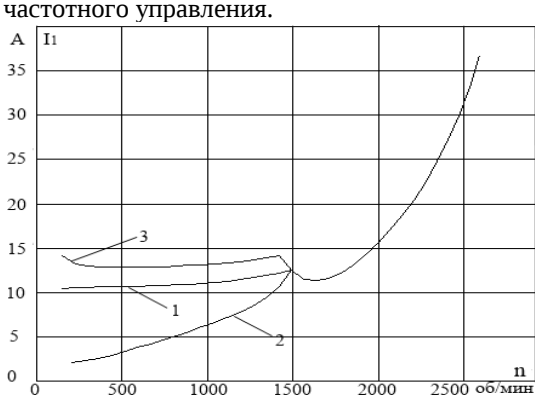


Рис.3 – Изменение потребляемых двигателем токов в диапазоне регулирования: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

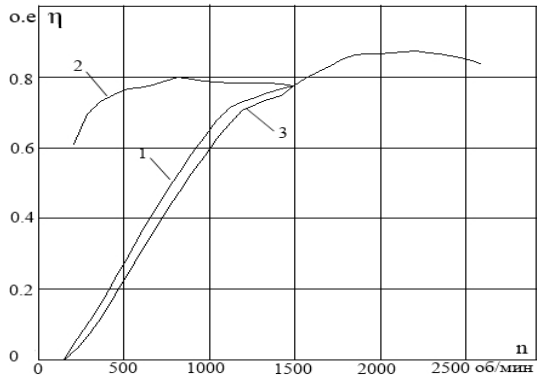


Рис.4 – Изменение КПД двигателя в диапазоне регулирования: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

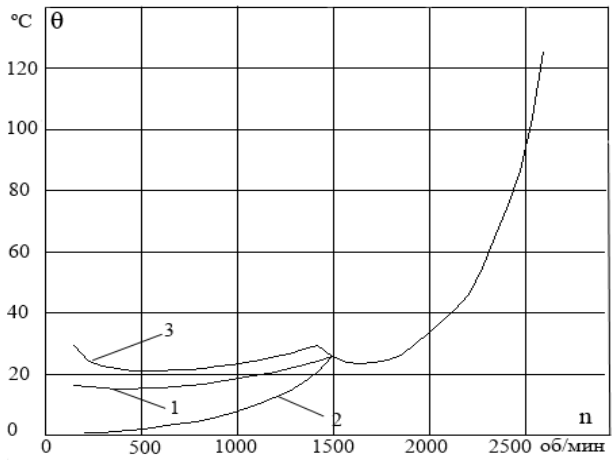


Рис.5 – Изменение температур обмотки статора двигателя в диапазоне регулирования:
1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

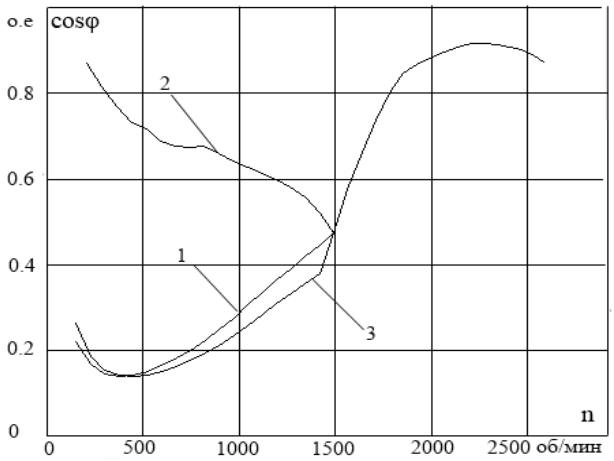


Рис.6 – Изменение коэффициента мощности двигателя в диапазоне регулирования:
1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

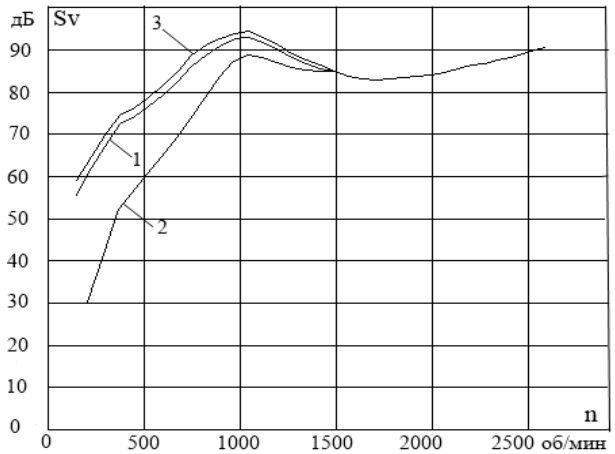


Рис.7 – Изменение виброскорости двигателя в диапазоне регулирования:
1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

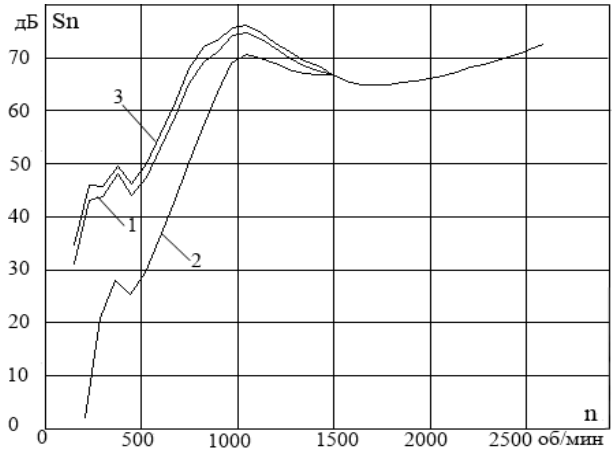


Рис.8 – Изменение магнитного шума двигателя в диапазоне регулирования:
1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

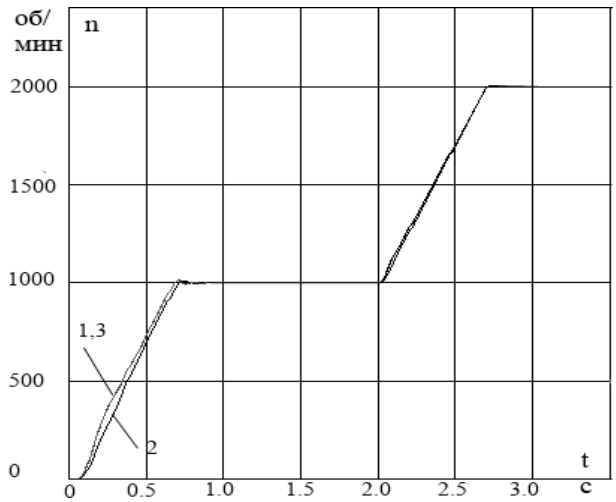


Рис.9 – Изменение частоты вращения двигателя в динамических режимах: 1 – U/f =const;
2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

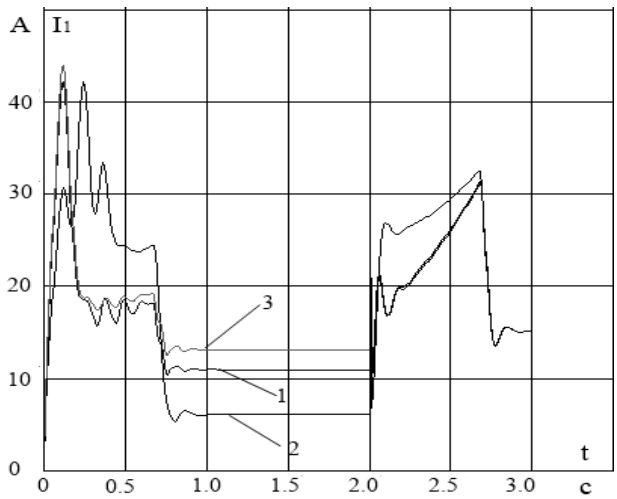


Рис.10 – Изменение потребляемого двигателем тока в динамических режимах: 1 – U/f =const;
2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

При механических расчетах РАД рассматриваются три фактора, характеризующие механическое состояние, - жесткость вала, прочность вала и динамическая грузоподъемность подшипников [15]. Для оценки механического состояния РАД при регулировании предлагается рассмотреть эти же факторы в динамических режимах работы в соответствии с заданной тахограммой.

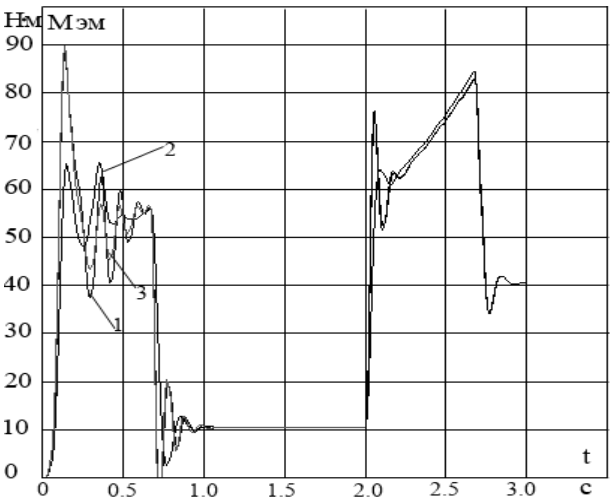


Рис.11 – Изменение электромагнитного двигателя в динамических режимах: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

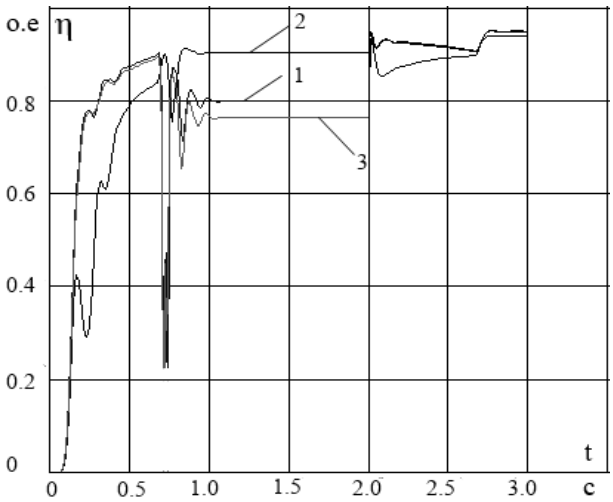


Рис.12 – Изменение КПД двигателя в динамических режимах: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

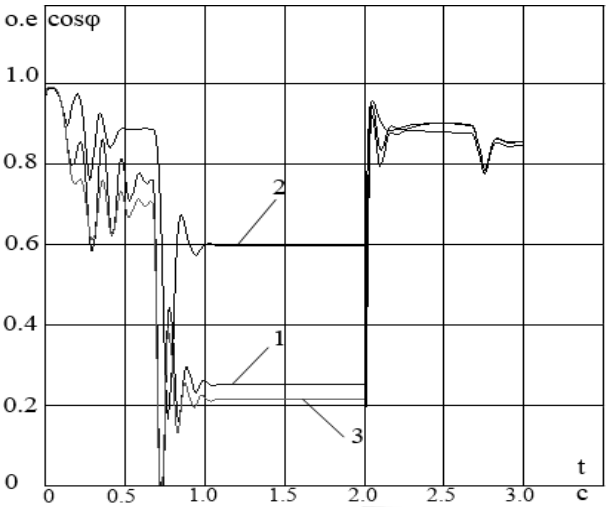


Рис.13 – Изменение коэффициента мощности двигателя в динамических режимах: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

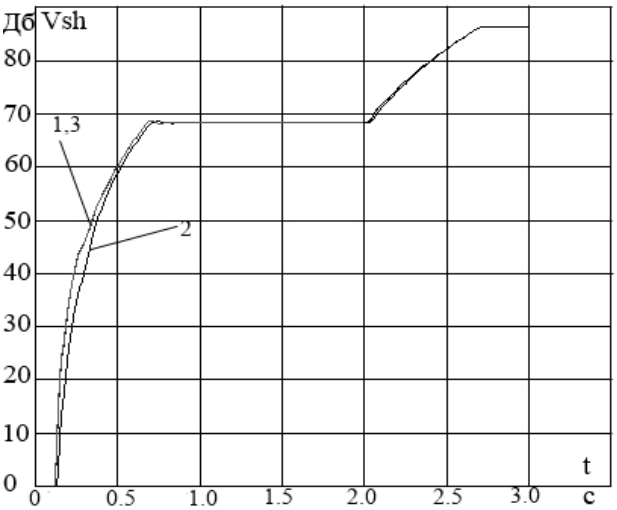
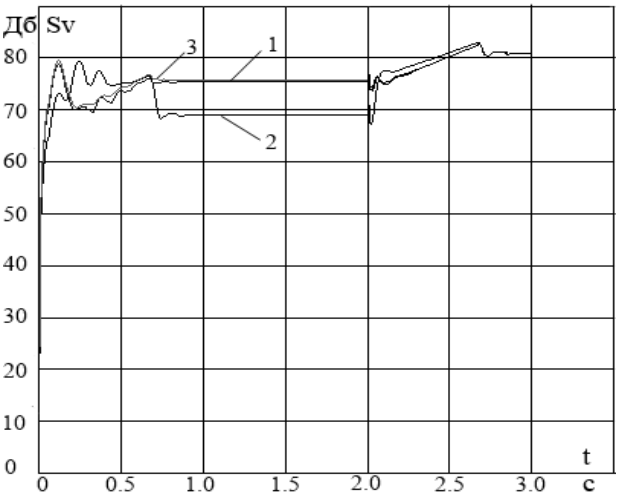
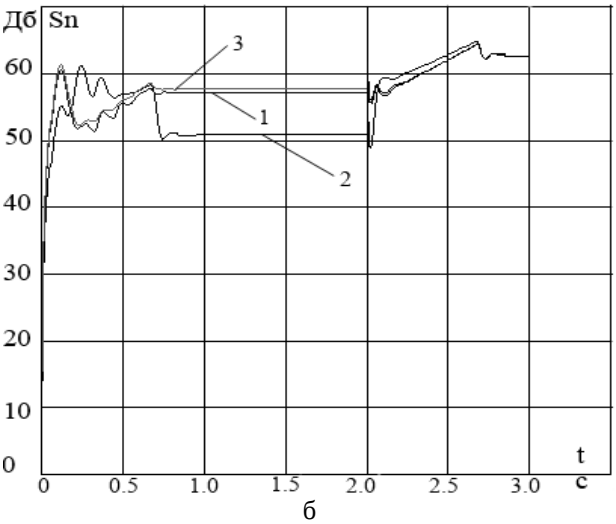


Рис.14 – Изменения вентиляционного шума РАД при различных законах: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const



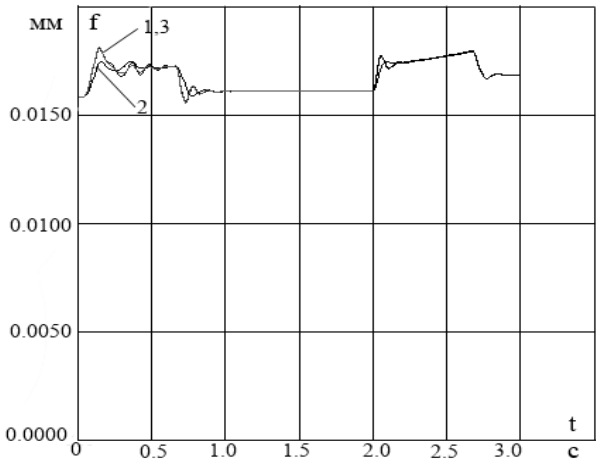
а



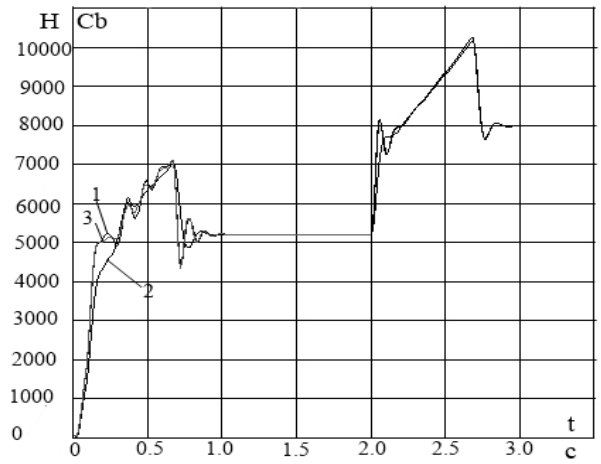
б

Рис.15 – Виброскорость *(а)* и магнитный шум *(б)* двигателя в динамических режимах при различных законах: 1 – U/f =const; 2 – U/f^2 = const; 3 – Ψ_2 =const

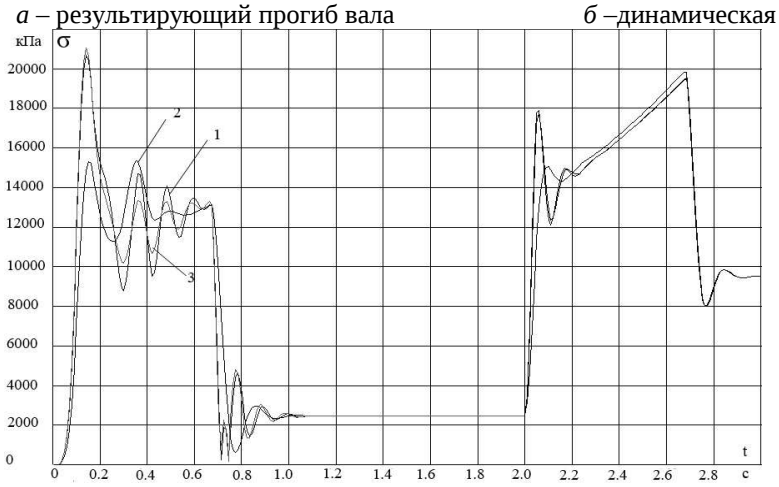
При расчете вала на жесткость определяющим является механический показатель - результирующий прогиб вала f (рис.16,а). Определение изменений расчетной динамической грузоподъемности подшипников C_b при регулировании выполняется аналогично с учетом типа подшипника и характера нагрузки двигателя (рис.16, б). При расчете вала на прочность определяется приведенное механическое напряжение σ, учитывающее совместное действие напряжений изгиба и кручения (рис.16, в). При анализе принято сочленения двигателя с исполнительным механизмом с помощью упругой муфты. В рассматриваемой электрической машине используются шарикоподшипники. При исследованиях принят характер нагрузки с умеренными толчками. Используется коэффициент перегрузки, равный 2,5 для реверсивных машин.



а – результирующий прогиб вала



б –динамическая грузоподъемность подшипника



в – приведенное механическое напряжение

Рис.16 – Изменение механических показателей двигателей при различных законах:

1 – U/f =const;
2 – U/f^2 = const;
3 – Ψ_2 =const

Выводы. 1. Поскольку напряжение питания двигателя выше базовой настройки преобразователя (380 В, 50 Гц) неизменно, механические характеристики для трех рассматриваемых законов частотного управления во второй зоне являются одинаковыми. Существенное отличие механических характеристик имеет место в первой зоне, особенно для закона, обеспечивающего постоянство потокосцепления ротора.

2. Меньшие значения потребляемых двигателем токов (соответственно температур нагрева обмотки статора) и большие значения КПД и коэффициента мощности двигателя в первой зоне наблюдаются при законе частотного управления U/f^2 = const по сравнению с другими рассматриваемыми законами, .

3. Виброскорость и шум магнитного происхождения большие в первой зоне при законе частотного управления Ψ_2 =const.

4. Поскольку интенсивность изменения параметра регулирования (частоты напряжения питания РАД) одинакова для всех рассматриваемых законов характеристики изменения частоты вращения при работе на заданную тахограмму приблизительно одинаковы.

5. Динамические характеристики потребляемого тока, электромагнитного момента, КПД и коэффициента мощности двигателя отличаются при различных законах частотного управления.

6. От закона частотного управления зависит характер переходных зависимостей виброакустических показателей магнитного происхождения, а также вентиляционного шума.

7. Рассмотрение динамических характеристик механических показателей позволяет определить приоритет закона с точки зрения бросков этих показателей.

Список литературы: 1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: моногр. / Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с. 2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320с., ил. 3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с. 4. Пивняк Г.Г., Волков О.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. Монография,- Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с. 5. Петрушин В.С., Таньков А.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления // "Електромашинобудування та електрообладнання": Респ. міжвід.наук.-техн. зб., вип. 55, 2000. – С. 11–15. 6. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51–54. 7. Петрушин В.С. Регулировочные характеристики АД в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянства потокосцеплений // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. – 2002. – №2. – С. 53–55. 8. Петрушин В.С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" // Одесса, Наука и техника, 2006, – 320 с. 9. Петрушин В.С., Якимец А.М. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2001. – Вып. 10. – С. 156–157. 10. Петрушин В.С., Бухалфа Бендахман, Якимец А.М., Каленик О.В. Корректировка расчета энергетических показателей регулируемых асинхронных двигателей в неустановившихся режимах // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід.наук.-техн. зб., вип. 75, 2010, С. 41–45. 11. Петрушин В.С., Якимец А.М., Еноктаев Р.Н. Моделирование регулируемых асинхронных электроприводов с согласующими редукторами и трансформаторами // Науково-практичий журнал "Електротехніка і Електромеханіка" №2, 2015. – С. 26–30. 12. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт „DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001. 13. Шумилов Ю.А., Герасимчук В.Г. Исследование магнитных возмущающих сил асинхронного двигателя при питании от статического преобразователя частоты // Техн. электродинамика, 1997. – №4. – С.44– 48. 14. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоиздат, 1990. – 374 с. 15. Петрушин В.С., Каленик О.В. Анализ механических показателей асинхронного двигателя при различных способах пуска // Електромеханічні та енергозберігаючи системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» науково-виробничого журналу - Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 247–250.

Bibliography (transliterated): 1. Shreiner R.T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty: monogr. Ekaterinburg: URO RAN, 2000. Print. 2. German-Galkin S.G. Komp'iuternoe modelirovanie polupro-vodnikovykh sistem v MATLAB 6.0: Uchebnoe posobie. SPb.: KORONA, 2001. Print 3. Sokolovskii G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. Moscow: Izdatel'skii tsentr «Akademiia», 2006. Print 4. Pivniak G.G., Volkov O.V. Sovremennye chastotno-reguliruemye asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impul'snoi moduliatsiei. Monografiia. Dnepropetrovsk: Natsional'nyi gornyi universitet, 2006. Print 5. Petrushin V.S., Tan'kov A.A. "Energeticheskie pokazateli asinkhronnogo dvigatelia v chastotnom elektroprivode pri razlichnykh zakonakh upravleniia " "Elektpomashinobuduvannia ta elektroobladnannia": Resp. mizhvid.nauk.-tekhn. zb., No 55, 2000. 11–15. Print. 6. Petrushin V.S. Privedennye zatraty asinkhronnykh dvigatelei v chastotnom elektroprivode pri razlichnykh zakonakh upravleniia. Elektpomashinobuduvannia ta elektroobladnannia: Resp. mizhvid. nauk.-tekhn. zb, 2001. No 56, 51–54. Print 7. Petrushin V.S. Regulirovochnye kharakteristiki AD v chastotnom elektroprivode pri zakonakh upravleniia, obespechivaiushchikh postoianstva potokostseplenii. Elektrotekhnika i elektromekhanika: Naukovo-praktichnii zhurnal, 2002. No 2. 53–55. Print. 8. Petrushin V.S. Uchebnoe posobie "Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode". Odessa: Nauka i tekhnika, 2006. Print. 9. Petrushin V.S., Iakimets A.M. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov asinkhronnykh dvigatelei pri chastotnom regulirovanii. Problemy avtomatizirovannogo privoda. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI"., 2001. No. 10. 156–157. Print 10. Petrushin V.S., Bukhalfa Bendakhman, Iakimets A.M., Kalenik O.V. Korrektirovka rascheta energeticheskikh pokazatelei reguliruemykh asinkhronnykh dvigatelei v neustanovivshikhsia rezhimakh. Elektpomashinobuduvannia ta elektroobladnannia: Mizhvid.nauk.-tekhn. zb., No. 75. 2010. Print. 11. Petrushin V.S., Iakimets A.M., Enoktaev R.N. Modelirovanie reguliruemykh asinkhronnykh elektroprivodov s soglasuiushchimi reduktorami i transformatorami // Naukovo-praktichii zhurnal "Elektrotekhnika i Elektromekhanika". No2. 2015. Print. 12. Petrushin V.S., Riabinin S.V., Iakimets A.M. Programmnyi produkt „DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniia asinkhronnykh korotkozamknutykh dvigatelei sistem reguliruemogo elektroprivoda (svidetel'stvo o registratsii programmy PA№4065). – K.: Gosudarstvennyi departament intellektual'noi sobstvennosti, 26.03.2001. 13. Shumilov Iu.A., Gerasimchuk V.G. Issledovanie magnitnykh vozmushchaiushchikh sil asinkhronnogo dvigatelia pri pitanii ot staticheskogo preobrazovatelia chastoty: Tekhn. elektrodinamika, 1997. No. 4. 44–48. Print. 14. Unifitsirovannaia seriia asinkhronnykh dvigatelei Interelektro; Pod red. V.I. Radina. Moscow: Energoizdat, 1990. Print. 15. Petrushin V.S., Kalenik O.V. Analiz mekhanicheskikh pokazatelei asinkhronnogo dvigatelia pri razlichnykh sposobakh puska. Elektromekhanichni ta energozberigaiuchi sistemi. Tematichnii vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriia i praktika» naukovo-virobnichogo zhurnalu - Kremenchuk: KrNU, 2012. No. 3/2012 (19). 247–250. Print.

Поступила (received) 09.06.2015

УДК 621.31:62-53

М. ТВЕРД, фірма ZAKLAD ENERGOELEKTRONIKI "TWERD", Польща, Торунь;
Б. Л. КОПЧАК, канд. техн. наук, доц., докторант НУ «Львівська Політехніка»

САМОНАЛАГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ КЕРУВАННЯМ МЕТОДОМ РОЮ ЧАСТИНОК

Вступ. У зв'язку зі зростанням попиту на регульовані електроприводи (ЕП) змінного струму в електромеханічних системах (ЕМС) фірмою «TWERD» і Національним університетом "Львівська політехніка" згідно договору про творчу співпрацю проводяться роботи щодо використання в універсальних перетворювачах частоти (ПЧ) типу MFC 710 з векторним керуванням [1] дробових ПІД-регуляторів з передавальною функцією (ПФ) [1]

$$W_p(s) = K_p + T_i s^{-\lambda} + T_d s^{\delta}, \qquad (1)$$

і можливості реалізувати режим самоналагодження електромеханічних систем з такими регуляторами.

В системі керування ПЧ типу MFC 710 використаний інтерфейс MODBUS, завдяки якому є можливість керувати перетворювачем частоти в будь якій системі автоматичного керування (САК), в якій передбачені керувальні входи на RS-232C або RS-485. У випадку необхідності для керування таким ПЧ можна використати комп'ютер, мікроконтролер або пристрій власної конструкції.

Мета даної роботи – дослідити режим самоналагодження регулятора швидкості ЕМС з мікропроцесорним керуванням шляхом формування бажаної динамічної характеристики контура регулювання швидкості методом рою частинок (МРЧ) (angl. PSO - Particle Swarm Optimization) на моделі і оцінити можливість його реалізації за використання комп'ютера або спеціального програмованого логічного контролера (ПЛК) в ПЧ фірми «TWERD» типу MFC 710.

Матеріали досліджень. Авторами запропоновано оригінальні підходи до налагодження параметрів як дробового, так і цілочисельного ПІД-регулятора швидкості, який є частковим випадком більш загального його представлення за допомогою ПФ дробового порядку (λ і δ =1), в автоматичному режимі, тобто у режимі самоналагодження, методом рою частинок [2,3] і може бути реалізований за використання комп'ютера або спеціалізованого ПЛК ПЧ.

Проведено дослідження двох варіантів налагодження параметрів регулятора швидкості таким методом:

- за використання перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми;
- за характерними точками перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми (час першого досягнення 95% від усталеного значення перехідного процесу (t_{095}); максимальне відхилення координати (y_{max}), або її перерегулювання $\delta_п$; час досягнення максимуму перерегулювання (t_{max})).

Як приклад для налагодження використовуємо стандартну перехідну функцію дробового порядку (форма Батерворта) [4] з бажаною якістю перехідного процесу: t_{095}= 0,29с., $\delta_п$=7,32%, t_{max}=0,52с., яка відповідає ПФ

$$W_{ст.Бат.}(s) = \frac{\omega_{ос}}{s^{1.2} + \omega_{ос}}, \qquad (2)$$

для $\omega_{ос} = 10\ с^{-1}$. Така якість перехідного процесу відповідає технічному – оптимальному (ТО) протіканню перехідних процесів в ЕМС.

На рис.1. показана функціональна схема ЕМС у режимі самоналагодження, в якій передбачено варіант можливості контролю швидкості як вала двигуна ($\omega_д$), так і механізму ($\omega_м$), хоча для врахування впливу нелінійності характеристики механізму перевагу слід надавати другому варіанту, враховуючи переваги регуляторів дробового порядку для синтезу нелінійних систем [5].

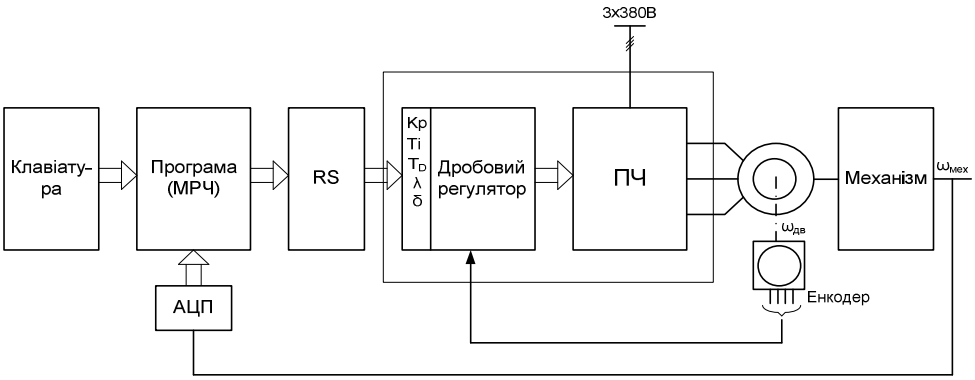


Рис.1. Функціональна схема ЕМС у режимі самоналагодження за використання комп'ютера

© М. Тверд, Б.Л. Копчак, 2015

Зв'язок комп'ютера з ПЧ здійснюється через RS, а встановлення параметрів ПІД-регулятора за використання протоколу MODBUS. Розрахунок параметрів регулятора відбувається в комп'ютері у режимі активного експерименту за використання методу рою частинок.

Нами проведені симуляційні дослідження запропонованого алгоритму вибору параметрів дробового ПІД-регулятора методом рою частинок для оптимізації контуру швидкості, який полягає в наступному [2,3].

1. Вносимо в пам'ять комп'ютера еталонну перехідну функцію, яка відповідає вибраній за бажаною якістю перехідного процесу стандартній дробовій формі з ПФ (2). Дискретизацію перехідної функції в часі здійснюємо з кроком 0,01сек.
2. Для дробового ПІД-регулятора з ПФ (1) будуємо п'ятивимірний простір рою (за кількістю параметрів: $K_p, T_i, T_d, \lambda, \delta$) [4], який передбачає як частковий випадок і тривимірний простір для цілочисельного регулятора з параметрами K_p, T_i, T_d.
3. На основі попередніх розрахунків встановлюємо початкові параметри регулятора.
4. Подавши одиничне збурення на вході, записуємо в пам'ять комп'ютера отриманий перехідний процес частоти обертання ЕМС.
5. Запускаємо процес пошуку параметрів регулятора швидкості, які забезпечать бажаний перехідний процес методом рою частинок.
6. На кожній ітерації для кожної частинки рою (координата параметрів регулятора у п'ятивимірному просторі) і набутих нею в процесі руху в просторі параметрів знаходиться її перехідна функція і відбувається порівняння її з еталонною. Частинка, параметри якої забезпечать найменше абсолютне середньоквадратичне відхилення і менше від попередньої ітерації, буде визначена як найкраща на ітерації, а її параметри будуть визначати траєкторії руху інших частинок на наступній ітерації.
7. Кількість ітерації можна або задавати вручну або вводити процедуру припинення ітераційного процесу, коли абсолютне середньоквадратичне відхилення найкращої частинки стане меншим за задане.
8. Після досягнення бажаної точності комп'ютер встановлює в регуляторі ПЧ знайдені параметри.

Для порівняння ступеня збігу перехідної функцій отриманої за використання дробового ПІД-регулятора і перехідної функцій бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми, для кожного елементу рою на кожній ітерації розрахуємо похибки апроксимації у вигляді абсолютного середньоквадратичного відхилення σ:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(y_i - y_{ie})^2}\ , \qquad (3)$$

де: y_i – значення апроксимуючої перехідної функції в і-й точці; y_{ie} – дійсне значення перехідної функції в і-й точці; M – кількість точок опрацювання перехідного процесу.

Для зменшення часу пошуку параметрів регулятора швидкості, зокрема для можливості його використання для реалізації самоналагоджувальної системи керування ЕМС, нами запропоновано підхід до синтезу дробового ПІД-регулятора за наступними характерними точками перехідної функції бажаної стандартної дробової форми: час першого досягнення 95% від усталеного значення перехідного процесу (t_{095}); максимальне відхилення координати (y_{max}), або перерегулювання $\delta_п$; час досягнення максимуму перерегулювання (t_{max}).

Відмінність алгоритму такого підходу від попереднього полягає в тому, що порівняння перехідної функції з еталонною відбувається лише у певних характерних точках перехідного процесу t_{095}, y_{max} і t_{max}.

При пошуку параметрів дробового ПІД-регулятора швидкості за характерними точками перехідної функції бажаної стандартної дробової (цілочисельної) форми в алгоритм нами введена функція якості J, яка як і σ (3) також характеризує ступінь збігу, і в програмному середовищі MATLAB і записується у вигляді

$$J = k_t(t_{095} - t_{095pot})^2 + k_y(y_{max} - y_{max\,pot})^2 + k_{t\,max}(t_{max} - t_{max\,pot})^2\ ; \qquad (4)$$

де: k_t=0.1; k_y=1; k_{tmax}=1- вагові коефіцієнти.

Ці коефіцієнти враховують ступінь важливості кожної з характерних точок, а їх величина вибирається автором на основі досвіду проведення таких досліджень. В процесі роботи МРЧ функція якості J мінімізується (в ідеальному випадку вона дорівнює нулю). Тобто на кожному кроці ітерації відбувається порівняння біжучих параметрів кожного елемента рою з еталонними і розрахунок функції якості.

Знаходження ПФ дробового регулятора за використання методу рою покажемо на двох прикладах для об'єктів керування, які описані ПФ дробового порядку, шляхом моделювання у середовищі MATLAB. Об'єкти керування нами вибрані такі, що апроксимовані ПФ дробового порядку і мають різний характер перехідної функції. Таке представлення об'єктів керування ЕМС має переваги як з точки зору пониження порядку моделі, так і точності та часу апроксимації [2,6], що створює перспективу для побудови самоналагоджувальних (адаптивних) електромеханічних систем з дробовими регуляторами.

Приклад 1. Для об'єкта керування ЕМС з ПФ

$$W(s) = \frac{1}{0.5s^{0.9} + 1} \qquad (5)$$

на рис.2. (крива «1») показано його перехідну функцію.

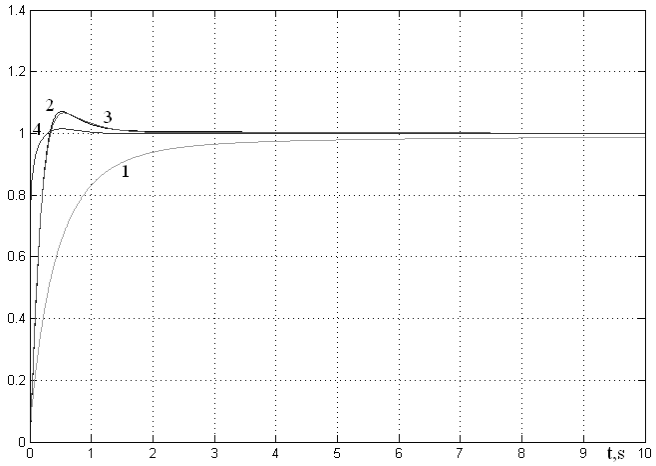


Рис.2. Перехідні функції: крива «1» об'єкт керування - ПФ(5); крива «2» дробова стандартна форма - ПФ(2); крива «3» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(6); крива «4» МРЧ за використання характерних точок - ПФ (7).

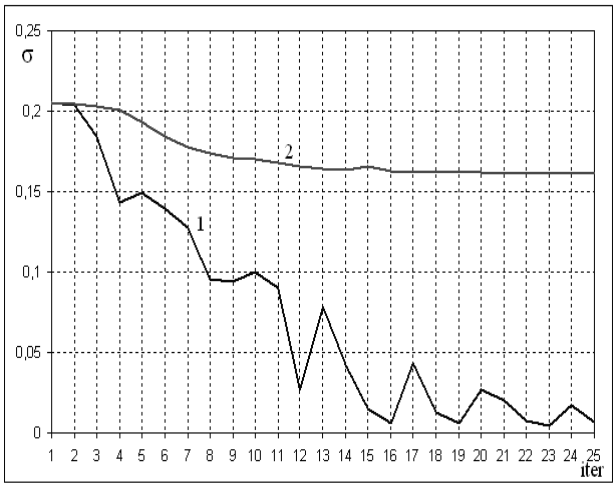


Рис.3. Залежність абсолютного середньо-квадратичного відхилення σ від номера ітерації МРЧ: крива «1» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(6); крива «2» МРЧ за використання характерних точок - ПФ(7).

Застосувавши розроблене програмне забезпечення, отримано ПФ дробового порядку для двох варіантів пошуку параметрів регулятора швидкості методом рою частинок і перехідні процеси, які вони реалізують в даній ЕМС і показані на рис.2:

- крива «2» перехідна функція, яка відповідає дробовій стандартній формі з ПФ (2);
- крива «3» - результат отриманий МРЧ за використання перехідної функції бажаної стандартної дробової форми з ПФ дробового ПІД-регулятора, абсолютне середньоквадратичне відхилення після 25- ї ітерації, σ <0,00685,

$$W_p(s) = 5.5337 + 11.5921s^{-1.0801} - 2.3295s^{0.1462}; \quad (6)$$

- крива «4» - результат отриманий МРЧ за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми з ПФ дробового ПІД-регулятора, абсолютне середньоквадратичне відхилення σ: після 25-ї ітерації, σ <0,1614

$$W_p(s) = 8.8958 + 81.6247s^{-0.9723} + 5.9899s^{0.4586}. \quad (7)$$

Основні параметри (характерні точки) перехідних функцій визначаються автоматично в процесі розрахунку у програмному середовищі MATLAB.

На рис.3. показані результати досліджень, проведених автором, які показують залежності абсолютного середньоквадратичного відхилення σ параметрів кожного елемента рою отриманих перехідних функцій з вибраною стандартною формою в залежності від номера ітерації, відповідно: крива «1» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(6); крива «2» МРЧ за використання характерних точок - ПФ(7).

Приклад 2. Для об'єкта керування ЕМС з ПФ

$$W(s) = \frac{1}{0.8s^{2.2} + 0.5s^{0.9} + 1} \quad (8)$$

на рис.4. (крива «1») показано його перехідну функцію.

Застосувавши розроблене програмне середовище, отримано, як і у попередньому прикладі, ПФ дробового порядку і перехідні процеси, для двох варіантів налагодження параметрів регулятора швидкості методом рою частинок, які показані на рис.4:

- крива «2» перехідна функція, яка відповідає дробовій стандартній формі ПФ (2);
- крива «3» - результат отриманий МРЧ за використання перехідної функції бажаної стандартної дробової форми (2) з ПФ дробового ПІД-регулятора, абсолютне середньоквадратичне відхилення після 20 - ї ітерації σ <0,0157

$$W_p(s) = 7.0171 + 13.54s^{-1.3972} + 7.63s^{1.0205}; \quad (9)$$

- крива «4» - результат отриманий МРЧ за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми і функції якості J після 20 - ї ітерації, J < 0,00049

$$W_p(s) = 15.3692 + 27.2496s^{-1.1566} + 9.4120s^{1.1852}. \quad (10)$$

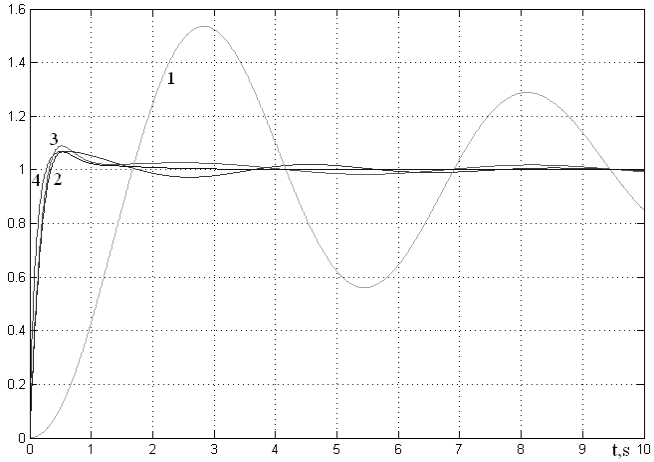


Рис. 4. Перехідні функції: крива «1» об’єкт керування - ПФ(8); крива «2» дробова стандартна форма - ПФ (2); крива «3» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(9); крива «4» МРЧ за використання характерних точок - ПФ(10).

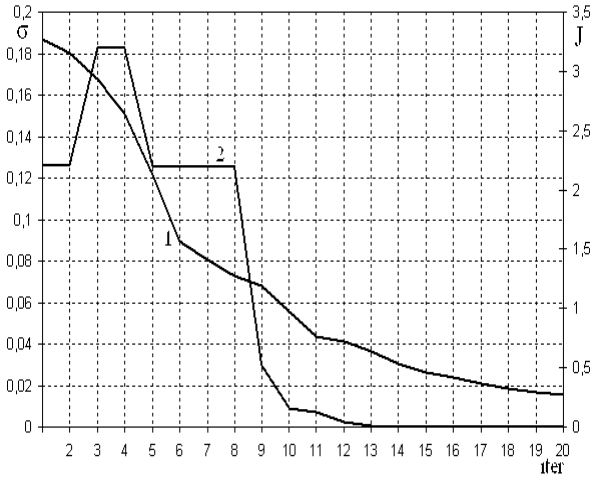


Рис.5.Залежність абсолютного середньо-квадратичного відхилення від номера ітерації МРЧ: крива «1» МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(9); крива «2» МРЧ за використання характерних точок і функції якості J - ПФ(10).

На рис.5. показані результати досліджень залежності ступені розбіжностей параметрів кожної частинки рою отриманих перехідних функцій з вибраною стандартною формою в залежності від номера ітерації, відповідно: крива «1» залежність σ = f(iter) МРЧ за використання цілої перехідної функції - ПФ(9); крива «2» залежність J = f(iter) МРЧ за використання характерних точок - ПФ(10).

ВИСНОВКИ:

1. Аналіз запропонованих підходів до самоналагодження цифрового як дробового, так і цілочисельного ПІД-регулятора швидкості ЕМС методом рою частинок показав їх придатність для практичної реалізації у перетворювачах частоти типу MFC710 за використання комп’ютера або спеціалізованої опції програмованого логічного контролера.

2. Запропонований алгоритм самоналагодження дробового ПІД-регулятора за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми і функції якості J для оцінки ступеня розбіжності прискорює цей процес і забезпечує його задовільну точність.

Список літератури: 1. *Твердˊ М.* Преобразователь частоты с векторным управлением и расширенными функциональными возможностями / *М. Твердˊ, И. Зеленский, Л. С. Копчак, Б. Л. Копчак* // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. − 2005. − Вип 45. − С. 382−383. **2.** *Копчак Б. Л.* Апроксимація перехідних функцій поліномами дробового порядку / *Б. Л. Копчак* // Одеський національний політехнічний університет. Науково-технічний журнал «Електротехнічні та комп’ютерні системи». − К: Техніка, 2014. − №14 (90). −С. 20− 27. **3.** *Maiti D.* Design of a Fractional Order PID Controller Using Particle Swarm Optimization Technique / *D. Maiti, S. Biswas, A. Konar* // Proceeding 2nd - National Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS-08). − 2008. − 5с. **4.** *Марущак Я.Ю.* Дробові стандартні форми для синтезу електромеханічних систем. / *Я. Ю. Марущак Б.Л.Копчак* // Одеський національний політехнічний університет. Науково-технічний журнал «Електротехнічні та комп’ютерні системи». − К: Техніка, 2014. − №15 (91). − С. 57− 60. **5.** *Barbosa R.S.* Fractional Descibing Function Analysis of Systems with Backlash and Impact Phenomena / *R. S. Barbosa, J. A. T. Machado* // Proceeding 6th International Conference of Intelligent engineering Systems (INES’2002).).– С. 521–526. **6**. *Dzieliński A.* Some applications of fractional order calculus / *A.Dzieliński, D. Sierociuk, G. Sarwas* // Bulletin Of Polish Academy Of Sciences. – Warsaw: Technical Sciences, 2010. – Vol. 58 (4). – С. 583–592.

Bibliography: 1. Twerd, M., Zelenskii, I., Kopchak, L. S. and Kopchak B. L. “Preobrazovatel' chastoty s vektornym upravleniem i rasshirennymi funktsional'nymi vozmozhnostyami” // *Visnyk Nacional'nogo tehnichnogo universytetu "Harkivs'kyj politehnichnyj instytut". Problemy avtomatyzovanogo elektropryvoda. Teorija i praktyka.* Vyp. 45. 2005. 382−383. Print. **2.** Kopchak, B. L. “Aproksymacija perehidnyh funkcij polinomamy drobovogo porjadku” // *Odes'kyj nacional'nyj politehnichnyj universytet. Naukovo-tehnichnyj zhurnal «Elektrotehnichni ta komp’juterni systemy»*. №14 (90). 2014. 20−27. Print. **3.** *Maiti, D., Biswas, S. and Konar,A.* “Design of a Fractional Order PID Controller Using Particle Swarm Optimization Technique” *// Proceeding 2nd - National Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS-08).* 2008. 5. Print. **4.** Marushhak, Ja.Ju. and Kopchak, B.L. “Drobovi standartni formy dlja syntezu elektromehanichnyh system.” *// Odes'kyj nacional'nyj politehnichnyj universytet. Naukovo-tehnichnyj zhurnal «Elektrotehnichni ta komp’juterni systemy»*. №15 (91). 2014. 57− 60. Print. **5.** Barbosa, R.S. and Machado, J. A. T. “Fractional descibing function analysis of systems with backlash and impact phenomena // *Proceeding 6th International Conference of Intelligent engineering Systems (INES’2002).* 2002. 521–526. Print. **6**. Dzieliński, A., Sierociuk, D. and Sarwas, G. “Some applications of fractional order calculus” // Bulletin of Polish Academy of Sciences. – Warsaw: Technical Sciences. Vol. 58 (4). 2010. 583–592. Print.

Надійшла (received) 18.06.2015

УДК 681.5.033 + 681.587’57

А. А. ХУДЯЕВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
В. В. ПОЛЕНОК, асп. НТУ «ХПИ»;
С. В. ГОЛОБОРОДЬКО, магистрант НТУ «ХПИ»

СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ СХЕМА ИТЕРАЦИОННОГО ДВУХКАНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧИ С ДВУМЯ ВИНТОВЫМИ ПАРАМИ И УЧЕТОМ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Постановка задачи. Для снижения инерционности приводного механизма (ПМ) итерационных многоканальных электроприводов (ЭП) подач с механическими дифференциалами (МД) [1÷3] может быть использован аналогичный итерационный ЭП на базе двухдвигательного безредукторного механизма подачи (МП) с двумя винтовыми парами (ВП) [4]. Относительное повышение быстродействия в таком двухканальном ЭП подачи (по сравнению с дифференциальными ЭП) достигается за счет изменения способа суммирования движений приводов отдельных каналов и применения соответствующей конструкции МП. Кроме того, в итерационном двухканальном ЭП МП с двумя ВП может быть значительно повышена эффективность реализации режима последовательно-параллельной работы отдельных каналов управления, которая в полной мере достигается только в итерационных следящих системах с разделенной нагрузкой [1,5].

В настоящее время для высокоточных итерационных двух- и трехканальных ЭП подачи с типовой настройкой каналов и различными способами суммирования движений отдельных приводов не исследована эффективность возможных вариантов структурных схем системы управления с компенсацией возникающего через объект управления (ОУ) негативного динамического взаимовлияния каналов (ДВВК) по нагрузке и учетом статики и динамики процесса резания (ПР) в режимах механообработки изделия. Не разработаны соответствующие математические и компьютерные модели для анализа электродинамических характеристик таких многоканальных систем и выработки практических рекомендаций. В частности, не выполнено моделирование ПР и не построена соответствующая структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального ЭП подачи с двумя ВП и подчиненной настройкой каналов, которая бы учитывала как компенсацию влияния ДВВК по нагрузке, так и компенсацию податливости и упругих колебаний рабочего органа (РО), обусловленных ПР.

Целью работы является получение линейной математической модели ПР в установившихся режимах подачи и построение структурно-алгоритмической схемы итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП и СПР-настройкой каналов, учитывающей компенсацию как ДВВК по нагрузке, так и статики и динамики ПР, применительно к подаче РО (рабочего стола с изделием) тяжелого координатного многоцелевого металлорежущего станка с ЧПУ особо высокой точности модели 24К70АФ4.

Материал исследования. Итерационный двухканальный ЭП МП с двумя ВП включает первый (основной) К-1 и второй (уточняющий) К-2 каналы управления по углу с соответствующими подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум. Основной канал К-1 используется для управления приводом вращения ходового винта (ХВ1) первой ВП (ВП1), а уточняющий канал К-2 – приводом вращения ходового винта (ХВ2) второй ВП (ВП2). Соответствующие исполнительные двигатели (ИД) и винтовые передачи отдельных приводов образуют двухдвигательный МП двухканального привода. Такой двухканальный ЭП при условии компенсации в нем (с помощью блока компенсаторов C_{12} - C_{21}) негативного ДВВК по нагрузке, обусловленного наличием общих элементов в ПМ, может быть отнесен к классу собственно итерационных многоканальных систем автоматического управления (САУ) [6].

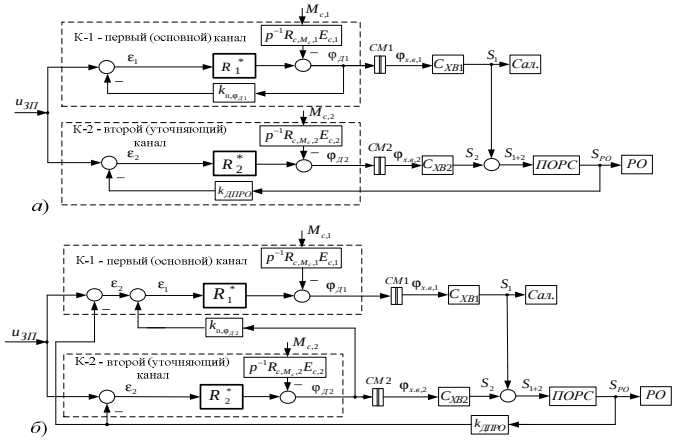


Рис. 1. Варианты обобщенной структурной схемы системы управления итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП применительно к подаче РО станка:
а – первый вариант; *б* – второй вариант

Варианты обобщенной структурной схемы системы управления итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП применительно к подаче РО станка показаны на рис. 1. Оба варианта структуры предполагают типовую настройку по принципу СПР каналов управления привода подачи и равноценны с точки зрения свойств рассматриваемой двухканальной системы. Вместе с тем, при обязательном наличии в каждом из вариантов датчика положения РО с коэффициентом передачи $k_{\text{ДПРО}}$ [В/м] структуры отличаются использованием в системе различных датчиков положения валов ИД отдельных приводов: $k_{\text{п},\varphi_{Д1}}$ или $k_{\text{п},\varphi_{Д2}}$ [В/рад].

© А.А. Худяев, В.В. Поленок, С.В. Голобородько, 2015

На рис. 1 обозначены: $u_{ЗП}$ – задающее воздействие по положению, В; $M_{c,1}$ и $M_{c,2}$ – моменты сопротивления нагрузки, преобразованные к выходам разомкнутых контуров положения соответственно первого К-1 и второго К-2 каналов управления, Н·м; $R_i^*(p)$ $(i=1,2)$ – линейный дифференциальный оператор (или оператор) разомкнутого контура положения привода *i*-го канала с учетом соответствующих управляющих и исполнительных элементов и устройств; $R_{c,M_c,i}(p)$ и $E_{c,i}(p)$ $(i=1,2)$ – операторы соответственно разомкнутого контура скорости по моменту нагрузки $M_{c,i}$ и ошибки контура скорости привода *i*-го канала; $C_{XB,1}$ и $C_{XB,2}$ – коэффициенты передачи ходовых винтов, входящих соответственно в ВП1 и в ВП2, м/рад; *СМ*1 и *СМ*2 – жесткие соединительные муфты между валами ИД Д1 и Д2 и валами соответствующих винтов ХВ1 и ХВ2; *Сал.* – специальные салазки МП РО, обеспечивающие возможность установки второго двигателя Д2 и второй ВП и жестко соединенные с ходовой гайкой (ХГ1) ВП1; *ПОРС* – подвижная опора рабочего стола, жестко соединенная как с рабочим столом, так и с ходовой гайкой (ХГ2) ВП2; *РО* – рабочий орган ЭП подачи станка; $\varphi_{Д1}$ и $\varphi_{Д2}$ – углы поворота валов соответственно ИД Д1 и Д2, рад; S_1, S_2 и S_{PO} – перемещения РО, реализуемые отдельными приводами, и результирующее (абсолютное) перемещение (подача) РО, реализуемое МП РО двухканального ЭП, м:

$$S_{PO}(t)=S_{1+2}(t)=S_1(t)\pm S_2(t)=C_{XB1}\varphi_{Д1}(t)\pm C_{XB2}\varphi_{Д2}(t);$$

$p \equiv d/dt$ – оператор дифференцирования по времени t.

Анализируя потенциальную точность рассматриваемого итерационного двухканального привода с инерционной нагрузкой, из рис. 1 для сигнала ошибки ε_2 воспроизведения $u_{ЗП}$ двухканальной САУ ЭП несложно получить:

$$\varepsilon_2(t)=u_{ЗП}(t)-k_{ДПРО}S_{PO}(t)=\varepsilon_{u_{ЗП},2}(t)+\varepsilon_{M_{c,1},2}(t)+\varepsilon_{M_{c,2},2}(t); \quad (1)$$

$$\varepsilon_{u_{ЗП},2}(t)=E_1^*(p)E_2^*(p)u_{ЗП}(t); \qquad \varepsilon_{M_{c,1},2}(t)=k_{\text{п},\varphi,1}p^{-1}R_{c,M_c,1}(p)E_{c,1}(p)E_1^*(p)E_2^*(p)M_{c,1}(t); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{M_{c,2},2}(t)=k_{\text{п},\varphi,2}p^{-1}R_{c,M_c,2}(p)E_{c,2}(p)E_2^*(p)M_{c,2}(t), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{u_{ЗП},2}$ и $\varepsilon_{M_{c,1},2}$, $\varepsilon_{M_{c,2},2}$ – составляющие установившегося значения ошибки двухканальной системы соответственно по управляющему сигналу $u_{ЗП}(t)$ и от действия моментов нагрузки $M_{c,1}$ и $M_{c,2}$, В; $E_i^*(p)$ $(i=1,2)$ – оператор ошибки по задающему воздействию контура положения *i*-го канала, приведенного к единичной обратной связи (ОС): $E_i^*(p)=\left[1+k_{\text{п,ц},i}R_i^*(p)\right]^{-1}$; $k_{\text{п},\varphi,i}$ $(i=1,2)$ – коэффициент преобразования углового положения вала двигателя в соответствующий сигнал ОС по положению *i*-го канала, В/рад:

а) для первого варианта структуры: $k_{\text{п},\varphi,1}=k_{\text{п},\varphi_{Д1}}$, $k_{\text{п},\varphi,2}=k_{ДПРО}C_{XB2}$;

б) для второго варианта структуры: $k_{\text{п},\varphi,i}=k_{ДПРО}C_{XBi}$, $i=1,2$.

Сигнал ошибки аналогичного одноканального ЭП подачи (основного канала управления К-1 в автономном режиме работы) имеет вид:

$$\varepsilon_1(t)=u_{ЗП}(t)-k_{ДПРО}S_1(t)=\varepsilon_{u_{ЗП},1}(t)+\varepsilon_{M_{c,1},1}(t); \quad (4)$$

$$\varepsilon_{u_{ЗП},1}(t)=E_1^*(p)u_{ЗП}(t); \qquad \varepsilon_{M_{c,1},1}(t)=k_{\text{п},\varphi,1}p^{-1}R_{c,M_c,1}(p)E_{c,1}(p)E_1^*(p)M_{c,1}(t), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{u_{ЗП},1}$ и $\varepsilon_{M_{c,1},1}$ – составляющие установившегося значения сигнала ошибки одноканальной системы (основного канала К-1) соответственно по управляющему сигналу $u_{ЗП}$ и от действия момента нагрузки $M_{c,1}$ на валу ИД Д1.

Из сравнения уравнений (1)÷(3) и (4), (5) для ошибки ε_2 можно записать

$$\varepsilon_2(t)=E_2^*(p)\varepsilon_1(t)+k_{\text{п},\varphi,2}p^{-1}R_{c,M_c,2}(p)E_{c,2}(p)E_2^*(p)M_{c,2}(t). \quad (6)$$

Из (6) с учетом (2) и (3) нетрудно видеть, что при достаточно широкополосном втором, уточняющем канале К-2, когда $E_2^*(p)\to 0$, для двухканальной системы выполняется:

$$\varepsilon_{u_{ЗП},2}(t)\to 0, \qquad \varepsilon_{M_{c,1},2}(t)\to 0 \qquad \text{и} \qquad \varepsilon_2(t)\to\varepsilon_{M_{c,2},2}(t), \quad (7)$$

т.е. в двухканальной САУ ЭП подачи с инерционным РО на выходе контура положения уточняющего канала К-2 потенциально может быть обеспечена одновременная компенсация сигналов ошибок, обусловленных как воспроизведением задающего воздействия $u_{ЗП}$, так и действием момента нагрузки $M_{c,1}$ в основном канале управления К-1. Ошибка от момента нагрузки $M_{c,2}$, действующего в самом уточняющем канале К-2, при определенных стандартных настройках канала может оставаться нескомпенсированной. В этом смысле каналы управления двухканальной САУ ЭП неравноценны.

Вместе с тем, из выражений (6) и (7) видно, что при относительном уменьшении уровня нагрузки в уточняющем канале К-2 или при применении регуляторов положения канала, позволяющих скомпенсировать момент нагрузки $M_{c,2}$, в рассматриваемом двухканальном ЭП подачи может быть достигнуто существенное повышение точности управления инерционным объектом по сравнению с аналогичным по назначению традиционным одноканальным ЭП МП станка.

Предполагается, что в основном канале К-1 двухканального ЭП, как и в аналогичном традиционном одноканальном ЭП подачи, используется современный комплектный транзисторный ЭП постоянного тока с силовой частью типа ШИП-ДПТ, например модуль регулирования серии MR-DC, а в уточняющем канале К-2 – широкополосный ЭП переменного тока с частотно-токовым векторным управлением (типа ПЧТ-АД). В качестве ИД Д1 основного и Д2 уточняющего приводов двухканального ЭП могут быть использованы соответственно высокомоментный ДПТ с постоянными магнитами серии 2ПБВ типа 2ПБВ132S ($P_{ном,1} = 1{,}94$ кВт), устанавливаемый на станки моделей 24К60АФ4 и 24К70АФ4, и сопоставимый по мощности АД с короткозамкнутым ротором типа АИР112МВ8 специального исполнения ($P_{ном,2} = 3$ кВт).

Упрощенные структурно-функциональные схемы предлагаемого итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП и аналогичного одноканального (автономного) ЭП применительно к подаче РО станка показаны на рис. 2. На рисунке: *РП*1, *РП*2 и *РП* – П-регуляторы положения соответственно первого, второго и автономного приводов; *ОКС*1, *ОКС*2 и *ОКС* – оптимизированные контуры скорости тех же приводов; *ДП*1 и *ДПРО* – датчики положения вала двигателя Д1 и линейного перемещения РО; ε_1, ε_2 и δ – ошибки по положению привода основного канала К-1, двухканального ЭП и одноканального ЭП; $J_{\Sigma,1}$, $J^*_{\Sigma,2}$ и $J'_{\Sigma,авт}$ – суммарные моменты инерции ПМ, приведенные соответственно к валам ИД Д1 и Д2 при их совместной работе в составе двухканального ЭП и к валу двигателя Д одноканального ЭП:

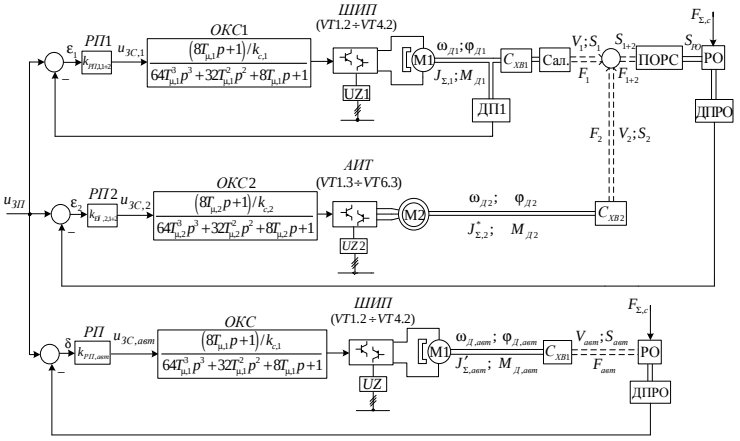


Рис. 2. Упрощенные структурно-функциональные схемы итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП и аналогичного одноканального (автономного) ЭП применительно к подаче РО станка

$J_{\Sigma,1} = 0{,}458116$ кг·м^2, $J^*_{\Sigma,2} = 0{,}0518708 \pm 0{,}0253303$ кг·м^2, $J'_{\Sigma,авт} = 0{,}346663$ кг·м^2. Отметим, что структурно-функциональная схема двухканального ЭП соответствует первому варианту обобщенной структурной схемы системы управления итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП (см. рис. 1, *а*).

Построение и расчет операторов компенсирующих перекрестных связей (КПС) для двухканального ЭП подачи с двумя ВП выполнено в работе [4]. Операторы моделей КПС (блока компенсаторов C_{12} - C_{21}), компенсирующих негативное взаимовлияние по нагрузке между основным К-1 и уточняющим К-2 каналами, при условии пренебрежения ОС по ЭДС E_1 двигателя Д1 определяются соотношениями:

$$C_{12}(p) = \pm k_1^* \frac{2T_{\mu,1}p+1}{2T_{\mu,2}p+1} = \pm\left(\frac{k_1^* T_{т,1}p}{T_{т,2}p+1} + \frac{k_1^*}{T_{т,2}p+1}\right); \qquad C_{21}(p) = k_2 \frac{2T_{\mu,2}p+1}{2T_{\mu,1}p+1} = \frac{k_2 T_{т,2}p}{T_{т,1}p+1} + \frac{k_2}{T_{т,1}p+1}; \qquad (8)$$

$$T_{\mu,1} = T_{ШИП,1} = 8{,}333\cdot10^{-5} \text{ с}; \qquad T_{\mu,2} = T_{ШИП,2} = 3{,}125\cdot10^{-5} \text{ с},$$

где знаки «+» и «–» в правой части первого соотношения соответствуют согласному и встречному вращениям ИД Д2 по отношению к вращению ИД Д1. Из (8) нетрудно видеть, что модели КПС обладают возможностью их реальной технической реализации и могут быть легко учтены в структуре системы управления.

Рассмотрим построение модели ПР применительно к режиму торцового фрезерования. Известно [7÷9], что для режима фрезерования динамическая характеристика резания (оператор резания) приближенно определяется соотношениями:

$$P_z(t) = W_p(p)\,a(t), \quad W_p(p) = \frac{K_p}{T_p p+1}; \quad a(t) = \sin\varphi\, s_z(t); \quad K_p = K\cdot b = K\frac{t_p}{\sin\varphi}; \quad T_p = m_{н.стр}\cdot\frac{\overline{a}\cdot\xi_0}{V_p}, \quad (9)$$

где P_z – главная (тангенциальная или окружная) составляющая силы резания при фрезеровании, приходящаяся на один зуб фрезы, Н/зуб; K_p – коэффициент резания, Н/мм; T_p – постоянная времени резания (стружкообразования), с; a – толщина срезаемого слоя (или толщина среза) обрабатываемой поверхности, мм/зуб; $\overline{a}$ – среднее значение толщины среза, мм/зуб; s_z – подача РО на один зуб фрезы, мм/зуб; K – нормативная

удельная сила резания, Н/мм^2; b – ширина срезаемого слоя, мм; t_p – заданная глубина резания, мм; φ – угол наклона главной режущей кромки резца к направлению подачи (или главный угол в плане), угл. град; $m_{н.стр}$ – постоянный коэффициент, характеризующий динамическую нестационарность условий стружкообразования, когда толщина стружки изменяется по ее длине ($m_{н.стр}$ =1÷4,5 для стали; $m_{н.стр}$ =1÷3,5 для меди); ξ_0 – нормативный коэффициент [9], характеризующий среднее значение усадки стружки (ξ_0 =2,5÷4,5 для углеродистой стали; ξ_0 =4÷8 для меди); V_p – скорость резания, представляющая собой окружную (линейную) скорость вращения фрезы, мм/с.

Значения *Vp* для различных режимов обработки изделия рассчитываются по эмпирическим формулам [8], приближенное значение может быть определено из соотношения: $V_p = 1\cdot 10^{-3}\pi D\cdot n_ф$ [м/мин], где $n_ф$ – заданная частота вращения фрезы, об/мин; D – стандартный диаметр фрезы, мм.

Тогда, учитывая нормативные коэффициенты для заданного типа фрезерования [8] и зная технические параметры фрезы, находим

$$P_h(t) = k_{hz}P_z(t); \tag{10}$$

$$s_z(t) = z^{-1}s_{об}(t) = t_{s_z}V_м(t); \qquad V_м(t) = n_ф s_{об}(t) = k_{V,масш}V^*_{PO}(t); \qquad t_{s_z} = \left(z\cdot n_ф\right)^{-1}; \qquad k_{V,масш} = 6\cdot 10^4, \tag{11}$$

где k_{hz} – нормативный коэффициент преобразования окружной силы резания P_z в силу подачи P_h; V^*_{PO} – действительная (фактическая) скорость подачи РО, реализуемая приводом, м/с; $V_м$ – так называемая минутная подача (или минутная скорость подачи) изделия, мм/мин; $s_{об}$ – подача РО на один оборот фрезы, мм/об; t_{s_z} – расчетное минутное время подачи РО на один зуб фрезы, мин/зуб; z – число зубьев фрезы.

Выражение (10) с учетом (9) позволяет привести горизонтальную составляющую окружной силы резания (силу подачи) P_h к скорости подачи РО:

$$P_h(t) = k_{hz}\sin\varphi W_p(p)s_z(t) = W_{P_h}(p)V^*_{PO}(t), \tag{12}$$

откуда для оператора силы подачи РО с учетом (11) получаем

$$W_{P_h}(p) = k_{hz}\,k_{V,масш}\,t_{s_z}\sin\varphi W_p(p) = \frac{6\cdot 10^4\cdot k_{hz}\sin\varphi}{z\cdot n_ф}\cdot\frac{K_p}{T_p p+1}. \tag{13}$$

Предположим, что в состоянии динамического равновесия процесса резания податливость фрезы в направлении подачи РО исключается. Тогда вынужденные продольные колебания упругой механической системы (УМС) РО-резец определяются только податливостью системы МП-РО и приближенно могут быть описаны уравнением второго порядка [10]:

$$mp^2x(t) + \left(R'_0 + \beta\right)px(t) + cx(t) = P_h(t), \tag{14}$$

где x – дополнительное перемещение (или смещение) системы МП-РО вследствие какого-либо возмущения от действия силы подачи P_h в мгновение t_0, мм/зуб:

$$x(t) = \Delta S_{PO}(t) = S_{PO}(t) - S^*_{PO}(t); \tag{15}$$

S_{PO} и S^*_{PO} – соответственно заданное (расчетное) и фактическое положения РО в текущее мгновение $t\,(t > t_0)$, мм/зуб; m – приведенная масса механической системы МП-РО, включающая в себя массу РО, салазок и ПОРС, $m_{макс} = 9500$ кг; R'_0 – тангенс угла наклона характеристики трения резания R_0 в состоянии равновесия движения системы РО-резец, приведенного к скорости подачи РО, $R'_0 = dR_0/dV^*_{PO}$, Н·с/м; c – приведенный коэффициент жесткости системы МП-РО, определяемый суммарной осевой жесткостью последовательно соединенных первой и второй винтовых передач привода, $c_{макс} = 300,318\cdot 10^3$, Н/мм; β – приведенный коэффициент вязкого трения, определяемый суммой различных неупругих сил, пропорциональных скорости смещения $\dot{x} \equiv px$, Н·с/м.

Значения и характеристики продольной силы трения резания R_0 для различных марок стали и технологических параметров фрезерования могут быть определены соответственно по эмпирическим [11] и экспериментальным [12] зависимостям.

Фактическая скорость подачи V^*_{PO} с учетом (15) приближенно может быть определена из соотношений:

$$V^*_{PO}(t) = V_{PO}(t) - \Delta V_{PO}(t); \qquad \Delta V_{PO}(t) = k_{\Delta V,\Delta S}k_{\Delta S,масш}\Delta S_{PO}(t); \tag{16}$$

$$k_{\Delta V,\Delta S} = \left(60\cdot t_{s_z}\right)^{-1} = z\cdot n_ф/60; \qquad k_{\Delta S,масш} = 1\cdot 10^{-3}, \tag{17}$$

где V_{PO} и ΔV_{PO} – соответственно заданная (расчетная) скорость подачи и скорость смещения РО, м/с; $k_{\Delta V,\Delta S}$ – коэффициент преобразования упругого смещения системы МП-РО в ее скорость смещения, зуб/с.

Из (14)÷(17) получаем оператор скорости упругого смещения РО:

$$\Delta V_{PO}(t) = W_{\Delta V_{PO}}(p)P_h(t); \qquad W_{\Delta V_{PO}}(p) = k_{\Delta V,\Delta S}k_{\Delta S,масш}W_{УМС}(p) = \frac{z\cdot n_{ф}}{6\cdot 10^4}\cdot\frac{K_{УМС}}{T_1p^2+T_2p+1}; \tag{18}$$

$$T_1 = T_0^2 = 1\cdot 10^{-3}mc^{-1}\left[\text{с}^2\right]; \qquad T_2 = 2\xi T_0 = 1\cdot 10^{-3}\left(R_0'+\beta\right)c^{-1}\left[\text{с}\right]; \qquad K_{УМС} = c^{-1}, \tag{19}$$

где $W_{УМС}(p)$ и $K_{УМС}$ [мм/Н] – оператор и коэффициент передачи (податливость) УМС; T_0 и ξ – период собственных недемпфированных колебаний и коэффициент демпфирования УМС, $T_0 = \sqrt{1\cdot 10^{-3}\,m/c}$, с.

Подставляя (12) в первое уравнение (18), для оператора модели ПР, связывающего фактическую скорость подачи РО и скорость упругого смещения РО, с учетом (9), (13), второго уравнения (18) и (19) находим

$$\Delta V_{PO}(t) = W_{\Delta V,V^*}(p)V_{PO}^*(t); \qquad W_{\Delta V,V^*}(p) = W_{\Delta V_{PO}}(p)W_{P_h}(p) = \frac{K_{\Delta V,V^*}}{\left(T_pp+1\right)\left(T_1p^2+T_2p+1\right)}, \tag{20}$$

где $K_{\Delta V,V^*}$ – безразмерный коэффициент передачи ПР: $K_{\Delta V,V^*} = k_{hz}\sin\varphi K_pK_{УМС} = K\cdot k_{hz}\cdot t_p/c$.

Тогда, согласно первому соотношению выражения (16) и формулам (20), оператор, связывающий фактическую и заданную (расчетную) скорости подачи РО, принимает вид

$$V_{PO}^*(t) = W_{V^*,V}(p)V_{PO}(t); \qquad W_{V^*,V}(p) = \frac{1}{1+W_{\Delta V,V^*}(p)} = \frac{T_pT_1p^3+(T_1+T_pT_2)p^2+(T_p+T_2)p+1}{T_pT_1p^3+(T_1+T_pT_2)p^2+(T_p+T_2)p+1+K_{\Delta V,V^*}}, \tag{21}$$

откуда для оператора модели эталонного (условного) компенсатора ПР $W_{ЭКПР}(p)$ получаем

$$V_{PO}(t) = W_{ЭКПР}(p)V_{PO}^*(t); \tag{22}$$

$$W_{ЭКПР}(p) = W_{V^*,V}^{-1}(p) = \frac{\left(1+K_{\Delta V,V^*}\right)\left(\frac{T_pT_1}{1+K_{\Delta V,V^*}}p^3+\frac{T_1+T_pT_2}{1+K_{\Delta V,V^*}}p^2+\frac{T_p+T_2}{1+K_{\Delta V,V^*}}p+1\right)}{T_pT_1p^3+\left(T_1+T_pT_2\right)p^2+\left(T_p+T_2\right)p+1}. \tag{23}$$

Из (20), (22) и (23) нетрудно видеть, что в теоретически идеализированных случаях бесконечно большой жесткости системы МП-РО, когда $c\to\infty$, или равенства нулю любого из параметров, входящих в числитель второго соотношения (20), коэффициент передачи ПР $K_{\Delta V,V^*} = 0$, $W_{ЭКПР}(p) = 1$, и процесс резания не оказывает никакого влияния на качество продольной подачи РО станка двухканальным приводом!

Результаты исследования. Структурно-алгоритмическая схема компенсированного итерационного двухканального ЭП подачи с двумя ВП и подчиненной настройкой каналов управления, построенная с учетом ДВВК по нагрузке, операторов КПС (8), операторов ПР (13) и (18), и оператора компенсатора ПР (23), приведена на рис. 3. На рисунке пунктирными линиями упрощенно показаны связи, обеспечивающие возможность реализации в итерационном режиме управления последовательно-параллельного подключения уточняющего канала К-2 к работе основного канала К-1 для более эффективной работы двухканального привода в зоне средних и больших перемещений РО. Кроме того, штрихпунктирной линией также упрощенно показана возможность реализации автоматического подключения в систему управления собственной ОС по положению канала К-2 от датчика положения $k_{\text{п},\varphi_{Д2}}$ вала ИД Д2. Такое подключение разгружает и нормализует работу уточняющего привода в режимах его насыщения по положению, соответствующих значениям управляющего сигнала ε_2, превышающим допустимые границы движения (устанавливаются блоком *БОП*2) второй винтовой пары ВП2. При этом в двухканальной САУ реализуется переход от итерационного режима работы к режиму независимой параллельной работы каналов К-1 и К-2. На рис. 3 помимо традиционно принятых и введенных в работе обозначений дополнительно показаны: *ОР* – оператор резания; *ОУМК* – оператор упругих механических колебаний системы РО-резец; *ФСП РО* – формирователь силы подачи РО P_h; *ФСУС РО* – формирователь скорости упругого смещения РО; *ФМН ХВ*1 и *ФМН ХВ*2 – формирователи моментов нагрузки, приведенных соответственно к ХВ1 и ХВ2; *ЭКПР* – эталонный (условный) компенсатор процесса резания. Разработанная структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального ЭП подачи с двумя ВП и учетом моделей компенсатора ДВВК по нагрузке и компенсатора ПР позволяет создать адекватную компьютерную модель соответствующей высокоточной итерационной двухканальной системы управления для ЭП подач станков моделей 24К60АФ4 и 24К70АФ4. - Компьютерное моделирование, в свою очередь, позволит выполнить построение электродинамических характеристик, необходимых для исследования привода, и провести сравнительный анализ потенциальной эффективности (с точки зрения повышения быстродействия и точности управления) предлагаемого двухканального ЭП подачи по сравнению с аналогичными традиционными одноканальными ЭП подачи, устанавливаемыми на металлорежущие станки данного типа.

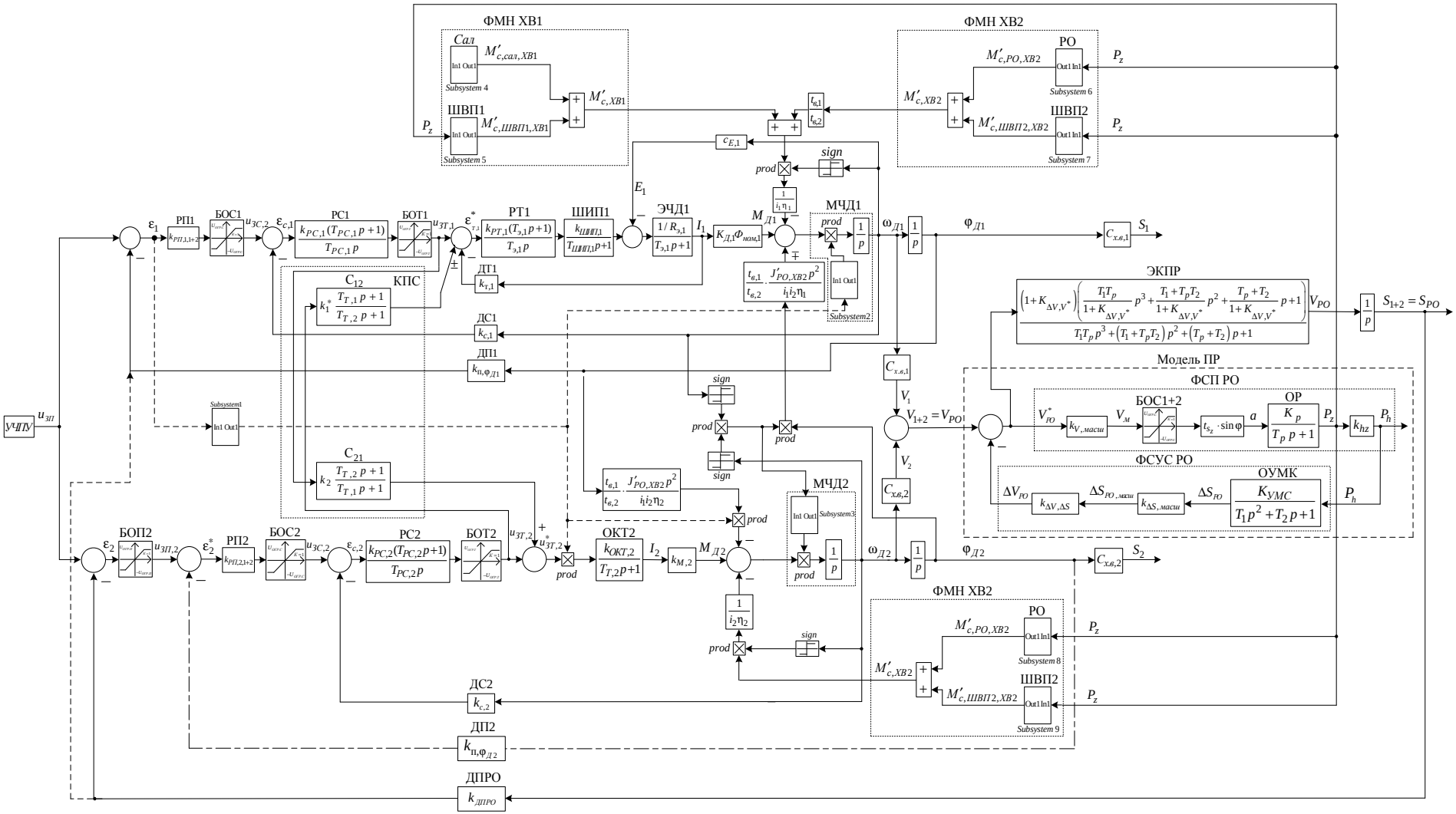


Рис. 3. Структурно-алгоритмическая схема компенсированного итерационного двухканального электропривода МП с двумя ВП и учетом модели процесса резания применительно к подаче РО станка

Выводы. 1. На основании обобщенной структурной схемы системы управления выполнен анализ потенциальной точности двухканального электропривода МП с двумя ВП, построенного по итерационному принципу. Показано, что при достаточно широкополосном втором, уточняющем канале К-2 в итерационном двухканальном ЭП подачи РО станка может быть получена точность воспроизведения управляющего сигнала по положению, недостижимая в аналогичных по назначению традиционных одноканальных ЭП подачи.

2. Приведены упрощенные структурно-функциональные схемы предлагаемого итерационного двухканального ЭП МП с двумя ВП и аналогичного одноканального (автономного) ЭП применительно к подаче РО станка.

3. Получена линейная математическая модель процесса резания для установившихся режимов подачи РО станка при механообработке (фрезеровании) изделия. Модель ПР при определенных допущениях может быть представлена линейным дифференциальным оператором 3-го порядка $W_{V^*,V}(p)$ вида (21), связывающим фактическую и заданную (расчетную) скорости подачи РО.

Показано, что оператор ПР $W_{V^*,V}(p)$ представляет собой произведение операторов:

силы подачи РО $W_{P_h}(p)$ вида (13) и скорости упругого смещения РО $W_{\Delta V_{PO}}(p)$ вида (18), определяющих статику и динамику упругой механической системы РО-резец. Получен линейный дифференциальный оператор 3-го порядка модели эталонного (условного) компенсатора ПР.

4. Построена структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального ЭП подачи с двумя ВП и СПР-настройкой каналов, учитывающая как компенсацию влияния ДВВК по нагрузке, так и компенсацию статики и динамики ПР в режимах механообработки изделия. Построенная структура позволяет создать соответствующую адекватную компьютерную модель привода, на основании которой может быть выполнена оценка потенциальной точности и проведен сравнительный анализ эффективности предлагаемого двухканального ЭП подачи.

Список литературы: 1. *Кузнецов Б. И.* Проектирование многоканальных систем оптимального управления / *Б. И. Кузнецов, Б. В. Новоселов, И. Н. Богаенко* и др. – К.: Техніка, 1993. – 245 с. **2**. *Худяев А. А.* Высокоточный трехканальный дифференциальный электропривод с подчиненным регулированием для механизма подачи обрабатывающего центра / *А. А. Худяев, Д. А. Пшеничников, В. В. Поленок* // Сб. научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск. – 2013. – № 36 (1009). – С. 202–206. **3**. *Худяев А. А.* Высокоточная квазиитерационная двухканальная электромеханическая система с механическим дифференциалом / *А. А. Худяев, Т. Ю. Кунченко* // Техническая электродинамика. – 2015. – № 1. – С. 21–28. **4**. *Худяев А. А.* Математическая модель движения итерационного двухканального электропривода механизма подачи с двумя винтовыми парами / *А. А. Худяев* // Сб. научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск. – 2015. – № 12 (1121) – С. 83–88. **5**. *Александров Е. Е.* Оптимизация электромеханических систем с упругими элементами: Монография / *Е. Е. Александров, Б. И. Кузнецов, А. Е. Радиевский* и др. – Х.: ИМИС, 1995. – 304 с. **6**. *Кузнецов Б. И.* Многоканальные итерационные системы управления: Монография / *Б. И. Кузнецов, А. А. Худяев, И. Н. Богаенко* и др. – К.: НПК «КИА», 1998. – 224 с. **7.** *Орликов М. Л.* Динамика станков / *М. Л. Орликов*. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк., 1989. – 272 с. **8.** Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. *А. Г. Косиловой* и *Р. К. Мещерякова*. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. **9.** Кудинов В. А. Динамика станков / *В. А. Кудинов*. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с. **10.** *Худяев А. А.* Устойчивость системы «резец-деталь» в приводах подач металлорежущих станков / *А. А. Худяев* // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2001. – № 1 (8). – С. 79–85. **11.** *Расторгуев Д. А.* Определение сил резания при фрезеровании электроизоляционного картона / *Д. А. Расторгуев* и *И. В. Кузьмич* // Сб. научн. трудов «Вектор науки ТГУ». – 2014. – № 4 (30). – С. 37–43. **12.** *Анохина А. Ю.* Исследование составляющих компонентов силы резания и силы трения при высокоскоростной механической обработке / *А. Ю. Анохина*. – http://uran.donetsk.ua/~masters/2009/mech/anokhina/library/article8.htm.

Bibliography (transliterated): 1. Kuznecov, B. I., Novoselov, B. V., Bogaenko, I. N. and oth. *Proektirovanie mhogokanal'nyh sistem optimal'nogo upravlenija*. Kyiv: Tehnika, 1993. Print. **2.** Hudjaev, A. A, Pshenichnikov, D. A. and Polenok, V. V. "Vysokotochnyj trehkanal'nyj differencial'nyj jelektroprivod s podchinennym regulirovaniem dlja mehanizma podachi obrabatyvayushchego centra." *Sb. nauchnyh trudov «Vestnik NTU "HPI"*. *Tematicheskij vypusk»*. No. 36 (1009). 2013. 202–206. Print. **3.** Hudjaev, A. A. and Kunchenko, T. Yu. "Vysokotochnaja kvaziiteracionnaja dvuhkanal'naja jelektromehanicheskaja sistema s mehanicheskim differencialom." *Tehnicheskaja jelectrodinamika*. No. 1. 2015. 21–28. Print. **4.** Hudjaev, A. A. "Matematicheskaja model' dvizhenija iteracionnogo dvuhkanal'nogo jelektroprivoda mehanizma podachi s dvumja vintivymi parami." *Sb. nauchnyh trudov «Vestnik NTU "HPI"*. *Tematicheskij vypusk»*. No. … (….). 2015. …–… Print. **5.** Aleksandrov, E. E., Kuznecov, B. I., Radievskij, A. E. and oth. *Optimizacyja jelektromehanicheskih sistem s uprugimi jelementami*. Kharkiv: IMIS, 1995. Print. **6.** Kuznecov, B. I., Hudjaev, A. A., Bogaenko, I. N. and oth. *Mnogokanal'nye iteracionnye sistemy upravlenija*. Kyiv: NPK "KIA", 1998. Print. **7.** Orlikov, M. L. *Dinamika stankov*. Kyiv: Vyshcha shk., 1989. Print. **8.** Kosilova, A. G., Meshcherjakov, R. K. *Spravochnik tehnologa mashinostroitelja*. In 2 vol. Vol.2. Moscow: Mashynostroenie, 1985. Print. **9.** Kudinov, V. A. *Dinamika stankov*. Moscow: Mashynostroenie, 1967. Print. **10.** Hudjaev A. A. "Ustojchivost' sistemy «rezec-detal'» v privodah podach metallorezhushchih stankov." *Avtomatika. Avtomatizacija. Jelectrotehnicheskie kompleksy i sistemy*. No. 1 (8). 2001. 79–85. Print. **11.** Rastorguev, D. A. "Opredelenie sil rezanija pri frezerovanii jelektroizoljacionnogo kartona." *Sb. nauchn. trudov «Vektor nauki TGU»*. No. 4 (30). 2014. 37–43. Print. **12.** Anohina A. Yu. Issledovanie sostavljayushchih komponentov sily rezanija i sily trenija pri vysokoskorostnoj mehanicheskoj obrabotke. – http://uran.donetsk.ua/~masters/2009/mech/anokhina/library/article8.htm.

Поступила (*received*) 07.08.2015

УДК 621.361.72

О. І. ТОЛОЧКО, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри ЕАПУ ДонНТУ, м. Красноармійськ

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В СЕРЕДОВИЩІ ПАКЕТА MATLAB З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОКІВ ДОДАТКУ ВІРТУАЛЬНОГО ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ SIMSCAPE

Введення. У багатодвигунних системах електроприводу та в системах керування складними електромеханічними об'єктами з розгалуженими кінематичними схемами, що враховують пружні зв'язки в кінематичних передачах, доволі часто використовують електричні двигуни змінного струму, зокрема асинхронний та синхронний. Ці двигуни з точки зору теорії автоматичного керування є нелінійними багатомірними об'єктами із досить складною структурою [1, 2].

Час, що витрачається дослідником на «модельний експеримент» в значній мірі залежить від обраного ним програмного середовища. Величезної популярності при моделюванні електромеханічних об‘єктів набув пакет *MATLAB* з програмою структурного моделювання *Simulink* і програмою віртуального фізичного моделювання *SimScape* [3-5]. До його складу поряд з фундаментальною бібліотекою процесів *Foundation Library (Electrical*, *Hydraulic*, *Magnetic*, *Pneumatic*, *Thermal)* входять такі бібліотеки як *SimElectronics*, *SimMechanics*, *SimHydraulics*, *SimDriveline* та *SimPowerSystems*.

Розробку математичних моделей складних електромеханічних об‘єктів можна суттєво спростити, скориставшись можливостями поширень *SimPowerSystems* та *Mechanical*.

Блоки цих поширень постійно удосконалюються та відповідно змінюються. Методичні рекомендації щодо їхнього застосування допоможуть більш швидко і якісно отримати необхідні результати досліджень складних електромеханічних систем методом математичного моделювання.

Постановка задачі. *Simulink*-моделі електричних двигунів, особливо двигунів змінного струму, є достатньо складними. При їх створенні легко помилитися як структурно, так і параметрично. Налаштування цих моделей потребує багато часу. Ці недоліки компенсуються багатофункціональністю моделей, тому що користувач легко може їх модифікувати у відповідності до своїх потреб.

Віртуальні фізичні моделі двигунів у додатку *Power System Blockset*, що входив до пакетів *MATLAB-5*, *MATLAB-6* і який, починаючи з версії *MATLAB-6.1*, змінив свою назву на *SimPowerSystems*, виявилися дуже зручними для користувача, тому що не вимагали від нього глибокого знання математичного опису і швидко налаштовувались. Однак їх не можна було використовувати при ускладненні механічної частини систем електроприводу.

Починаючи з версій *MATLAB-7*, авторами пакета ужито заходів щодо усунення цього недоліку. Спочатку у блоків електродвигунів з'явилась опція, яка надала можливість користувачеві, у разі необхідності, замінювати основний вхідний механічний порт Tm (момент навантаження) портом w «швидкість», що створило передумови для моделювання багатодвигунних систем електроприводу, працюючих на спільний механічний вал. Потім, після переміщення додатку *SimPowerSystems* в бібліотеку віртуального фізичного моделювання *SimScape*, ця опція була доповнена можливістю підключення до двигунів механічного *Simscape*-порта S, призначеного для створення механічних навантажень за допомогою віртуальних механічних блоків бібліотеки *Simscape*, що мають механічні обертові порти.

У такий спосіб, шляхом подальшого розвитку концепції віртуального фізичного моделювання, блоки електричних машин набули більшої гнучкості за рахунок можливості приєднання до них механічних блоків і забезпечення необхідних, прихованих від користувача, змін в математичних моделях двигунів.

Метою даної роботи є показати на прикладі розробки моделей дводвигунної системи «механічний вал» та двомасової електромеханічної системи з асинхронними двигунами нові можливості програми віртуального фізичного моделювання *SimScape* пакета *MATLAB*.

Матеріали досліджень. Для конкретності в даній роботі оберемо для модельного експерименту середовище *MATLAB R2013a*. Спочатку розглянемо основні концепції, використані авторами пакету при створенні додатку *SimPowerSystems* (SPS). Бібліотека SPS призначена для моделювання електротехнічних схем, засобів силової електроніки та електричних машин. Блоки бібліотеки SPS подано у вигляді позначень відповідних елементів на принципових електричних схемах. SPS-блоки мають такі особливості [5]:

• їх входи та виходи, на відміну від *Simulink*-блоків (S-блоків), не вказують напрямок передачі сигналу, бо вони фактично є еквівалентами електричних контактів;

• лінії зв‘язку між SPS-блоками є моделями ідеальних (з нульовим опором) електричних проводів, по яким струм може протікати в обох напрямках;

• SPS- та S-блоки не можуть з'єднуватися один з іншим безпосередньо; сигнал від *S*-елементів можна передати до SPS-елементів тільки через керовані джерела енергії(*Controlled Voltage/Current Source*) SPS-бібліотеки *Electrical Sources*, а навпаки – через блоки бібліотек засобів вимірювання (*Measurements*);

© О.І. Толочко, 2015

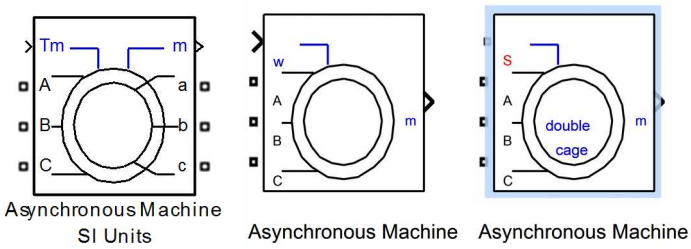
• в моделі, яка отримує в собі SPS-блоки, має бути присутнім хоча б один з вимірювальних SPS-приборів, що пов‘язано з особливостями перетворення SPS-моделі в еквівалентну розрахункову S-модель;

• в SPS-модель необхідно встановлювати блок *powergui*.

В розділі *Machines* бібліотеки *SimPowerSystems* можливістю варіації механічних вхідних портів наділені такі блоки: *Asynchronous Machine SI Units* (асинхронна машина в абсолютних одиницях системи СІ), *Asynchronous Machine pu Units* (асинхронна машина у відносних одиницях), *Permanent Magnet Synchronous Machine* (синхронний двигун з постійними магнітами) та *DC Machine* (двигун постійного струму)).

Розглянемо детальніше блок *Asynchronous Machine SI Units* (рис.1). Він має порти A, B, C та a, b, c, що відповідають електричним затискачам статора та ротора відповідно. Крім електричних портів, моделі мають один механічний вхід та векторний інформаційний вихід m (*measurements*), який передбачає подальшу обробку або фіксацію сигналів засобами базових блоків *Simulink*.

Зовнішній вигляд блоку визначається типом ротора та типом механічного входу, які встановлюються за допомогою меню параметрів *Rotor type* і *Mechanical input* вкладки *Configuration*.



а) б) в)

Рис. 1. – Блоки *Asynchronous Machine SI Units* з різними типами ротора (*Rotor Type*) та механічних входів (*Mechanical input*):
а – з фазним ротором (*Wound*) і з *Simulink*-портом «момент навантаження» Tm (*Torque*);
б – з білячою кліткою на роторі (*Squirrel-cage*) і з *Simulink*-портом «швидкість» w (*Speed*);
в – з двома білячими клітками (*Double squirrel-cage*) і з механічним *Simscape*-портом S

Параметри АД та можливість їх встановлення або коригування залежать від стану функції *Preset Model* (попередня ініціалізація моделі даними деякого двигуна) вкладки *Configuration*. У початковому стані (при знаходженні блоку в бібліотеці) ця функція має значення *No*, параметри вкладки *Parameters* мають певні значення, які після переміщення блоку у вікно моделі можна змінювати. В меню функції *Preset Model* наводиться перелік, з якого можна обрати конкретний двигун за його потужністю у кінських силах HP (1HP = 746 Вт), діючим значенням лінійної напруги статора у Vrms, номінальною частотою в Hz та номінальною швидкістю в RPM (об/хв.). Вибір певного двигуна, підтверджений натисканням кнопки *Apply*, призводить до автоматичного встановлення відповідних параметрів у вкладці *Parameters*, які тепер не можуть бути скориговані користувачем. Слід зазначити, що до параметрів попередньо обраних двигунів не входять координати кривої намагнічування, тобто, ці координати задані тільки для одного двигуна, параметри якого встановлюються за замовченням (початковий стан моделі). Для того, щоб зробити дані попередньо обраного двигуна доступними до коригування, треба після вибору цього двигуна (*Apply*) знову встановити функцію *Preset Model* у значення *No*. Підкреслимо, що можливість ініціалізації моделі через встановлення певного набору параметрів АД передбачена тільки для двигунів з однією білячою кліткою на роторі.

На рис. 2 представлена SPS-модель системи «механічний вал», що складається з двох асинхронних двигунів АМ1 та АМ2 з однаковими значеннями номінальної напруги та швидкості, але з різними номінальними моментами. Вони живляться від спільного трифазного SPS-джерела *Three-Phase Programmable Voltage Source*, яке задає трифазну систему фазних напруг з амплітудою і частотою, що відповідають номінальним параметрам АД.

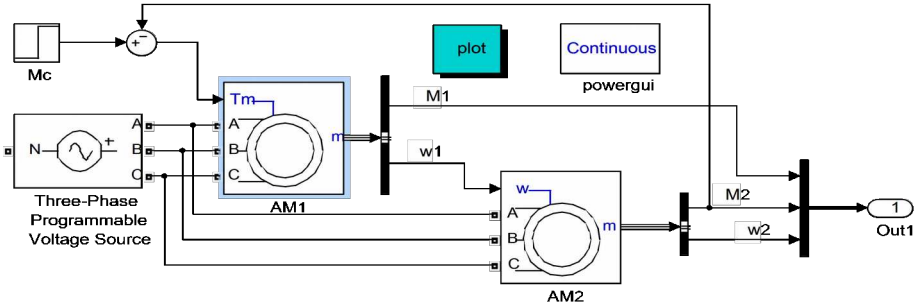


Рис. 2. – SPS-модель системи «механічний вал»

Механічний зв'язок між двигунами здійснюється подачею швидкості w1 першого двигуна АМ1, на механічний порт w другого двигуна АМ2. Спільний момент статичного опору Мс формується S-блоком *Step*, який імітує прикладання до валу двигуна номінального навантаження після досягнення ним усталеної швидкості, але перед подачею його на механічний порт Tm першого двигуна від нього віднімається електромагнітний момент M_2, створений іншим двигуном. Момент інерції другої машини при встановленні на ній швидкісного вхідного порту ігнорується, і відноситься до першого двигуна. При чому перша частина цієї операції виконується автоматично, тобто момент інерції зникає зі списку параметрів двигуна АМ2, а друга частина повинна бути виконана власноруч користувачем. У такий спосіб моменти обох двигунів підсумовуються і разом діють на спільну механічну масу з моментом інерції $J_\Sigma = J_1 + J_2$ згідно з рівнянням руху:

$$M_1 + M_2 - M_c = M_j = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де M_1 – електромагнітний момент, створений першим двигуном АМ1;

M_2 – електромагнітний момент, створений другим двигуном АМ2.

Дослідження системи «механічний вал» за допомогою моделі рис. 2 виконано для двигунів, обраних з використанням функції *Preset Model: AM1 – 100 HP 460 V 60 Hz 1780 RPM; AM2 – 50 HP 460 V 60 Hz 1780 RPM.*

Перехідні процеси в досліджуваній системі при прямому пуску та при стрибкоподібному накиді навантаження $M_c = 500\,Н \cdot м$ в момент часу 0,7 с зображені на рис. 3

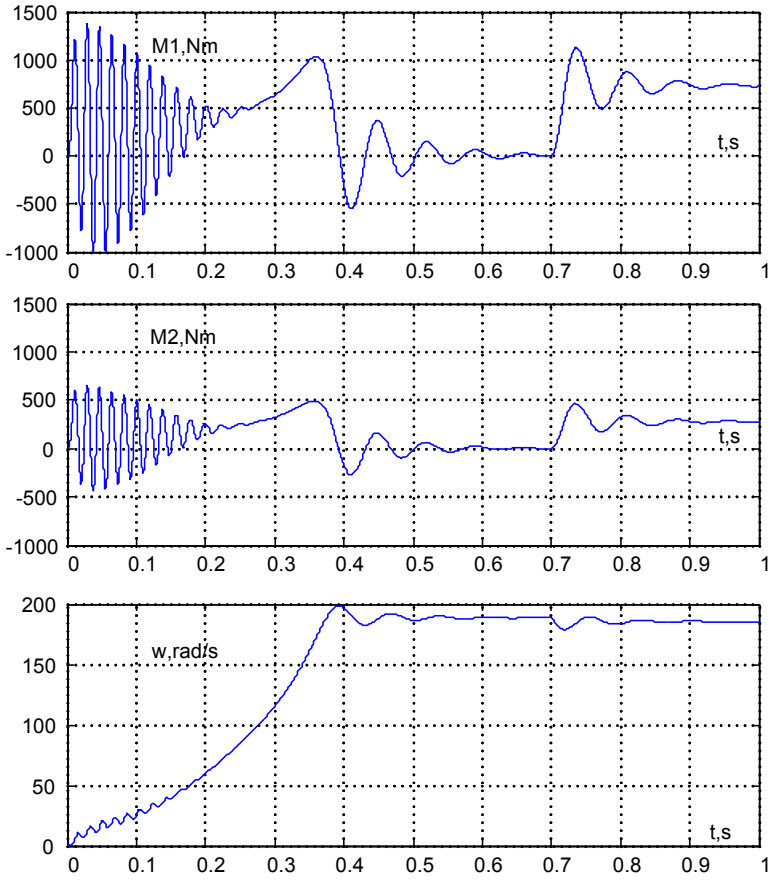


Рис. 3. – Перехідні процеси системи «механічний вал»

Активний опір ротора двигуна АМ1 приблизно втричі перевищує відповідний опір двигуна АМ2. Як видно з наведених графіків, відповідно розподіляється навантаження між двигунами в усталеному режимі.

На рис. 4 подана модель асинхронної машини з використанням механічного *Simscape*-порту для моделювання двомасової електромеханічної системи з урахуванням моменту тертя, що діє на другу масу (робочий орган виконавчого механізму).

Механічна частина досліджуваної системи описується рівняннями:

$$\begin{cases} M - M_{12} = J_1 \dfrac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{12} - M_f = J_2 \dfrac{d\omega_2}{dt}, \\ \Delta\omega_{12} = \omega_1 - \omega_{2,} \\ \dfrac{d\Delta\varphi_{12}}{dt} = \omega_{-2,} \\ M_{-2} = c_{-2}\Delta\varphi_{-2,} \end{cases} \quad (2)$$

де J_1, ω_1 – момент інерції та кутова швидкість першої маси (двигуна); J_2, ω_2 – момент інерції та кутова швидкість другої маси (механізму); M, M_{12}, M_f – електромагнітний момент АД, пружний момент та момент тертя відповідно; $c_{12}, \Delta\omega_{12}, \Delta\varphi_{12}$ – коефіцієнт пружності кінематичної передачі, різниця кутових швидкостей на її кінцях та кут її скручування.

Вона реалізована за допомогою блоків розділу *Mechanical* фундаментальної бібліотеки (*Foundational library*) інструментів *SimScape*.

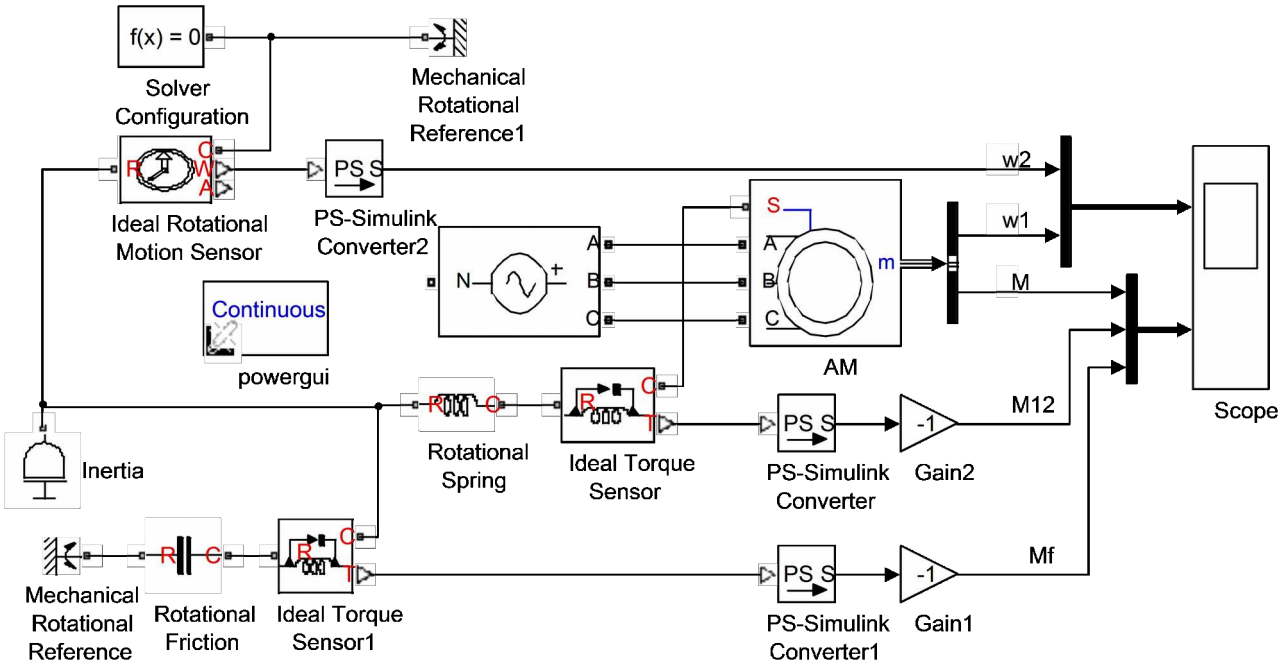


Рис. 4. – Модель двомасової електромеханічної системи на базі АД, що реалізована за допомогою «електричних» та «механічних» блоків

В моделі рис. 4 друга маса представлена блоком *Inertia*, пружний вал – блоком *Rotational Spring*, а тертя – блоком *Rotational Friction* бібліотеки *Rotational Elements*. Блок *Mechanical Rotational Reference* прив'язує конкретну точку механічної системи до каркасу або до землі.

Блок *Rotational Friction* формує момент тертя за рівняннями [6]:

$$M_f = \begin{cases} \dfrac{M_{brk}}{\omega_{th}}\omega, & при \ |\omega| \le \omega_{th}; \\ \left[M_C + M_S e^{\left(-c_S|\omega - \omega_{th}|\right)} + f_v|\omega - \omega_{th}|\right] sign(\omega), & при \ |\omega| > \omega_{th}, \end{cases} \quad (3)$$

де M_{brk} – тертя спокою (зрушування), тобто початковий момент тертя при розгоні (*Breakway friction torque*); M_C – кулонівська компонента тертя (*Coulombic friction torque*), тобто момент так званого «сухого» тертя, амплітуда якого не залежить від величини швидкості; $M_S = M_C - M_{brk}$ – компонента Штрібека (*Stribeck*), яка існує при умові врахування різниці між тертям спокою та тертям руху; c_S – коефіцієнт експоненціальної складової тертя (*Transitional approximation coefficient*); f_v – коефіцієнт в'язкого тертя (*viscous Friction coefficient*); ω_{th} – межа лінійної ділянки (*Linear region velocity threshold*) статичної характеристики тертя $M_f(\omega)$, зображеної на рис. 5.

Насправді коефіцієнт лінійної ділянки характеристики $M_f(\omega)$ дорівнює ∞, тобто досліджувана функція має в точці $\omega = 0$ розрив першого роду. Наявність таких ланок у замкнених контурах створює великі проблеми

при цифровому моделюванні, пов‘язані з дискретністю за часом, відсутністю «нуля» при використанні арифметики із плаваючою точкою, особливістю організації ітераційних процесів вибору кроку чисельного інтегрування диференційних рівнянь.

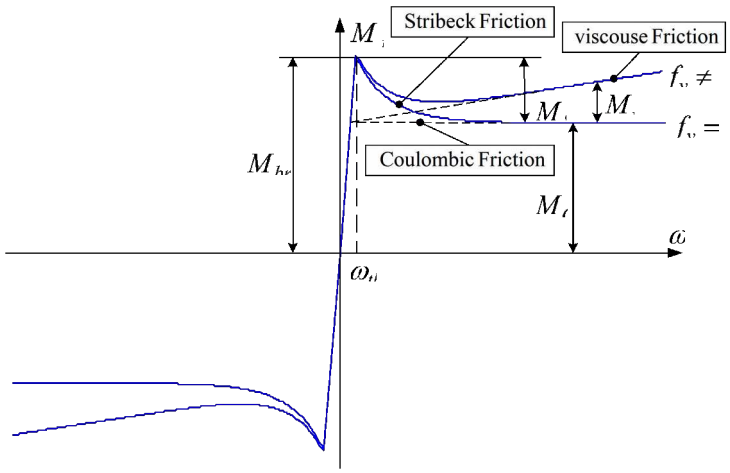


Рис. 5. – Статична характеристика тертя, реалізованого SimScape-блоком Rotational Friction

Одним з виходів із цієї ситуація є заміна розривних функцій неперервними функціями з великим, але кінченим коефіцієнтом підсилення лінійної ділянки в зоні розриву. Автори програмного забезпечення стверджують, що гарного компромісу між точністю моделювання і робастністю моделі та швидкістю розрахунків можна досягти при $\omega_{th} = (10^{-5} \div 10^{-3})$ рад/с. Необхідно зауважити, що таке спрощення характеристики тертя приводить до того, що при моделюванні процесу гальмування електромеханічна система не зупиняється, а рухається навколо нуля з дуже малою швидкістю.

Перехідні процеси у двомасовій системі, отримані за допомогою моделі рис. 4 для двигуна потужністю 3,7 кВт з моментом інерції $J_1 = 0{,}02$ кг·м^2 і приєднаної до нього через пружний вал з коефіцієнтом жорсткості $c_{12} = 100$ Н·м/рад другої зосередженої обертової маси з моментом інерції $J_2 = 0{,}005$ кг·м^2 при врахуванні кулонівського тертя з ефектом Штрібека, приведені на рис. 6.

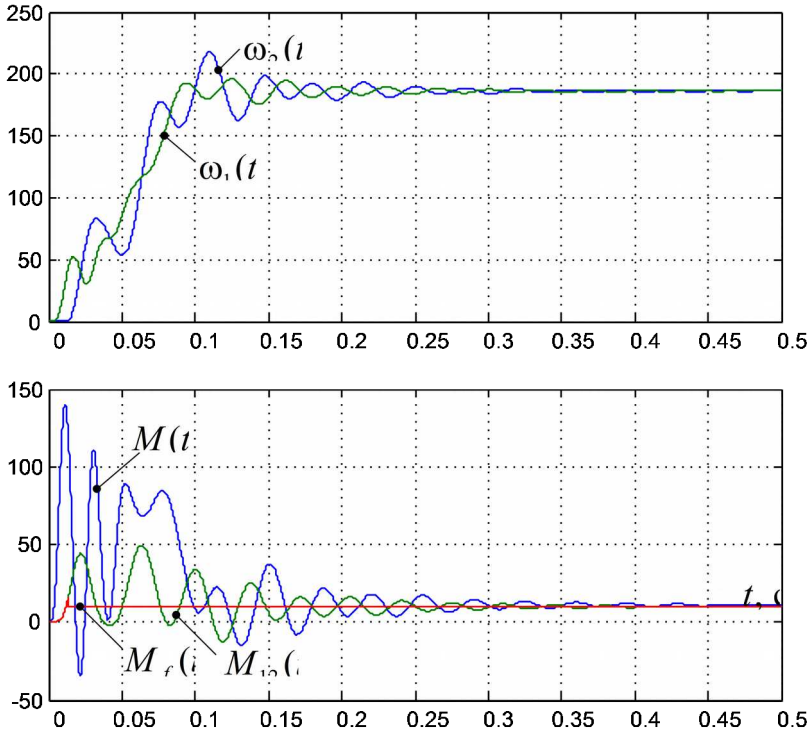


Рис. 6. – Графіки перехідних процесів у моделі двомасового електромеханічного об'єкту рис. 4

Для фіксації вихідних сигналів механічних *SimScape*-блоків у досліджувану модель підключені ідеальні датчики моменту (*Ideal Torque Sensor*) та руху (*Ideal Rotational Motion Sensor*). Усі механічні блоки мають механічні порти, позначені латинськими буквами R і C, причому передача моменту або зусилля здійснюється в напрямку від порту R до порту C. Механічні датчики, крім цих портів, мають ще порти фізичних сигналів, позначені трикутниками та відповідними буквами: T – *torque* (момент), W – *angular velocity* (кутова швидкість), A – *angular displacement* (кутове положення).

Фізичні сигнали після перетворення їх блоками *PS Simulink Converter* бібліотеки *Utilites* додатку *SimPowerSystem* можна використовувати для фіксації результатів засобами *Simulink*.

Ще однією з особливостей використання механічних *SimScape*-блоків є необхідність приєднання хоча б до одного з механічних портів блоку *Solver Configuration* бібліотеки *Utilites*.

В моделі рис. 4 легко рахувати поряд із пружністю кінематичної передачі ефект в‘язкого тертя, для чого паралельно до блоку *Rotational Spring* приєднується блок *Rotation Damper*.

Порівняння отриманих графіків перехідних процесів з аналогічними графіками, одержаних при використанні *Simulin* -моделей підтверджують їх тотожність.

Висновки.

1. Доповнення моделей електричних двигунів бібліотеки *SimPowerSystems* пакета *MATLAB* можливістю замінювати механічний порт «момент навантаження» Tm механічними портами «швидкість» w і *Simscape*-портом S дозволяє втручатися у модель механічної частини двигуна, зокрема створювати моделі багатодвигунних систем електроприводу з роботою двигунів на спільний вал та віртуальні фізичні моделі багатомасових електромеханічних об‘єктів.

2. Розглянуті у статті SPS-модель системи «механічний вал», складеної з двох асинхронних двигунів, та *SimScape*-модель двомасової електромеханічної системи на базі асинхронного двигуна «механічний вал» наочно демонструють їх простоту у порівнянні з аналогічними *Simulink*-моделями, і можуть бути рекомендованими для досліджень.

3. На базі запропонованих моделей можна за зразком створювати віртуальні фізичні моделі електромеханічних об‘єктів із самими різноманітними кінематичними зв‘язками.

Список літератури: 1. Шевченко І.С. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: [навч. посібник] / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов // Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с. **2.** Толочко О.І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета MATLAB / О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, Д.М. Мірошник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2003. – Т.1. – № 2 (19). – С. 199-202. **3.** SimPowerSystems User's Guide. / Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. – 402 p. **4.** Герман-Галкин С.Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин // СПб.: Корона–Век, 2008. – 368 с. **5.** Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных // М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с. **6.** Armstrong B., de Wit C.C. Friction Modeling and Compensation / B. Armstrong, C.C. de Wit // CRC Press, 1995.

Bibliography (translated): 1. Shevchenko I.S, Morozov D.I. Electrmehanichni systemy v asynhronnomu electropryvodi. Alchevsk: DonSTU, 2009. Print. **2.** Tolochko,O.I., Chekavskyj H.S. and Miroshnik D.M. «Vector model of induction motor in an environment package MATLAB». *Visnyk Kremenchyc'kogo dergavnogo politehnichnogo universytetu: Naukovi praci KDPU*. 1.2.19 (2003): 199-202. Print. **3.** SimPowerSystems User’s Guide. Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. **4.** German-Galkin S.G. MATLAB & Simulink. Proectirovanie mehatronnyh system na PK St. Petersburg: Korona-Vec,, 2008. Print. **5.** Chernih I.V. Modelirovanie electrotehnicheskyh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. Moscow: DMK Press, St. Petersburg: Piter, 2008. Print. **6.** Armstrong B., de Wit C.C. Friction Modeling and Compensation. CRC Press, 1995.

Надійшла (received) 05.06.2015

УДК 62-5, 681.5

В. П. СТЯЖКИН, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. ИЭД НАН Украины, Киев
П. П. ПОДЕЙКО, вед.инж. ИЭД НАН Украины, Киев

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ БАЗАЛЬТОГО СУПЕРТОНКОГО ВОЛОКНА

Введение. Применение базальтовых волокнистых материалов для теплоизоляции теплотехнического оборудования (печей, сушильных барабанов, циклонов), холодильных установок на объектах промышленной эксплуатации, ТЭС, АЭС позволяет значительно сократить тепловые потери, а значит непроизводительный расход топлива и электроэнергии. При этом все больше ужесточаются технические требования к теплоизоляционным волокнистым материалам. Так на АЭС, где температура изолируемой поверхности оборудования достигает 1000°С, предъявляются особые требования по надёжности материала и сроку его эксплуатации в связи с воздействием на них радиоактивного облучения. Базальтовые супертонкие волокна (БСТВ) по своим химико-технологическим свойствам наиболее подходящий теплоизоляционный материал для указанных производств. Технология производства таких материалов и изделий из них отработана и хорошо известна [1, 2], однако далека от совершенства.

Постановка задачи. Проблема оптимального управления технологической установкой по производству базальтовых супертонких волокон с целью повышения качества выпускаемой продукции, снижения удельных энергозатрат, повышение производительности установки является одной из важнейших задач при модернизации технологического процесса производства БСТВ. Чтобы достичь качественных сдвигов в совершенствовании технологического процесса получения БСТВ, необходима полная управляемость параметрами процесса и информационная обеспеченность (средства контроля и управления рядом важнейших параметров процесса). Решение указанной проблемы позволит повысить эффективность установок по производству БСТВ.

Материалы исследования. Последовательность технологических операций и параметров при производстве БСТВ отражена на рис.1. Установка по производству БСТВ функционально показана на рис. 2.

Технологические операции производства БСТВ	Технологические параметры
Подготовка шихты (базальтовой крошки) – дробление, просеивание, промывание водой	
↓	
Загрузка шихты в печь механическим загрузчиком	Интервал включения сбрасывателя загрузчика – 15…45 с
↓	
Плавление шихты в плавильной печи и	Температура в печи – 1360…1450 ºС
подготовка расплава в фидере к выработке	Уровень расплава – 15…30 мм
↓	
Формирование первичных грубых волокон фильерным питателем и	190 фильер диаметром – 2…2,2 мм Температура питателя – 1300…1320 ºС Ток перв. обм. трансформатора – 46…53 А
их непрерывное вытягивание	Скорость вытягивания – 3,5…6,5 м/мин Диаметр первичного волокна – 120…300 мкм
↓	
Раздув первичных волокон на штапельное волокно в камере раздува	Скорость газового потока – 300 ± 30 м/с Температура потока – 1550…1750 ºС Размер штапельного волокна – 0,5…3 мкм
↓	
Формирование волокнистого холста (по ширине, длине, толщине и плотности) на приемо-формирующем барабане или конвеере	Толщина холста – 100…150 мм Плотность холста – 15…30 кг/м^3

Рис.1 Последовательность технологических операций и параметров производства БСТВ

© В.П. Стяжкин, П.П. Подейко, 2015

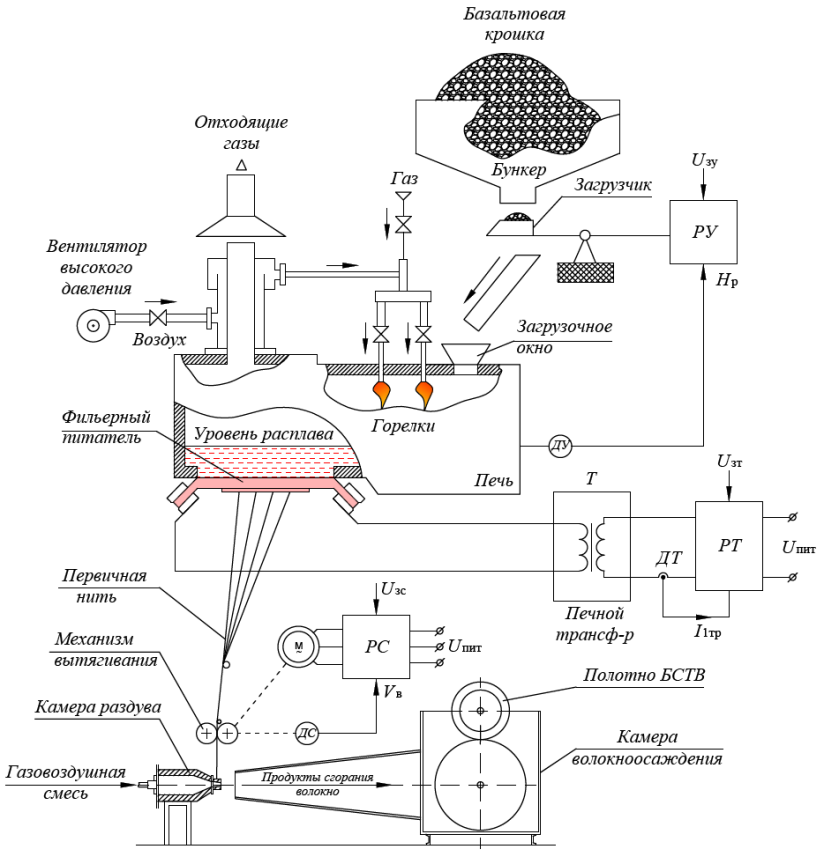


Рис.2 Функциональная схема установки по производству БСТВ

В производстве БСТВ до недавнего времени основными задачами усовершенствования технологического процесса считались повышение производительности установки и улучшение качества волокна, при этом уменьшению энергозатрат на производство единицы продукции отводилась второстепенная роль.

Уровень автоматизации технологического процесса производства БСТВ не позволяет пока обеспечить одномоментное эффективное решение этих задач. Это отчасти объясняется тем, что установка по производству БСТВ при кажущейся внешней простоте, как объект управления, представляет собой сложную нелинейную систему с перекрестными зависимостями технологических параметров, а формирование контуров регулирования этих параметров усложняет синтез САР в ее классическом виде.

В данной работе предлагается один из путей формирования АСУ ТП производства БСТВ, выделяющий контуры регулирования технологических параметров с наибольшим весовым коэффициентом и связывающий эти параметры с электрическими переменными системы управления установкой по производству БСТВ.

Для определения этих контуров регулирования проведем анализ влияния основных технологических параметров на производительность установки, качество волокон и удельные интегральные энергозатраты при производстве БСТВ. При анализе не рассматриваем начальную и конечную технологические операции производства БСТВ, такие как подготовка шихты (базальтовой крошки) и формирование волокнистого холста. Их успешное выполнение зависит, в основном, от глубины проработок технологии изготовления БСТВ химиками-технологами и квалификации персонала производства БСТВ [3,4].

Формирование волокна БСТВ, в первую очередь, зависит от свойств (качества) расплава [1-4]:

- химической однородности (неоднородность по вязкости приводит к обрывности волокон);
- термической однородности (перегретые и переохлажденные участки в расплаве вызывают неоднородности по вязкости, так как температура и вязкость расплава взаимосвязаны);
- отсутствие твердых и газовых включений (пузырьки и твердые включения (камни) вызывают обрывность волокон и их ломкость);
- оптимальная вязкость (чем ниже температура, при которой достигается оптимальная вязкость, тем больше срок службы волокнообразующих узлов, экономичнее процесс волокнообразования);
- отсутствие кристаллизации (в интервалах температур, при которых достигается рабочая вязкость, не должна проходить кристаллизация расплава, так как это приводит к обрывности волокон).

Плавление шихты и образование расплава производится в плавильной печи (рис. 2), которая состоит из загрузочной, топочной, плавильной и выработочной частей, объединенных в один каркас [2,4].

В плавильной части печи формируется расплав (диапазон поддержания технологических параметров температуры и уровня расплава указаны на рис.1).

В выработочной части печи, совмещенной с фильерным питателем, готовится расплав к выработке, то есть формируется расплав до рабочей вязкости его истечения путем регулирования температуры разогрева фильер.

В загрузочной части обеспечивается равномерная загрузка печи шихтой для поддержания нормального процесса плавления и заданной непрерывной выработки (истечения) волокнистого материала. От его работы зависит стабильность температурного режима плавления и уровень расплава.

В топочной части печи обеспечивается непрерывная подача газа и воздуха, формируется факел пламени. Для улучшения условий теплопередачи применяется вертикальное направление факела, позволяющее увеличить конвективную составляющую теплообмена. Это позволяет при непрерывной бескучевой подаче шихты на поверхность расплава, увеличить удельный объем расплава и уменьшить удельный расход тепла. При этом интенсивное плавление происходит теплопередачей от пламени конвективным и лучистым теплом, а также от раскаленного расплава через развитую поверхность частиц шихты, попадающих в зону температурного максимума.

Жаростойкий фильерный питатель (рис.2) формирует непрерывные первичные волокна из расплава. Вторичный ток трансформатора (до 2000А), протекая по фильерам питателя, разогревает их до температуры 1300-1320°С, необходимой для непрерывного истечения расплава. Чем выше температура питателя, тем интенсивнее истечение расплава из фильер, но при этом усиливается явление смачиваемости расплавом поверхности фильер, делающее невозможным процесс образования первичных волокон. Даже при оптимальных температурах нагрева фильер и расплава происходит постепенное заплывание его расплавом, требующее периодической очистки [4].

Расплав выходит из фильерного питателя под действием собственного веса, поэтому вторым фактором стабильности процесса получения первичных волокон является уровень расплава. Свойства расплава базальта (высокая температура кристаллизации, малый интервал рабочих температур) делают процесс получения первичных волокон очень чувствительным к изменениям параметров режима, и поэтому уровень расплава имеет важнейшее значение. При малом уровне расплава может быть недостаточным гидростатический напор, и снижается дебит расплава через фильеры. При увеличении уровня дебит расплава увеличивается, но при этом нарастает вязкость расплава, возникает температурная неоднородность и кристаллизация [4,5].

Механизм вытягивания (рис.2) участвует в формировании первичных волокон и подает образованные на фильерном питателе волокна на раздув. Основным рабочим органом механизма вытягивания является пара обрезиненных валиков, посредством которых равномерно распределенные по их длине первичные волокна направляются в сопло горелки раздува. От скорости вращения приводных валиков, правильности расположения их относительно входной щели сопла горелки раздува, а также от качества поверхности валиков зависит качество раздува волокна [4,5].

Производительность процесса формирования первичных волокон не зависит от скорости вращения валиков, а только от дебита расплава через фильеры под действием его веса. Но в зависимости от скорости вращения валиков из этого дебита можно получить первичное волокно большего или меньшего диаметра.

При производстве БСТВ основные энергозатраты: природный газ и сжатый воздух для плавления исходного сырья (базальтовой крошки) и для плавления первичных базальтовых нитей при получении элементарных волокон; электрическая энергия для подогрева фильерного питателя и приведения в действие электродвигателей узла вытягивания нитей и приемного барабана; технологическая вода для охлаждения отдельных узлов оборудования.

Оптимизируя технологический процесс производства БСТВ, разработчики-технологи чаще направляют свои действия на усовершенствование плавильной печи и фильерных питателей, их конструкций, замену материалов для изготовления фильерных питателей на дешевые жаростойкие материалы, усовершенствование горелок раздува, на новые методы и методики контроля и формирования составляющих процесса получения БСТВ [2,5,6]. Но мало кто обращал внимание на оптимизацию управления существующих установок по производству БСТВ, используя контроль и согласованное управление в рамках АСУТП наиболее значимых весомых технологических параметров, которые дают наибольший эффект при решении задач повышения производительности установки, улучшения качества волокна и уменьшения энергозатрат.

В установках БСТВ предусмотрены обычно следующие основные системы ручного управления и визуального контроля технологических параметров: давление газа и воздуха, поступающих в плавильный агрегат; температура и уровень расплава в печи; ток первичной обмотки печного трансформатора нагрева фильерной пластины и связанная с ним температура фильеры; скорость вращения вытяжных валков; давление газа и воздуха камеры раздува. Если по параметрам потоков газа и воздуха в плавильном агрегате и камере раздува установить современные датчики и регулирующие механизмы, то можно на базе специализированных контроллеров соотношения газ-воздух эффективно решить задачу уменьшения энергозатрат.

Проведенный анализ показывает, что наиболее весомыми параметрами технологии производства БСТВ являются температура и уровень расплава, температура фильерных пластин и скорость вращения вытяжных валков. Поэтому можно формировать ядро АСУТП с соответствующими контурами регулирования и FUZZY LOGIC контроллером, реализующим оптимальное управление установкой по производству БСТВ по выбранным критериям – производительности установки и качеству волокна. Очевидно, что физические величины технологических параметров должны быть преобразованы в электрические сигналы, их связи - формализованы в виде таблиц значений или функциональных графиков, а критерии оптимальности иметь четкую числовую ха-

рактеристику. Пример формирования ядра АСУТП производства БСТВ показан на рис. 3.

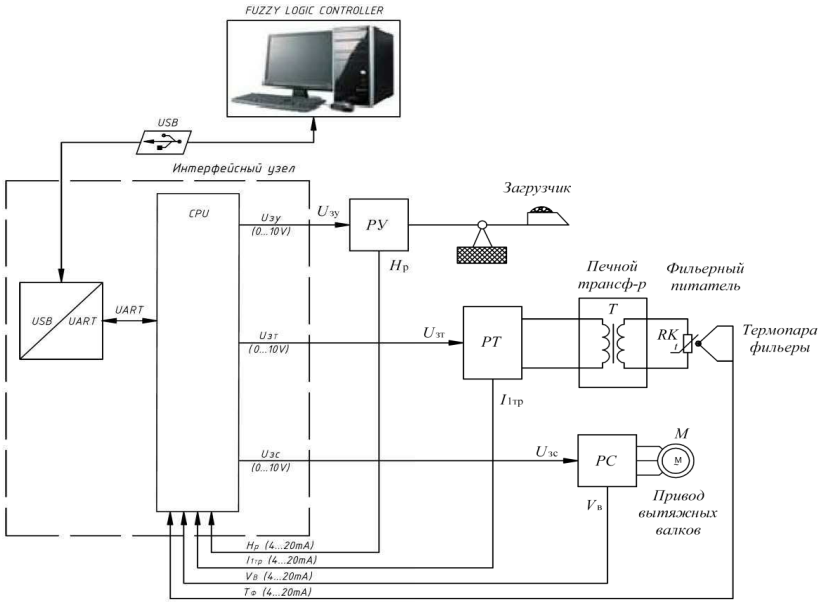


Рис. 3 Пример функциональной схемы формирования ядра АСУТП производства БСТВ

Анализ также показывает, что процессу производства БСТВ присущ существенный отрицательный, с точки зрения теории управления, фактор – нестационарность описания объекта, взаимное влияние управляемых переменных состояния, задействованных в разных независимых контурах регулирования (например, контур нагрева фильероной пластины и механизм вытягивания первичных волокон связаны с нагревом базальтового расплава и его уровнем в печи).

Эта проблема решается как программно-аппаратными средствами ядра АСУТП, так и применением простых средств ограничения взаимного влияния параметров. Формирование токовой системы питания фильерного питателя нивелирует отрицательное действие изменений сопротивления фильеры вследствие флуктуаций, возникающих при формировании расплава и изменений характеристик питающей электрической сети [7,8].

Список литературы: 1. *Волынский А.К.* Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства / *А.К. Волынский и др.* – К.: Научная мысль, 1980. – С.54-81. **2.** *Полевой П.П.* Исследования процесса плавления и раздува первичных волокон высокотемпературным газовым потоком / *П.П. Полевой, В.И. Родионов, Б.И. Кирх* // ИЭД НАН Украины. – 1981. – 28 с. **3.** *Новицкий А.Г.* Базальтовое сырьё. Технология выбора для производства волокон различного назначения / *А.Г. Новицкий, В. Л. Мазур* // Хімічна промисловість України. – 2003.– №2. – С.47-52. **4.** Короткий курс навчання операторів, налагоджувальників, майстрів виробництва базальтових супертонких штапельних волокон (БСТВ) / Система управління якістю. Інструкція // ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів», 2014. – 47 с. **5.** *Федоткин И.М.* Влияние технологических параметров на диаметр и качество базальтового волокна / *И.М.Федоткин и др.* // Химическое машиностроение. – 1987.- №46.– С. 33-39. **6.** *Шиляев А.И.* Методика контроля процесса получения базальтового волокна дуплекс-способом / *А.И. Шиляев, К.П. Широков* // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – №2(16). – С. 77-81. **7.** *Стяжкин В.П., Подейко П.П.* Тиристорные регуляторы тока в электротермических установках плавления и модификации материалов// Праці ІЕД НАН України. – Київ, 2008. – № 20.– С.59. **8.** *Стяжкин В.П., Подейко П.П.* Адаптивная система регулирования тока трансформатора в электротермических установках плавления // Технічна електродинаміка/ Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – Київ, 2009. – Частина 5. – С. 109-110.

Bibliography (transliterated): 1. Volynskiy A.K. *"Osnovy tekhnologii polucheniya bazal'tovykh volokon i ikh svoystva."* Kiev: Nauchnaya mysl', 1980. 54-81. Print. **2.** A. G. Novitskiy., V. L. Mazur. *"Bazal'tovoe syr'ye. Tekhnologiya vybora dlya proizvodstva volokon razlichnogo naznacheniya. "* Khimichna promislovist' Ukrainy. No 2. 2003. 47-52. Print. **3.** *"Korotkyy kurs navchannya operatoriv, nalahodzhuval'nykiv, maystriv vyrobnytstva bazal'tovykh supertonkykh shtapel'nykh volokon (BSTV). Systema upravlinnya yakistyu. "* Instruktsiya VKP Chernivets'kyy zavod teploizolyatsiynykh materialiv. 2014. 47. Print. **4.** Polevoy P.P. and V.I. Rodionov, B.I. Kirkh *"Issledovaniya protsessa plavleniya i razduva pervichnykh volokon vysokotemperaturnym gazovym potokom* / IED NAN Ukrainy 1981. 28. Print. **5.** Fedotkin I.M. *"Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na diametr i kachestvo bazal'tovogo volokna."* Khimicheskoe mashinostroenie. No 46. 1987. 33-39. Print. **6.** Shilyaev A.I. and K.P. Shirokov. *"Metodika kontrolya protsessa polucheniya bazal'tovogo volokna dupleks-sposobom."* Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. No2(16). 2010. 77-81. Print. **7.** Styazhkin V.P., Podeyko P.P. *"Tiristornye regulyatory toka v elektrotermicheskikh ustanovkakh plavleniya i modifikatsii materialov"*. Pratsi IED NAN Ukrainy. Kyyiv. No 20. 2008. 59. Print. **8.** Styazhkin V.P., Podeyko P.P. *"Adaptivnaya sistema regulirovaniya toka transformatora v elektrotermicheskikh ustanovkakh plavleniya."* Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyy vypusk *"Sylovaelektronika ta enerhoefektyvnist'"*. Kyyiv. Chastyna 5. 2009. 109-110. Print.

Поступила (received)

УДК 622.625.28-83

О. Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, «КНУ», Кривой Рог;
Д. А. МИХАЙЛИЧЕНКО , ст. преподаватель, «КрНУ им. М. Остроградского», Кременчуг

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Введение. Пуск мощных синхронных электрических двигателей (СЭД) имеющих большие моменты инерции, как правило, производится при помощи пусковых устройств (ПУ), в т.ч. на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии [1-3].

Улучшить точность регулирования скорости и быстродействие при пуске СЭД с сохранением и улучшением энергетики можно с помощью замкнутых систем регулирования [4].

Последние варианты ПУ позволяют достичь достаточной эффективности процесса пуска путём достижения требуемых выходных электрических параметров. В значительной степени это дополняется применением замкнутых систем регулирования [4,5] .

Вместе с тем, использование возможно достижимого потенциала эффективности процесса пуска комплекса: ПУ – СЭД не может быть достигнуто без создания и реализации соответствующего алгоритма поведения данного комплекса. В свою очередь, данный алгоритм в своей комплексности не може быть достаточно реализован в практику работы без наличия достаточного математического обеспечания, в т.ч. безадекватной математической модели синхронного двигателя (СД), оценкой и выбором наиболее подходящего из возможных способа формирования выходных форм кривых тока и напряжения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) при широтно-импульсной модуляции (ШИМ), синтезом системы регулирования и анализом переходных процессов в электротехническом комплексе управляемого запуска [6].

Цель работы: Анализ переходных процессов при управлении пуском СД с использованием замкнутой системы регулирования на базе модели ШИП и математической модели синхронного двигателя построенной в координатах тока статора I_s и потокосцепления статора ψ_S [7,8].

Материалы исследования. Для исследования использована математическая модель СЭД в основу построения которой положена обобщенная система дифференциальных уравнений СЭД Парка – Горева в векторной форме записи [5,7,8].

Для реализации ШИМ управления автономным инвертором авторами использован алгоритм формирования пространственного вектора напряжения [9]. При моделировании приняты параметры серийного СД ДС260/44-36УХЛ4. Решение поставленной задачи проводилось в программной среде Фортран.

Структурная схема частотного регулирования скорости и стабилизации магнитного потока представлена на (рис.1).

Замкнутый контур регулирования обеспечит повышение быстродействия и точность регулирования скорости. Контур с обратной связью, воздействующий на напряжение синхронного двигателя, предназначен для поддержания необходимой перегрузочной способности. При этом осуществляется стабилизация магнитного потока.

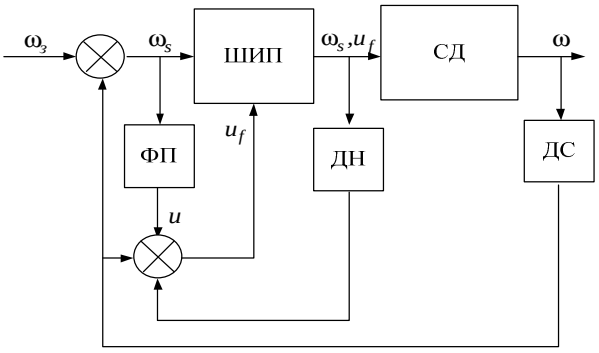


Рис. 1 – Структурная схема замкнутой системы регулирования по частоте вращения и напряжению

Рассмотрим и сравним процессы в системе с трапецеидальным фазным напряжением и в системе с синусоидальным фазным напряжением. Рассмотрим систему с контурами регулирования тока и напряжения при синусоидальной форме фазного напряжения с коэффициентами датчика частоты вращения и напряжения $K_{OC} = k_{ДН} = 0,2$ и $K_{OC} = k_{ДН} = 0,4$.

Переходный процесс по частоте вращения приведен на (рис.2.)

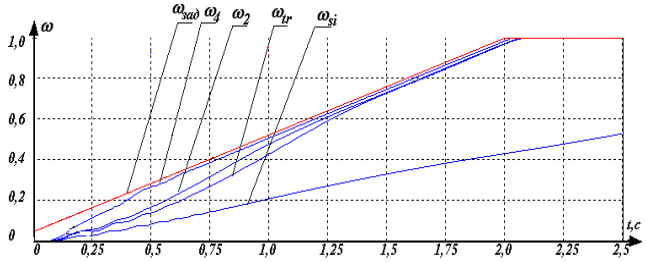


Рис. 2 – Переходный процесс по частоте вращения

© О. Н. Синчук, Д. А. Михайличенко, 2015

На (рис.2) приняты следующие обозначения: $\omega_{зад}$ – заданная частота вращения; ω_{tr} – частота вращения при трапецеидальном напряжении разомкнутой системы; ω_{si} – частота вращения при синусоидальном напряжении разомкнутой системы; ω_4 – частота вращения замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC}=0,4; ω_2 – частота вращения замкнутой система регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} =0,2.

По результатам расчета видно, что наиболее точно отрабатывает заданное воздействие система регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} =0,4. После достижения времени $t=1,25c$ графики переходных процессов замкнутых систем регулирования при трапецеидальном напряжении практически одинаковы. Наибольшее расхождение до 50% наступает при $t=0,5c$.

На (рис.3) приведены переходные процессы по частоте вращения ω и соответственно по моменту M для исследуемых систем. Максимальные пиковые моменты присутствуют в замкнутой системе и превышают пиковые моменты других систем на 20%.

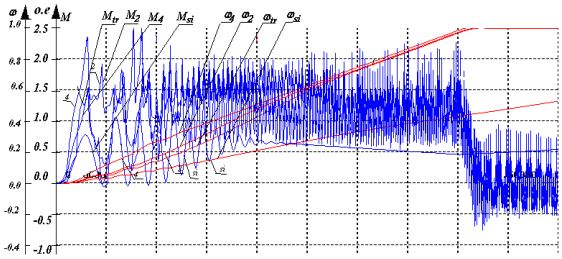


Рис.3 – Переходные процессы по частоте вращения ω и моменту M синхронного двигателя

На (рис.3) приняты соответствующие обозначения: M_{tr} – момент при трапецеидальном напряжении разомкнутой системы; M_{si} – момент при синусоидальном напряжении разомкнутой системы; M_4 – момент замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} = 0,4; M_2 – момент в замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} = 0,2.

Графики переходных процессов по частоте вращения и тока статора приведены на (рис.4). Пики тока в замкнутых системах регулирования отличаются не большее чем на 10%.

Определение содержание высших гармонических составляющих в расчетных токах статора позволит определить величину потребляемой электроэнергии и параметры выходного фильтра широтно-импульсного преобразователя частоты, что значительно улучшит тепловой режим синхронного двигателя.

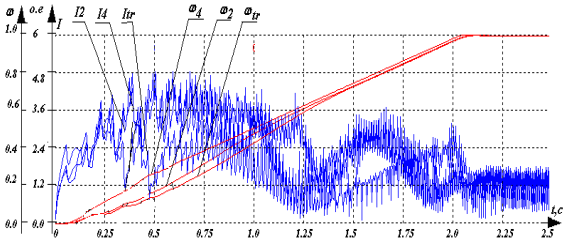


Рис. 4 – Переходные процессы по частоте вращения ω и току статора I синхронного двигателя

На (рис.4) приняты соответственно следующие обозначения: I_{tr} – частота вращения и момент при трапецеидальном напряжении разомкнутой системы; I_4 – момент замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} = 0,4; I_2 – момент замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} = 0,2.

Окончательный выбор системы и настройки коэффициентов следует производить после анализа энергетических характеристик синхронного двигателя, которые приведены на (рис.5.)

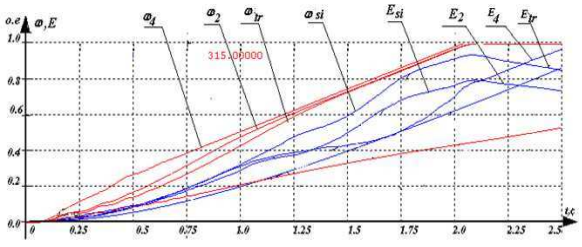


Рис. 5 – Переходные процессы по частоте вращения и потреблению электроэнергии синхронным двигателем

На (рис.5) приняты обозначения: E_{tr} – потребляемая электроэнергия при трапецеидальном напряжении разомкнутой системы; E_{si} – потребляемая электроэнергия при синусоидальном напряжении разомкнутой системы; E_4 – потребляемая электроэнергия замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} = 0,4; E_2 – потребляемая электроэнергия замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи K_{OC} = 0,2.

Переходные процессы замкнутой системы регулирования для синхронного двигателя с гладким ротором без пусковой обмотки для оптимального коэффициента обратной связи $K_{OC}=0,2$ при синусоидальной трапециедальной и ступенчатой модуляции выходного напряжения, приведенные на (рис.6. а), б), в)).

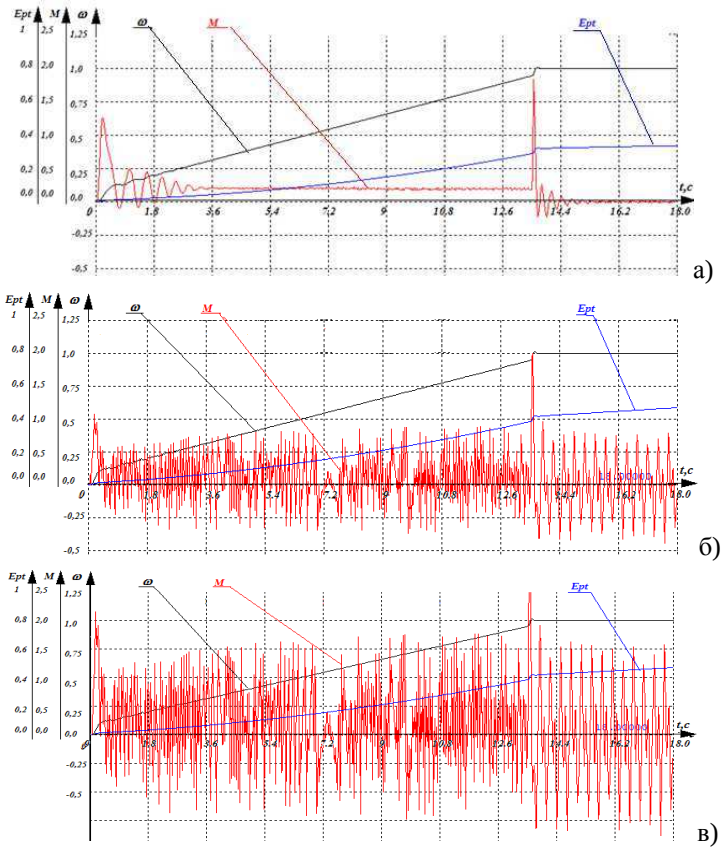


Рис. 6 – Линейный пуск двигателя со стабилизацией потокосцепления и синусоидальной модуляцией фазного напряжения (а), трапецеидальной модуляцией фазного напряжения (б), ступенчатой модуляцией фазного напряжения (в)

Пусковые характеристики различаются в зоне низких скоростей вращения ротора. При этом, более гладкое изменение момента двигателя имеет место при синусоидальной модуляции (рис. 6 а).

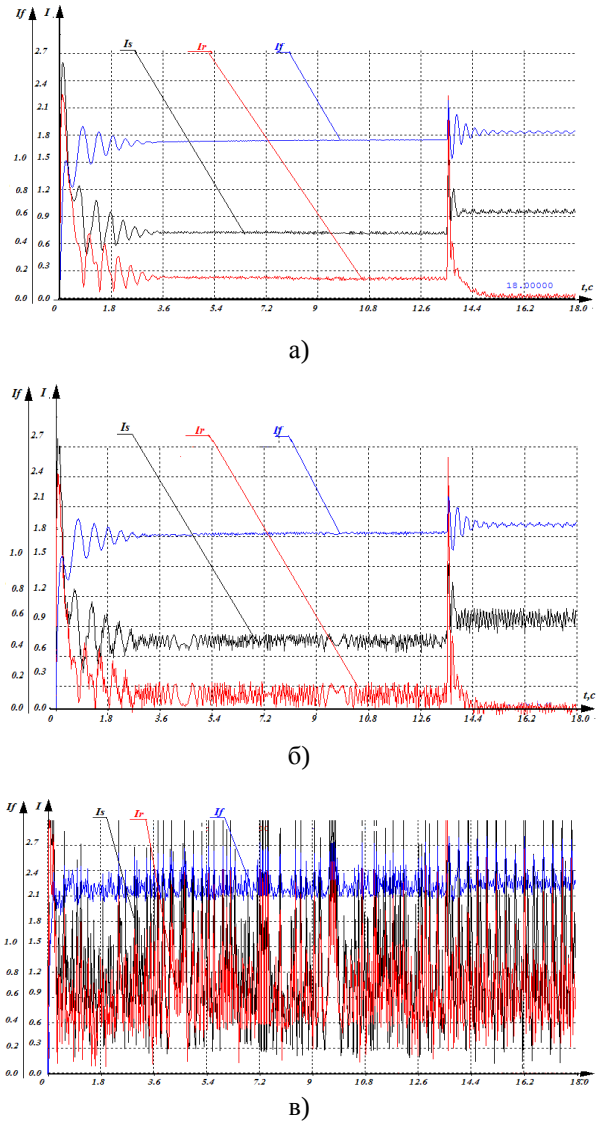
Следует отметить особенность замкнутых систем со стабилизацией магнитного потока (рис. 7 а), б), в)) заключающуюся в увеличении пиковых амплитуд токов и потокосцеплений, следовательно, и момента синхронного двигателя при трапецеидальной и ступенчатой модуляции на 100-200% по сравнению с синусоидальной модуляцией фазного напряжения.

Выводы. Анализ результатов моделирования процесса пуска СЭД с использованием САР показывает, что за время пуска двигателя в течение =2,5с потребление электроэнергии на 10% меньше в замкнутой САР с коэффициентом обратной связи K_{OC}=0,2, чем при коэффициенте K_{OC}=0,4 и трапецеидальной форме кривой напряжения.

По результатам моделирования следует считать оптимальной систему с замкнутой САР по частоте вращения и напряжению с коэффициентом обратной связи K_{OC}=0,2 и синусоидальным фазным напряжением.

Список литературы: 1. Черный А.П., Гладарь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280с.
2. Tihanyi, L. EMC in Power Electronics / L. Tihanyi. – N.Y.: IEEE Press, 1995. – 402 с. **3.** В.І. Сенько, М.В.Панасенко, Є.В. Сенько, М.М. Юрченко, Л.І.Сенько, В.В.Ясінський. Електроніка і мікросхемотехніка /У4-х т.Том 4. У2-х кн. – Силова електроніка: Підручник / За ред..В.І.Сенька. – Київ: Каравела, 2013. – 956 с. **4.** Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов / В.М. Терехов, И.О. Осипов – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 680с. **5.** Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с., ил. **6.** *Синчук И.О.* Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления./ *Синчук И.О., Чернышев А.А., Киба И.И., Пасько О.В., Ключка О.Е., Мельник О.Е.*/ Учебное пособие. Под редакцией проф. Синчука О.Н. – Кременчуг, Вид. Щербатих О.В., 2008. – 88с. **7.** Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224с., ил. **8.** Синчук О.Н. Захаров В.Ю., Михайличенко Д.А. Моделирование пуска неявнополюсного синхронного электрического двигателя // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Київ, «Техніка», 2012. – Вип. №08(84). – с.24-30. **9.** Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер// – Екатеринбург: УРО РАН.- 2000. – 654с.

Bibliography (transliterated): 1. Chorniy A.P., Gladar A.I., Osadchuk Yu.G. Kurbanov I.R. Voshun A.N. Puskovyie sistemyi nereguliruemyih elektroprivodov: Monografiya [*Starting systems of the unregulated electric drives: The monograph*] – Kremenchug: Scherbatykh A.V., 2006. – 280p. (In Russian). **2.** Tihanyi, L. EMC in Power Electronics / L. Tihanyi. – N.Y.: IEEE Press, 1995. – 402 p. **3.** V.I. Senko, M.V.Panasenko, E.V. Senko, M.M. Yurchenko, L.I.Senko, V.V.Yasinskiy. Elektronika i mikroshemotehnika / U4-h t.Tom 4. U2-h kn. – Silova elektronika: PIidruchnik / Za red..V.I.Senka. – Kiyiv: Karavela, 2013. – 956 p. (In Ukrainian). **4.** Terekhov V. M. Sistemyi upravleniya elektroprivodov: Uchebnik dlya vuzov [*Control systems of electric drives*] / Terekhov V. M., I.O. Osipov – M.: Izd. tsentr «Akademiya», 2006. – 680 p. (In Russian). **5.** Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov [*The electric drive theory: the manual for higher education institutions*] – M.: Energoatomizdat, 1985. – 560p. (In Russian). **6.** *Sinchuk I.O.* Semiconductor converters of the electric energy in structures of the electric drives. The circuitry and principles of its management./*Sinchuk I.O., Chernyshev A.A., Pas'ko O. V., Klyuchka O. E., Kyba I.I., Melnyk O.E./Manual. Under the edition by prof. Sinchuk O.M.* – Kremenchug,. Shcherbatykh O. V., 2008. – 88p. (In Russian). **7.** Veynger A.M. Reguliruemyiy sinhronnyiy elektroprivod [*Adjustable synchronous electric drive*] – M.: Energoatomizdat, 1985. – 224p. (In Russian) **8.** Sinchuk O.M., Zakharov V.Y., Mikhaylichenko D.A. Modelirovanie puska neyavnopolyusnogo sinhronnogo elektricheskogo dvigatelya [*Modelling of the not salient pole synchronous electric motor's start-up*] // *Electrotechnical and computer systems. Scientific-technical journal*. – Kyiv, "Tekhnika", 2012. – Ed. No. 08(84). – page 24-30. Print. (In Russian). **9.** Shreyner R. T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremen-nogo toka s poluprovodnikovyimi preobrazo-vatelyami chastotyi [*Mathematical modeling of the alternating current electric drives with frequency semiconductor converter*] /R.T. Shreyner//– Yekaterinburg: URO RAN. - 2000 . – 654p. (In Russian).



а)

б)

в)

Рис.7 – Переходный процесс токов при линейном пуске двигателя замкнутой системы - синусоидальной модуляцией фазного напряжения (а), трапецеидальной модуляцией фазного напряжения (б), ступенчатой модуляцией фазного напряжения (в)

Поступила (received) 20.08.2015

УДК: 621.31

В. В. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, доц. НМетАУ;
А. В. НИКОЛЕНКО, канд. техн. наук, доц. НМетАУ;
В. П. ИВАЩЕНКО, д-р техн. наук, проф. НМетАУ

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЦЕХОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Постановка задачи моделирования цеховой электрической сети. Наличие некачественной электроэнергии в цеховых сетях промышленных предприятий приводит к ускоренному физическому старению применяемого электрооборудования и повышению риска возникновения аварийных ситуаций на производстве. Своевременная оценка показателей качества электроэнергии и обеспечение соответствующих режимов эксплуатации электрооборудования в конкретных условиях является важной научно-практической задачей.

Решение данной задачи предполагает проведение большого количества экспериментов при различных показателях качества электроэнергии, режимах работы электрооборудования и способах защиты последнего от некачественного электропитания. Однако, проведение указанных экспериментов на реальном объекте привело бы:

– к большим временным затратам вследствие необходимости ожидания ситуаций, когда электроэнергия в электрических сетях не будет соответствовать показателям качества не говоря уже о потере ресурса электрооборудования;

– к финансовым затратам вследствие необходимости приобретения различных дорогостоящих устройств для защиты электрооборудования и восстановления качества электроэнергии в сетях;

– к угрозам возникновения аварийных ситуаций вследствие снижения показателей надёжности электрооборудования, работающего в рассматриваемых условиях.

Значительно ускорить и упростить процесс экспериментального исследования позволяют вычислительные исследования, основанные на построении имитационной системы и использовании для проведения на ЭВМ статистических испытаний [1]. От обычных экспериментальных этот метод отличается тем, что при его применении воздействиям подвергается не сам объект, а его имитационная модель, реализованная на ЭВМ. При этом взаимодействие с последней осуществляется подобно тому, как это делалось бы с исследуемым объектом, а результаты моделирования обрабатываются и испытываются так же, как если бы это были данные натурных испытаний [2].

Исходя из особенностей функционирования АД в электрической сети с некачественной электроэнергией, его электромагнитная модель должна быть дополнена подсистемой имитации случайных изменений показателей качества электроэнергии. Последняя же может быть реализована блоками формирования линейных напряжений в электросетях цеха и расчета указанных показателей.

Вопросы математического моделирования АД были рассмотрены в [3-7]. Разработка же блока формирования случайных изменений линейных напряжений в электрической сети цеха представляет собой самостоятельную задачу и рассматривается отдельно в данном разделе. Она предполагает определение: структуры генератора указанных случайных изменений; статистических закономерностей последних и, как следствие, параметров синтезируемого генератора.

Разработка структуры генератора случайных изменений напряжений в электрических сетях предприятий. Сложность непосредственной имитации линейных напряжений в сети с некачественной электроэнергией заключается в том, что все гармонические составляющие имеют фиксированные частоты их колебаний, на которые лишь накладываются случайные изменения амплитуд и начальных фаз. При этом последующий анализ энергетических показателей АД по его математической модели уже предполагает предварительное разложение указанных напряжений на эти составляющие. Отсюда следует, что генерировать целесообразнее не случайные последовательности напряжений, а амплитуды и начальные фазы присутствующих в них гармоник, статистические закономерности изменения которых должны быть получены предварительно.

Один из возможных вариантов структуры генератора случайных изменений линейных напряжений, учитывающий указанное выше, представлен на рис. 1 [8]. Здесь: Γ_γ – генератор «белого» шума (значений равномерно распределённой некоррелированной случайной величины, соответствующих моментам времени $\Delta t\gamma$, в интервале 0;1); $П_{U_{mABiy}}, П_{U_{mBCiy}}$ – преобразователи законов распределений амплитуд $i = \overline{1,n}$ – гармоник линейных напряжений U_{mAB} и $U_{mBC,}$ соответственно; $П_{\psi_{ABiy}}, П_{\psi_{BCiy}}$ – преобразователи законов распределений начальных фаз $i = \overline{1,n}$ – гармоник указанных напряжений U_{AB} и U_{BC}; $Ф_{U_{mABiy}}, Ф_{U_{mBCiy}}$ – фильтры, формирующие коррелированные амплитуды гармоник линейных напряжений U_{AB} и $U_{BC,}$ соответственно; $Ф_{\psi_{ABiy}}, Ф_{\psi_{BCiy}}$ – фильтры, формирующие коррелированные начальные фазы гармоник этих же напряжений; $\tau_{(U_{mAB} \to U_{mBC})i}$ - смещение амплитуды i – гармоники линейного напряжения U_{BC} относительно i - гармоники линейного напряжения U_{AB} по оси τ, определяемое по их взаимно корреляционной функции; $\tau_{(\psi_{AB} \to \psi_{BC})i}$ - смещение начальной фазы i - гармоники линейного напряжения U_{BC} относительно начальной фазы i - гармоники линейного напряжения U_{AB} по оси τ, определяемое по их взаимокорреляционной функции.

© Кузнецов В.В., Николенко А.В., Иващенко В.П., 2015

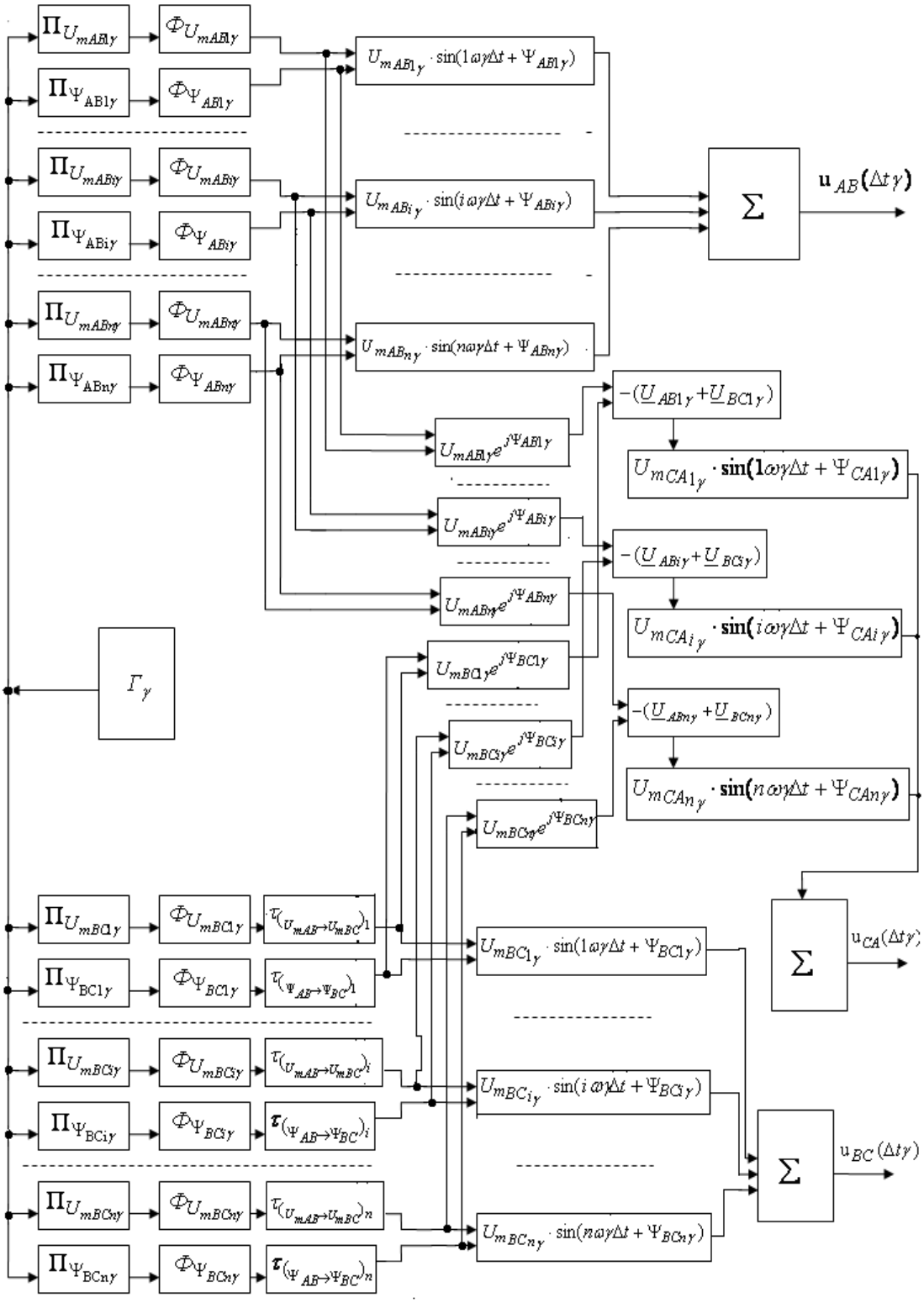


Рис.1 Генератор линейных напряжений

По воспроизведенным таким образом случайным изменениям амплитуд (U_{mABi},U_{mBCi},U_{mCAi}) и начальных фаз (ψ_{ABi} , ψ_{BCi} , ψ_{CAi}) гармонических составляющих линейных напряжений определяются их мгновенные значения. Затем последние алгебраически складываются в сумматорах, формируя случайные последовательности $u_{AB}(\Delta t\gamma)$, $u_{BC}(\Delta t\gamma)$ и $u_{CA}(\Delta t\gamma)$.

Как видно из рис. 1 первичный случайный процесс, представляющий собой некоррелированную распределенную по равномерному закону в интервале [0;1] случайную величину, воспроизводится соответствующим генератором. Существуют различные способы ее получения, среди которых программный метод генерирования псевдослучайных последовательностей (ПСП), самый удобный сейчас с практической точки зрения.

Современные ЭВМ в математическом обеспечении имеют встроенную функцию генерирования ПСП, используя которую и решают большинство задач моделирования сигналов.

В блоках $П_{U_{mABiy}}$, $П_{U_{mBCiy}}$ и $П_{\psi_{ABiy}}$, $П_{\psi_{BCiy}}$ выполняются преобразования первичного случайного сигнала к некоррелированным с заданными законами распределения. Выбор наиболее эффективного из них зависит от вида этих законов. Наиболее часто для выполнения данной операции используются методы нелинейного преобразования (обратной функции), кусочно-линейной аппроксимации закона распределения и метод исключения (Неймана) [9].

Формирующие фильтры $Ф_{U_{mABiy}}$, $Ф_{U_{mBCiy}}$, $Ф_{\psi_{ABiy}}$, $Ф_{\psi_{BCiy}}$ преобразуют некоррелированные случайные последовательности с заданными законами распределения в коррелированные соответствующие автокорреляционным функциям рассматриваемых величин. Одним из наиболее часто применяемых способов такого преобразования является нерекурсивная фильтрация входного ряда [9,10] :

$$y_n = \sum_{k=0}^{N} S_k x_{n-k}, \qquad (1)$$

причем $M[y_n] = 0$, а $M[y_n y_k] = \begin{cases} K_{n-k}, & |n-k| \le N; \\ 0, & |n-k| > N, \end{cases}$

где y_n – выходная коррелированная последовательность, x_n – входная некоррелированная последовательность, S_K – коэффициенты, K_{n-k} – значение корреляционной функции в точке $(n\text{-}k)\Delta$, M –математическое ожидание.

Случайное изменение линейного напряжения U_{BC} получается по его взаимно корреляционной функции с напряжением U_{AB}. Самый простой вариант решения этой задачи заключается в генерировании ПСП с заданным видом корреляционной функции и ее задержке на соответствующий временной интервал. Именно этим и объясняется наличие в структурной схеме блоков $\tau_{(U_{mAB}+U_{mBC})i}$ и $\tau_{(\psi_{AB}+\psi_{BC})i}$ [9]. Определение мгновенного значения линейного напряжения $u_{CA}(t)$ осуществляется по известному соотношению:

$$\underline{U}_{CA} = -(\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC}). \qquad (2)$$

Очевидно, что использование зависимости (2) приведёт к образованию систематической ошибки за счёт того, что значения линейного напряжения $\underline{U}_{CA}$ не будут соответствовать характерному для него закону распределения. Эта ошибка моделирования может быть устранена путём реализации случайно выбираемой последовательности (рандомизации) генерирования линейных напряжений.

Определение статистических закономерностей линейных напряжений в электрической сети цеха. Применение метода статистического моделирования для воспроизведения на ЭВМ линейных напряжений в электрической сети цеха предполагает, как указано выше, наличие информации о статистических закономерностях моделируемых величин. Получение последней связано с изучением случайных процессов – временных функций, реализации которых могут быть получены на основе проведения пассивных промышленных экспериментов.

В настоящее время регистрация необходимых данных осуществляется цифровыми устройствами контроля, которые формируют из непрерывного сигнала случайную последовательность с дискретностью Δt. Такое преобразование может привести к так называемому маскированию частот и, как следствие, к искажению статистических свойств сигнала. Поэтому при регистрации линейных напряжений в условиях конкретного цеха во избежание ошибок указанной маскировки исходный сигнал должен быть пропущен через фильтр низких частот.

Параметры этого фильтра выбираются из таких соображений. Если регистрируемые аналоговые линейные напряжения необходимо перевести в цифровую форму для последующего анализа, например, в диапазоне частот от $f_н = 0$ Гц до $f_в = 2000$ Гц, то частота фильтра должна быть определена в соответствии с выражением [11]:

$$f_{пф} = \frac{f_в}{0{,}8} = \frac{2000}{0{,}8} = 2500 \text{ Гц}. \qquad (3)$$

Тогда необходимый интервал дискретности Δt будет равен:

$$\Delta t = \frac{1}{2 f_{пф}} = \frac{1}{2 \times 2500} = 2 \times 10^{-4} \text{ с}. \qquad (4)$$

При выполнении квантования аналогового сигнала по уровню необходимо обеспечить его отношение к среднеквадратическому уровню шума не менее 80 дБ (10^4 по амплитуде). Это достигается при выполнении следующего условия:

$$2^n / 0{,}289 = 10^4, \qquad (5)$$

где n - число бит на один отсчет.

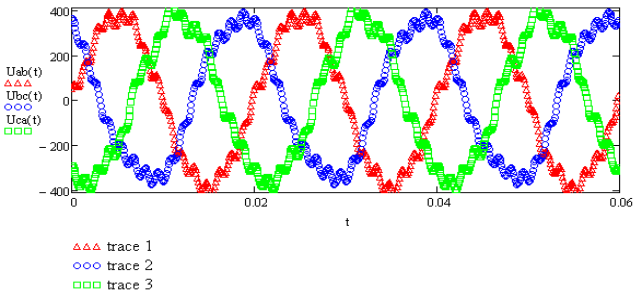


Рис. 2 Фрагмент линейных напряжений u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}, в электрической сети прокатного цеха № 1 ОАО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье)

Логарифмируя обе части этого равенства по основанию 10, получаем $0{,}301n = 3{,}46$, следовательно, $n = 11{,}5$. Поэтому нужное при квантовании аналогового сигнала число бит на один отсчёт равно 12. Из применяемых в промышленности устройств регистрации обеспечивает преобразование непрерывного сигнала с заданным отношением сигнал/шум обеспечивает например устройство «СКПЭП» (Система контроля параметров электроприводов), производства ООО НПП «ЦЭД».

В ходе проведения промышленного эксперимента в условиях прокатного цеха № 1 ООО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье) были получены реализации случайных последовательностей линейных напряжений длительностью 22…24 часа, фрагменты которых приведены на рис. 2 (а,б,в). На начальной стадии исследования полученных таким образом случайных последовательностей реализаций линейных напряжений необходимо выполнить их классификацию. Эта процедура позволяет определить класс процесса (стационарный, нестационарный); вид процесса (аддитивный, мультипликативный, аддитивно-мультипликативный) и тип детерминированной составляющей (линейный, экспоненциальный, периодический, периодический затухающий).

Правильно выполненная классификация во многом определяет корректность дальнейшей статистической обработки и обычно осуществляется по схеме, представленной на рис. 3. Здесь: МО – математическое ожидание, СП и НСП – стационарный и нестационарный случайные процессы соответственно, КФ – корреляционная функция. Как известно, линейные напряжения являются полигармоническими последовательностями и представляют особой сумму периодических сигналов с частотами, кратными ω = 314 рад/с. Учитывая, что гармонические составляющие сигнала, частоты которых выше 6-й гармоники на работу АД существенного влияния не оказывают [12], предлагается в дальнейшем анализе их не учитывать.

Нетрудно видеть (рис. 2), что полученные в ходе промышленного пассивного эксперимента реализации линейных напряжений нестационарны. Поэтому каждая реализация была предварительно визуально разделена на стационарные участки (отдельные временные фрагменты с «неизменной» формой сигнала). Каждый фрагмент полученный таким образом был пронумерован в порядке возрастания времени.

Пронумерованные случайные последовательности были проверены на стационарность среднего по критерию инверсий [11]. Учитывая, что последний является параметрическим, его применение не требует предварительного определения законов распределения случайных величин и их параметров. Для принятия нулевой гипотезы о том, что дрейфа среднего нет, достаточно использовать неравенство:

$$[\xi / \sigma_\xi^2] < \Xi\left(\frac{1+\nu_0}{2}\right), \qquad (6)$$

где: ξ - статистика критерия; σ_ξ^2 - дисперсия статистики ξ; Ξ - критическое значение критерия нулевой гипотезы; ν_0 - вероятность принятой нулевой гипотезы, если она верна (доверительная вероятность).

Величины ξ и вычисляются по формулам:

$$\xi = 1 - \frac{4\cdot\Omega_И}{\Omega_C\cdot(\Omega_C-1)}, \qquad (7)$$

$$\sigma_\xi^2 = \frac{2\cdot(2\cdot\Omega_C-5)}{9\cdot\Omega_C\cdot(\Omega_C-1)}, \qquad (8)$$

где: $\Omega_И$ – общее число инверсий;
Ω_C– число средних в проверяемой последовательности.

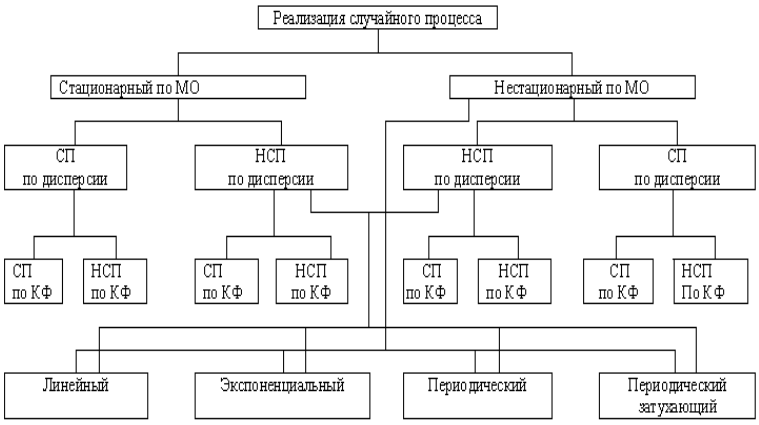


Рис. 3 Классификация случайных процессов

По результатам проверки были уточнены стационарные участки полученных в ходе промышленного эксперимента случайных последовательностей. Амплитуды и фазы гармонических составляющих линейных напряжений на стационарных участках считались неизменными.

Причём влияние каждого из них является случайным. Если одновременно работающих устройств электрооборудования больше шести, то исходя из условий центральной предельной теоремы теории вероятностей, правомерно выдвинуть гипотезу о нормальности распределения амплитуд и фаз гармонических составляющих по всем стационарным участкам случайных реализаций. Данная гипотеза проверена для всех гармоник линейных напряжений по критерию Шапиро-Уилка [13]. Параметры законов распределения сведены в табл.1-3.

Следует также иметь в виду, что изменения амплитуд и фаз гармонических составляющих линейных напряжений происходят через случайные временные интервалы. Анализ числовых характеристик временных интервалов и последующая проверка нескольких гипотез относительно законов распределения (нормального, экспоненциального, равномерного) по критерию Пирсона показали, что для их описания необходимо принять гипотезу об экспоненциальном законе распределения со средним значением $\Delta T_{ср}$=18 мин и интенсивностью $\lambda = 1/\Delta T_{ср} = 1/18$ мин$^{-1}$:

$$f(\Delta T) = \frac{1}{18} e^{-(1/18)\Delta T}. \qquad (9)$$

Для выявления тесноты связи между амплитудами (фазами) гармоник линейных напряжений одинаковых частот были рассчитаны автокорреляционные и взаимокорреляционные функции. При этом в качестве аргументов этих функций принят номер стационарного участка. Это позволило оценить статистическую зависимость амплитуд (фаз) гармонических составляющих при включении/выключении электрооборудования в цехе, происходящих в случайные моменты времени.

При аппроксимации рассчитанных кривых необходимо исходить из общих теоретических предпосылок возникновения случайных процессов. Если они неизвестны, тогда следует обратить внимание на общий характер корреляционных функций и сравнить их с типовыми кривыми. В этих случаях используют отдельные опорные точки, в которых экспериментальные значения и значения, рассчитанные по аппроксимирующему выражению, совпадают. В качестве опорных точек используют те, в которых ординаты экспериментальной кривой равны нулю [10].

Аналитические выражения законов распределения для описания исследуемых линейных напряжений, как правило, выбирают исходя из существа задачи. Так на параметры гармонических составляющих линейных напряжений оказывают суммарное воздействие одновременно работающие устройства электрооборудования.

Для аппроксимации автокорреляционной функции гармонических составляющих выбрана типовая кривая, которая описывается аналитическим выражением вида:

$$R(i)=\sigma^2 e^{-j\cdot i}\cos(\theta\cdot i) \quad (10)$$

где j и θ - коэффициенты кривой, σ - среднеквадратическое отклонение случайной функции.

Для аппроксимации взаимокорреляционной функции может быть использовано такое же выражение с учётом сдвига графика по оси абсцисс на m шагов:

$$R(i)=\sigma^2 e^{-j\cdot i}\cos(\theta\cdot i-m) \quad (11)$$

Коэффициенты j, θ и m рассмотренных функций для амплитуд и фаз линейных напряжений указанного цеха приведены в таблицах 4-11.

Числовые характеристики гармоник линейного напряжения

Таблица 1 - U_{AB}

Гармоника	Частота, рад/с	Амплитуда, В		Фаза, град	
		Среднее	Дисперсия	Среднее	Дисперсия
1	314	529,82	19,11	-	-
2	628	4,23	1,42	63	112
3	942	17,60	9,35	206	68
4	1256	1,51	0,06	92	85
5	1570	18,54	8,29	130	214
6	1884	3,05	0,27	290	152

Таблица 2 - U_{BC}

Гармоника	Частота, рад/с	Амплитуда		Фаза	
		Среднее	Дисперсия	Среднее	Дисперсия
1	314	532,09	17,36	-	-
2	628	3,98	1,56	78	102
3	942	19,13	8,19	235	49
4	1256	1,55	0,06	111	106
5	1570	16,77	6,44	114	210
6	1884	4,15	1,11	325	138

Таблица 3 - U_{CA}

Гармоника	Частота, рад/с	Амплитуда		Фаза	
		Среднее	Дисперсия	Среднее	Дисперсия
1	314	530,41	17,28	-	-
2	628	3,71	1,25	94	96
3	942	18,27	7,14	182	78
4	1256	1,50 0,06	83	56	
5	1570	16,01	7,66	165	183
6	1884	3,82	0,53	310	240

Цифровая реализация генераторов линейных напряжений в электрических сетях промышленных предприятий. При реализации генераторов напряжений в электрической сети необходимо иметь сигналы с нормальными законами распределения для моделирования амплитуд и фаз их гармонических составляющих, а также, экспоненциального закона для временных интервалов между включением/выключением электрооборудования.

В настоящее время практически любой пакет прикладных программ (например, MatLAB), предназначенный для решения подобных задач имеет встроенные функции, позволяющие моделировать случайные величины, в том числе и с нормальным законом. Для экспоненциального же закона наиболее целесообразно использовать метод обратных функций.

Суть данного метода заключается в следующем [14]. Известно математическое соотношение, связывающее случайные числа y_i с заданным законом распределения $f(y)$ и числа x_i, которые равномерно распределены в интервале [0,1]:

$$x=\int_{\infty}^{y} f(y)\,dy\ . \quad (12)$$

Если интеграл в правой части существует, тогда:

$$x=F(y)\ . \quad (13)$$

Далее определяется обратная функция $F^{-1}(x)$, которая и устанавливает зависимость, по которой генерируют числа:

$$y=F^{-1}(x)\ . \quad (14)$$

Равномерно распределённые числа в интервале [0;1] связаны с экспоненциальным законом следующим математическим выражением:

$$x=\int_{0}^{y}\frac{1}{18}e^{-(1/18)\cdot \%iDELTAT}\,dy\ . \quad (15)$$

Определим интеграл в правой части:

$$x=\int_{0}^{y}\frac{1}{18}e^{-(1/18)\cdot\Delta T}\,dy=-e^{-(1/18)\Delta T}\Big|_0^y=-e^{-(1/18)\Delta T}+1 \quad (16)$$

и обратную функцию:

$$\Delta T=-18\cdot\ln(1-x)\ . \quad (17)$$

Коэффициенты аналитических кривых автокорреляционных функций гармоник линейных напряжений

Таблица 4 - амплитуды

№ гармоники	Линейные напряжения					
	U_{AB}		U_{BC}		U_{CA}	
	J	θ	J	θ	J	θ
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
1	0,85	4,1	0,61	2,9	0,5	0,47
2	1,4	-	0,52	-	0,52	-
3	0,73	-	0,87	1,3	1,0	-
4	0,51	3,12	0,61	2,1	0,5	0,47
5	1,73	-	1,81	-	1,79	-
6	0,49	1,57	1,11	0,50	0,5	0,47

Таблица 5 - фазы

№ гармоники	Линейные напряжения					
	U_{AB}		U_{BC}		U_{CA}	
	J	θ	J	J	θ	J
1	-	-	-	-	-	-
2	0,87	5,2	0,72	3,80	0,79	4,30
3	0,52	-	0,60	-	0,57	1,20
4	0,61	-	0,56	0,50	0,69	-
5	1,20	1.10	0,97	1,80	0,83	1,5
6	0,67	0,8	0,52	0,95	0,49	0,88

Преобразование некоррелированных случайных величин в последовательность с заданной автокорреляционной и взаимокорреляционной функциями осуществляется по методу скользящих средних. Он основан на использовании зависимости вида [15]:

$$X(l)=\sum_{j=-\infty}^{\infty} S_j I(i-j)\,, \qquad (18)$$

где $X(l)$ - текущее l -значение центрированной случайной величины; S_j - вещественные или комплексные числа; I - единичная случайная последовательность.

При этом автокорреляционную функцию $R(i)$ можно определить следующим образом:

. (19)

В том случае, если $R(i)$ затухает, соотношения (18, 19) примут вид:

$$X(l)=\sum_{j=0}^{\eta_3} S_j \cdot I(l-j)\,, \qquad (20)$$

$$R(i)=\begin{cases}\sum_{j=0}^{\eta_3-|i|} S_{j+|i|}\cdot S_j, npu|i|\le\eta_3\\ 0, npu|i|>\eta_3\end{cases}, \qquad (21)$$

где η_3 - интервал затухания автокорреляционной функции случайного процесса.

На практике величину η_3 выбирают таким образом, чтобы выполнялось неравенство:

$$R(\eta_3)\ge 0{,}05\,R(0)\,. \qquad (22)$$

Определение же коэффициентов S_j сводится к решению (21) при изменении i от 0 до η_3, то есть к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} R(0)=S_0^2+S_1^2+\ldots+S_{\eta_3}^2\\ R(1)=S_1S_0+S_2S_1+\ldots+S_{\eta_3}S_{\eta_3-1}\\ \cdots\\ R(\eta_3-1)=S_{\eta_3-1}S_0+S_{\eta_3}S_1\\ R(\eta_3)=S_{\eta_3}S_0\end{cases} \qquad (23)$$

Последнее уравнений осуществлено в пакете прикладных программ MathCAD.

Значения $R(i)$ для цеховой сети ПАО «Днепроспецсталь» определены по аналитическим выражениям соответствующих автокорреляционных функций, при этом величины соответствующих коэффициентов для моделирования амплитуд и фаз гармонических составляющих приведены в таблицах 12-22.

На рис. 4 приведен укрупнённый алгоритм воспроизведения последовательностей линейных напряжений с заданными статистическими закономерностями.

Блок 1 загружает время моделирования T и массив , используемый для преобразования некоррелированных распределённых по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией случайных последовательностей в коррелированные. В блоке 2 осуществляется подготовка переменной k для последующих накоплений интервалов стационарных участков, в блоке 3 генерируются некоррелированные случайные последовательности.

В блоке 4 рассчитывается длительность текущего стационарного интервала моделирования случайных величин. Значение суммарной длительности стационарных участков подсчитывается в блоке 5. Как указывалось выше, снижение систематической ошибки моделирования линейных напряжений может быть уменьшено путём случайно выбираемой последовательности (рандомизации) генерирования амплитуд и фаз гармоник. Данная процедура реализуется в блоке 6. После этого рассчитываются значения параметров гармоник линейных напряжений (блоки 7,8). По полученным величинам определяются мгновенные значения гармоник (блок 10), а затем и самих линейных напряжений (блок 11), которые запоминаются в блоке 12. Затем проверяется длительность текущего суммарного времени моделирования (блок 13). Если оно меньше заданного T, то рассмотренная последовательность действий согласно алгоритму повторяется. В противном случае воспроизведение случайных последовательностей линейных напряжений заканчивается.

Коэффициенты аналитических кривых взаимокорреляционных функций гармоник линейных напряжений

Таблица 6 –амплитуды

Гармоника	$U_{AB/BC}$			$U_{AB/CA}$		
	J	θ	m	J	Θ	m
1	0,51	3,12	3	0,61	2,9	3
2	1,73	-	2	0,52	-	3
3	0,49	1,57	2	0,87	1,3	1
4	0,52	-	10,5	0,47	2	
5	1,0	-	2	0,52	-	2
6	0,5	0,47	1	0,87	1,3	2

Таблица 7 –амплитуды

Гармоника	$U_{BC/AB}$			$U_{BC/CA}$		
	J	θ	m	J	θ	m
1	0,87	1,3	3	0,52	-	2
2	0,61	2,1	3	1,0	-	2
3	1,81	-	2	0,85	4,1	3
4	0,87	1,3	1	1,4	-	1
5	0,61	2,1	2	0,87	1,3	1
6	0,5	0,47	3	0,61	2,1	2

Таблица 8 – амплитуды

Гармоника	$U_{CA/BC}$			$U_{CA/BC}$		
	J	θ	m	J	θ	m
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
1	0,52	-	2	1,4	-	2
2	0,61	2,1	2	0,73	-	3
3	1,81	-	3	1,79	-	3
4	1,0	-	1	1,73	-	2
5	0,87	1,3	3	0,61	2,1	2
6	0,51	3,12	3	0,49	1,57	3

Таблица 9 – фазы

Гармоника	$U_{AB/BC}$			$U_{AB/CA}$		
	J	θ	m	J	θ	m
1	0,56	0,50	1	0,50	0,69	2
2	0,97	1,80	3	0,52	-	2
3	0,87	5,2	3	0,61	-	2
4	0,83	1,5	2	0,60	-	1
5	0,49	0,88	1	0,56	0,50	1
6	1,20	1.10	1	0,67	0,8	1

Таблица 10 – фазы

Гармоника	$U_{BC/AB}$			$U_{BC/CA}$		
	J	θ	m	J	θ	m
1	0,69	-	2	0,60	-	2
2	0,83	1,5	2	0,79	4,30	2
3	0,49	0,88	3	0,57	1,20	1
4	0,56	0,50	1	0,87	5,2	1
5	0,97	1,80	2	0,52	-	2
6	0,52	0,95	2	0,52	0,95	3

Таблица 11 – фазы

Гармоника	$U_{CA/AB}$			$U_{CA/BC}$		
	J	θ	m	J	θ	m
1	1,20	1.10	2	0,87	5,2	3
2	0,67	0,8	3	0,52	-	3
3	0,60	-	1	0,97	1,80	2
4	0,56	0,50	2	0,52	0,95	1
5	0,79	4,30	2	0,61	-	3
6	0,57	1,20	3	0,56	0,50	2

Таблица 12 - Коэффициенты для моделирования амплитуд линейных напряжений первой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	0,95	3,537	0,634	0,93	-0,197	0,362	0,195	0,387	-0,051
S_1	1,91	-1,909	1,177	-0,53	-0,713	0,077	0,311	0,637	-0,006
S_2	1,83	0,969	1,939	2,84	2,571	2,458	-0,01	-0,002	0,049
S_3	-2,99	-0,458	2,447	2,72	1,015	0,98	-0,312	-0,637	0,166
S_4	1,52	0,243	1,804	1,03	-	-	0,194	0,386	0,361
S_5	-	-	-1,577	-	-	-	0,195	0,387	-0,051

Таблица 13 - Коэффициенты для моделирования амплитуд линейных напряжений второй гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	0,07	0,389	0,694	-0,051	-0,197	0,362	0,07	-0.022	0,93
S_1	0,02	-0,189	-0,166	-0,006	-0,713	0,077	0,03	-0.092	-0,53
S_2	1,16	0,446	0,151	0,049	2,571	2,458	0,06	0.074	2,84
S_3	0,28	0,816	0,218	0,166	1,015	0,98	-0,15	0.079	2,72
S_4	-	0,647	0,546	0,361	-	-	0,15	0.116	1,03
S_5	-	0,298	1,339	0,606	-	-	-0,08	0.18	-

Таблица 14 - Коэффициенты для моделирования фаз линейных напряжений второй гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	-0,79	2,21	1,88	-0,79	2,21	1,88	7,72	-2,69	6,47
S_1	-0,89	-5,51	-5,61	-0,89	-5,51	-5,61	4,21	6,56	3,25
S_2	2,27	7,90	6,37	2,27	7,90	6,37	2,92	6,22	1,63
S_3	10,2610	2,10	4,52	10,2610	2,10	4,52	1,24	3,74	0,83
S_4	-	-	-	-	-	-	0,96	1,75	0,54
S_5	-	-		-	-		-	-0,5	-

Таблица 15 - Коэффициенты для моделирования амплитуд линейных напряжений третьей гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	0,93	-0,197	0,362	0,362	0,195	0,07	-0.022	0,07	-0,197
S_1	-0,53	-0,713	0,077	0,077	0,311	0,03	-0.092	0,03	-0,713
S_2	2,84	2,571	2,458	2,458	-0,01	0,06	0.074	0,06	2,571
S_3	2,72	1,015	0,98	0,98	-0,312	-0,15	0.079	-0,15	1,015
S_4	1,03	-	-	-	0,194	0,15	0.116	0,15	-
S_5	-	-	-	-	0,195	-0,08	0.18	-0,08	-

Таблица 16 - Коэффициенты для моделирования фаз линейных напряжений третьей гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	6,63	3,57	1,45	2,01	3,61	3,61	14,29	7,72	-2,69
S_1	3,92	5,63	-1,76	5,14	7,25	7,25	-1,46	4,21	6,56
S_2	2,34	0,86	-4,39	7,07	9,09	9,09	-1,90	2,92	6,22
S_3	1,40	1,84	5,27	3,45	4,03	4,03	-	1,24	3,74
S_4	0,83	0,17	4,12	-6,76	-8,69	-8,69	-	0,96	1,75
S_5	0,77	0,67	2,98	-	-	-	-	-	-0,5

Таблица 17 - Коэффициенты для моделирования амплитуд линейных напряжений четвёртой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	0,195	0,07	-0.022	0,07	-0.022	0,694	-0,051	0,387	-0,051
S_1	0,311	0,03	-0.092	0,03	-0.092	-0,166	-0,006	0,637	-0,006
S_2	-0,01	0,06	0.074	0,06	0.074	0,151	0,049	-0,002	0,049
S_3	-0,312	-0,15	0.079	-0,15	0.079	0,218	0,166	-0,637	0,166
S_4	0,194	0,15	0.116	0,15	0.116	0,546	0,361	0,386	0,361
S_5	0,195	-0,08	0.18	-0,08	0.18	1,339	0,606	0,387	-0,051

Таблица 18 - Коэффициенты для моделирования фаз линейных напряжений четвёртой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	7,72	-2,69	6,47	13,27	3,57	14,29	7,72	14,29	6,30
S_1	4,21	6,56	3,25	0,53	5,63	-1,46	4,21	-1,46	10,41
S_2	2,92	6,22	1,63	-2,60	0,86	-1,90	2,92	-1,90	-1,03
S_3	1,24	3,74	0,83	-	1,84	-	1,24	-	0,35
S_4	0,96	1,75	0,54	-	0,17	-	0,96	-	-1,66
S_5	-	-	-	-	0,67	-	-	-	-

Таблица 19 - Коэффициенты для моделирования амплитуд линейных напряжений пятой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	2,83	2,50	2,728	2,456	2,673	13,234	0,195	0,387	-0,051
S_1	0,52	0,42	0,469	-0,051	-0,197	0,362	0,311	0,637	-0,006
S_2	-	-	-	-0,006	-0,713	0,077	-0,01	-0,002	0,049
S_3	-	-	-	0,049	2,571	2,458	-0,312	-0,637	0,166
S_4	-	-	-	0,166	1,015	0,98	0,194	0,386	0,361
S_5	-	-	-	0,361	-	-	0,195	0,387	-0,051

Таблица 20 - Коэффициенты для моделирования фаз линейных напряжений пятой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	-0,79	14,29	13,27	1,88	-0,79	2,21	1,88	3,61	6,47
S_1	2,14	-1,46	0,53	-5,61	-0,89	-5,51	-5,61	7,25	3,25
S_2	14,45	-1,90	-2,60	6,37	2,27	7,90	6,37	9,09	1,63
S_3	-	-	-	4,52	10,2610	2,10	4,52	4,03	0,83
S_4	-	-	-	-	-	-	-	-8,69	0,54
S_5	-	-	-		-	2,21	1,88	-	-

Таблица 21- Коэффициенты для моделирования амплитуд линейных напряжений шестой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	0,195	0,387	-0,051	0,195	0,07	-0.022	0,93	0,95	3,537
S_1	0,311	0,637	-0,006	0,311	0,03	-0.092	-0,53	1,91	-1,909
S_2	-0,01	-0,002	0,049	-0,01	0,06	0.074	2,84	1,83	0,969
S_3	-0,312	-0,637	0,166	-0,312	-0,15	0.079	2,72	-2,99	-0,458
S_4	0,194	0,386	0,361	0,194	0,15	0.116	1,03	1,52	0,243
S_5	0,001	0,001	0,606	0,195	-0,08	0.18	-	-	-

Таблица 22 - Коэффициенты для моделирования фаз линейных напряжений шестой гармоники

	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{AB/BC}$	$U_{AB/CA}$	$U_{BC/AB}$	$U_{BC/CA}$	$U_{CA/AB}$	$U_{CA/BC}$
S_0	6,30	2,01	3,61	2,21	1,88	2,21	-0.022	0,07	-2,69
S_1	10,41	5,14	7,25	-5,51	-5,61	-5,51	-0.092	0,03	6,56
S_2	-1,03	7,07	9,09	7,90	6,37	7,90	0.074	0,06	6,22
S_3	0,35	3,45	4,03	2,10	4,52	2,10	0.079	-0,15	3,74
S_4	-1,66	-6,76	-8,69	-	-	-	0.116	0,15	1,75
S_5	-	-	-	-		2,21	0.18	-0,08	-0,5

Алгоритм рандомизации, реализованный в блоке 6, представлен на рис. 5. Суть его заключается в следующем. При определении амплитуд и фаз гармоник линейных напряжений на стационарных участках возможно, как указывалось ранее, применение одного из способов расчёта: либо на основании заданных автокорреляционных функций (по методу скользящих средних), либо на основании взаимокорреляционных функций (по методу скользящих средних с запаздыванием), либо с использованием известных в электротехнике соотношений между мгновенными значениями линейных напряжений (формулы 2; 10; 11). Все возможные комбинации последовательностей расчётов значений линейных напряжений приведены в табл. 23.

Выделим для каждой из них равные числовые промежутки в интервале [0;1]. Тогда, разыгрывая случайную величину *d* (блок 1) равномерно распределённую в интервале [0;1], можно случайным образом выбирать одну из последовательностей (блоки 2,3). Из теории вероятности и математической статистики известно, что при большом количестве испытаний частоты выбора будут одинаковыми.

Проверка адекватности вероятностной модели цеховой электрической сети. При синтезе цифровых генераторов линейных напряжений в цеховых электросетях использованы методы, обеспечивающие воспроизведение на ЭВМ случайных последовательностей с заданными статистическими характеристиками. Поэтому необходимо, чтобы средние значения и дисперсии сгенерированных выборок незначимо отличались от полученных гипотетических средних значений и дисперсий (табл. 1-3). Только в этом случае можно по результатам вычислительных исследований принимать корректные технические решения для обеспечения необходимых условий функционирования асинхронных двигателей.

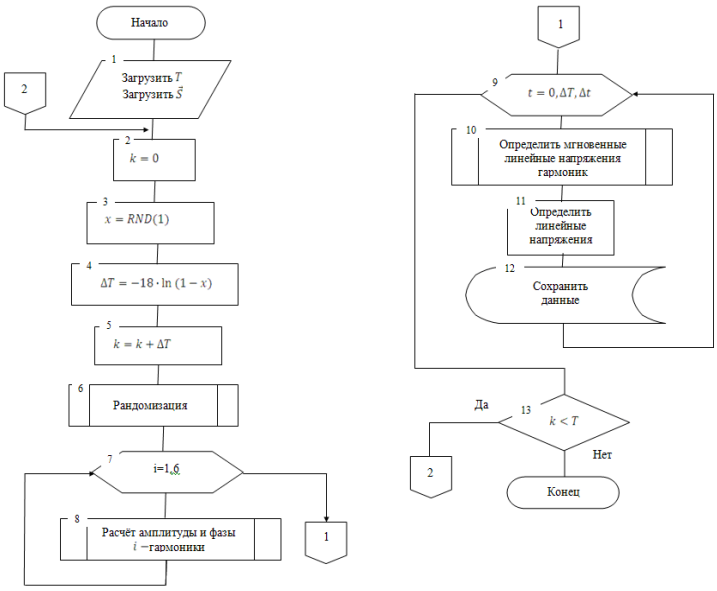


Рис. 4. Алгоритм моделирования линейных напряжений

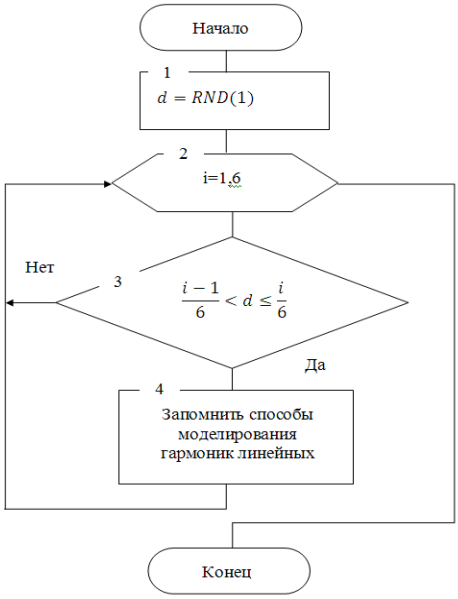


Рис. 5 Алгоритм рандомизации

Для того чтобы при заданном уровне значимости α проверить нулевую гипотезу H_0: $\sigma^2 = \sigma^2_0$ о равенстве неизвестной генеральной дисперсии σ^2 гипотетическому значению σ^2_0 при конкурирующей гипотезе H_1: $\sigma^2 \neq \sigma^2_0$, необходимо вычислить наблюдаемое значение критерия [16]:

$$\chi^2_{набл} = \left[(n-1)s^2/\sigma^2_0\right],$$

где s^2 - несмещённая оценка дисперсии.

Далее следует определить левую и правую

$$\chi^2_{левую\,кр.(1-\alpha/2;k)} u \chi^2_{правую кр.(\alpha/2;k)}$$

критические точки (k=n-1 – количество степеней свободы).

Если $\chi^2_{л.кр.(1-\alpha/2;k)} < \chi^2_{набл} < \chi^2_{п.кр.(\alpha/2;k)}$, то нулевая гипотеза принимается.

Для n = 30 и α = 0,05 левая и правая критические точки будут соответственно равны

$$\chi^2_{л.кр.(1-\alpha/2;k)} = 16 u \chi^2_{п.кр.(\alpha/2;k)} = 42{,}6$$

Таблица 23 - Определение способа моделирования гармоник линейных напряжений

№	Значение случайной величины d	Расчёт по автокорреляционной функции	Расчёт по взаимкорреляционной функции	Расчёт по формуле (2)
1	$0 \le d \le 1/6$	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
2	$1/6 < d \le 2/6$	U_{AB}	U_{CA}	U_{BC}
3	$2/6 < d \le 3/6$	U_{BC}	U_{AB}	U_{CA}
4	$3/6 < d \le 4/6$	U_{BC}	U_{CA}	U_{AB}
5	$4/6 < d \le 5/6$	U_{CA}	U_{AB}	U_{BC}
6	$5/6 < d \le 1$	U_{CA}	U_{BC}	U_{AB}

Результаты проверки дисперсий случайных последовательностей гармоник линейных напряжений, которые сгенерированы разработанными цифровыми генераторами, представлены в табл. 24-26.

Для того чтобы при заданном уровне значимости α проверить нулевую гипотезу H_0: $\alpha = 0$ о равенстве генеральной средней α нормальной совокупности с известной дисперсией σ^2_0 гипотетическому значению α_0 при конкурирующей гипотезе H_1: $\alpha \neq 0$, следует вычислить наблюдаемое значение критерия [16]:

$$U_{набл} = (\bar{y} - a_0)\sqrt{n}/\sigma$$

Затем по таблице функций Лапласа следует найти критическую точку $u_{кр}$ двусторонней критической области из равенства:

$$\Phi(u_{кр}) = (1-\alpha)/2$$

Если $|U_{набл}| < u_{кр}$, то нет оснований отвергать нулевую гипотезу.

Для α = 0,05 определяем $\Phi(u_{кр})$=(1–α)/2=0,475. По таблице функции Лапласа находим $u_{кр}$ = 196. Результаты проверки средних случайных последовательностей гармоник линейных напряжений, которые сгенерированы разработанными цифровыми генераторами (n = 30), представлены в табл. 27-29.

Проверка гипотезы о принадлежности случайной выборки заданному закону распределения чаще всего осуществляется по критерию χ^2 (хи – квадрат) Пирсона. Суть данного критерия заключается в следующем. Определяется минимальное Y_{min} и максимальное Y_{max} значения случайной величины (размах выборки) и весь диапазон [Y_{min}, Y_{max}] делится на интервалы, количество которых рассчитывается по формуле [16]: $m \le 5lgn$, где n - объём выборки.

Затем для каждого интервала [Y_{min}, Y_{max}] определяются эмпирические h_i и теоретические $np_i = n\int_{Y_{imin}}^{Y_{imax}} f(y)\,dy$ частоты, и рассчитывается величина критерия:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{(h_i - np_i)^2}{np_i}. \qquad (24)$$

Расчёты по формуле (24) будут корректными, если теоретические частоты будут удовлетворять неравенству $np_i \ge 5$.

Результаты контроля дисперсий гармоник линейного напряжения

Таблица 24 - U_{AB}

Гармоника	Амплитуда,В			Фаза, град		
	Дисперсия			Дисперсия		
	σ_0^2	s^2	$\chi^2_{набл}$	σ_0^2	s^2	$\chi^2_{набл}$
1	19,11	21,19	32,16	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7
2	1,42	1,24	25,34	112	70,06	18,14
3	9,35	6,41	19,87	68	62,16	26,51
4	0,06	0,04	21,19	85	68,06	23,22
5	8,29	11,35	39,72	214	276.06	37,41
6	0,27	0,31	33,07	152	180.51	34,44

Таблица 25 - U_{BC}

Гармоника	Амплитуда,В			Фаза, град		
	Дисперсия			Дисперсия		
	σ_0^2	s^2	$\chi^2_{набл}$	σ_0^2	s^2	$\chi^2_{набл}$
1	17,36	11,87	19,83	-	-	-
2	1,56	1,02	18,92	102	96,20	27,35
3	8,19	8,83	31,27	49	40,82	24,16
4	0,06	0, 05	22,88	106	137,99	37,75
5	6,44	5,59	25,17	210	191,97	26,51
6	1,11	0,82	21,45	138	144,00	30,47

Таблица 26 - U_{CA}

Гармоника	Амплитуда, В			Фаза, град		
	Дисперсия			Дисперсия		
	σ_0^2	s^2	$\chi^2_{набл}$	σ_0^2	s^2	$\chi^2_{набл}$
1	17,28	1,59	21,13	-	-	-
2	1,25	1,75	40,52	96	87,66	26,48
3	7,14	9,38	38,10	78	97,23	36,15
4	0,06	0,04	17,06	56	66,86	34,62
5	7,66	6,59	24,93	183	250,90	39,76
6	0,53	0,36	19,67	240	338,90	40,95

Результаты проверки средних гармоник линейного напряжения

Таблица 27 - U_{AB}

Гармоника	Амплитуда, В			Фаза, град		
	Сред.α_0	Сред.y	$\lvert U_{набл}\rvert$	Сред.α_0	Сред.y	$\lvert U_{набл}\rvert$
1	529,82	531,26	|1,8|	-	-	-
2	4,23	4,38	|0,7|	63	59,95	|-1,58|
3	17,60	16,85	|-1,35|	206	208,01	|1,34|
4	1,51	1.58	|1,63|	92	94,88	|1,71|
5	18,54	17,75	|-1,51|	130	134,99	|1,87|
6	3,05	2,95	|-1,02|	290	286,24	|-1,67|

Таблица 28 - U_{BC}

Гармоника	Амплитуда, В			Фаза, град		
	Сред.α_0	Сред.y	$\lvert U_{набл}\rvert$	Сред.α_0	Сред.y	$\lvert U_{набл}\rvert$
1	532,09	533,38	|1,70|	-	-	-
2	3,98	4,41	|1,88|	78	74,63	|-1,83|
3	19,13	18,38	|-1,44|	235	236,7	|1,33|
4	1,55	1,64	|1,92|	111	114,27	|1,74|
5	16,77	17.35	|1,25|	114	109,11	|-1,85|
6	4,15	4,33	|0,94|	325	327,08	|0,97|

Таблица 29 - U_{CA}

Гармоника	Амплитуда, В			Фаза, град		
	Сред.α_0	Сред.y	$\lvert U_{набл}\rvert$	Сред.α_0	Сред.y	$\lvert U_{набл}\rvert$
1	530,41	531,85	|1,90|	-	-	-
2	3,71	4,07	|1,78|	94	91,23	|-1,55|
3	18,27	19,09	|1,69|	182	182,31	|0,19|
4	1,50	1,57	|1,63|	83	85,42	|1,77|
5	16,01	16,56	|1,08|	165	169,22	|1,71|
6	3,82	3,57	|-1,88|	310	315,346	|1,89|

Если для некоторых интервалов это неравенство не выполняется, они объединяются с соседними. Выдвинутая гипотеза о принадлежности случайной выборки заданному закону распределения принимается для выбранной вероятности ошибки первого рода α при решении технических задач (уровень значимости α принимают 0,05), если рассчитанное значение χ^2 будет не больше табличного $\chi^2_{\alpha,k}$.

Здесь k – количество степеней свободы: $k = m - 3$.

Результаты проверки законов распределения случайных последовательностей гармоник линейных напряжений, которые сгенерированы разработанными цифровыми генераторами для выборки n = 30 и α = 0,05 , представлены в табл. 30-31. Как следует из таблиц 24-31 числовые характеристики гармоник генерируемых линейных напряжений цеха №1 ПАО «Днепроспецсталь» незначимо отличаются от гипотетических, поэтому цифровая модель, настроенная на рассматриваемые условия может считаться адекватной.

Выводы. Исследование эффективности использования электрооборудования в электрических сетях с некачественной электроэнергией целесообразно осуществлять на основе вычислительных экспериментов с использованием генераторов линейных напряжений, разработанных на основе метода статистических испытаний.

Моделирование линейных напряжений в электрических сетях с некачественной электроэнергией статистическими методами, ввиду того, все их гармонические составляющие имеют фиксированные частоты колебаний на которые лишь накладываются изменения амплитуд и начальных фаз, целесообразно осуществлять путем генерирования случайных последовательностей последних. Наличие больших интервалов между случайными включениями и выключениями электрооборудования в электрических сетях приводит к не стационарности линейных напряжений и требует предварительного выделения стационарных участков.

При использовании в качестве аргумента случайных функций линейных напряжений номера события включения/ выключения оборудования, исследования статистических закономерностей линейных напряжений в электросети цеха возможно осуществить в рамках корреляционного анализа.

Таблица 30 - Результаты проверки законов распределения амплитуд

Гармоника	Линейное напряжение								
	U_{AB}			U_{AB}			U_{AB}		
	χ^2	k	$\chi^2_{\alpha,k}$	χ^2	k	$\chi^2_{\alpha,k}$	χ^2	k	$\chi^2_{\alpha,k}$
1	8,9	4	9,5	7,6	3	7,8	7,3	3	7,8
2	8,3	4	9,5	9,1	4	9,5	5,5	2	6,0
3	6,5	3	7,8	7,5	3	7,8	9,0	4	9,5
4	5,7	2	6,0	7,2	3	7,8	7,1	3	7,8
5	7,0	3	7,8	5,9	2	6,0	7,7	3	7,8
6	7,4	3	7,8	6,8	3	7,8	5,4	2	6,0

Таблица 31 -Результаты проверки законов распределения фаз

Гармоника	Линейное напряжение								
	U_{AB}			U_{AB}			U_{AB}		
	χ^2	k	$\chi^2_{\alpha,k}$	χ^2	k	$\chi^2_{\alpha,k}$	χ^2	k	$\chi^2_{\alpha,k}$
1	7,5	3	7,8	7,7	3	7,8	7,6	3	7,8
2	7,6	3	7,8	7,6	3	7,8	5,7	2	6,0
3	5,9	2	6,0	9,3	4	9,5	5,8	2	6,0
4	7,6	3	7,8	5,4	2	6,0	7,4	3	7,8
5	5,8	2	6,0	7,5	3	7,8	8,8	4	9,5
6	5,9	2	6,0	7,5	3	7,8	5,9	2	6,0

Рандомизация последовательностей вычислений гармоник линейных напряжений позволяет уменьшить систематическую ошибку моделирования.

Использование разработанной вероятностной модели цеховой электрической сети с некачественной электроэнергией позволяет на основе вычислительных исследований принимать корректные технические решения для обеспечения заданных условий функционирования в ней асинхронных двигателей.

Список литературы: 1. *Строгалев В. П.* Имитационное моделирование: Учеб. пособие /*В. П. Строгалев*, *И. О. Толкачева*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 280 с. **2.** *Скурихин В. И.* Математическое моделирование / *В. И. Скурихин*, *В. В. Дубровский*, *В. Б. Шифрин*. – Киев: Наукова думка, 1983. – 270 с. **3.** *Качан Ю. Г.* О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания / *Ю. Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В. Кузнецов* // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – Вип.81. – Дніпропетровськ, 2008. – С.51-54. **4.** *Качан Ю. Г.* Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания / *Ю. Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В. Кузнецов* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – № 3. – Кременчук, 2009. – С.56-58. **5.** *Качан Ю. Г.* Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания / *Ю. Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В. Кузнецов* // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – № 3. – Харків: НТУ «ХПІ»,2009. – с.67-69. **6.** *Качан Ю. Г.* Моделирование асинхронного двигателя для условий некачественного питания / *Ю.Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В. Кузнецов* // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в энергетических системах. –Материалы Международной научно-технической конференции. – Севастополь, 2009. – С. 55-56. **7.** *Качан Ю. Г.* О методике выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии / *Ю. Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В. Кузнецов* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2011. – Випуск 4/2011(16). – С.53-57. **8.** *Качан Ю. Г.* О моделировании напряжений в электрических сетях промышленных предприятий / *Ю. Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В. Кузнецов* // Електротехніка і електроенергетика. – № 1. – 2012. – С.72-75. **9.** *Прохоров С. А.* Математическое описание и моделирование случайных процессов / *С. А. Прохоров*. – Уральск: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 209 с. **10.** *Яглом Я. М.* Корреляционная теория стационарных случайных функций / *Я. М. Яглом*. – М.: Наука, 1983. – 320 с. **11.** *Бендат Дж*. Прикладной анализ случайных данных / *Дж*. *Бендат*, *А. Пирсол*. – М.: Мир, 1989. – 540 с. **12.** *Качан Ю. Г.* О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя / *Ю. Г. Качан*, *А. В. Николенко*, *В. В.Кузнецов* // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. з.б – Вип. 83. – Дніпропетровськ, 2009. – С.113-118. **13**. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика /*А. И. Кобзарь*. – М.: Физматлит, 2006. – 238 с. **14.** *Нейлор Г.* Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / *Г. Нейлор*. – М.: Мир, 1975. – 412 с. **15.** *Гмурман В. Е.* Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике: Учеб. пособие для студентов вузов / *В. Е. Гмурман*. – М.: Высш. шк., 2004. – 404 с. **16.** *Кендалл М.* Статистические выводы и связи / *М. Кендалл*, *А. Стьюарт*. – М.: Наука, 1973. – 326 с.

Bibliography (transliterated): 1. Strogalev, V. P., Tolkacheva, I. O. Imitatsionnoe modelirovanie. Ucheb. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. 280. **2.** Skurihin, V. I., Dubrovskiy, V. V., Shifrin, V. B. Matematicheskoe modelirovanie. – Kiev: Naukova dumka, 1983. 270 s. **3.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. O modelyah funktsionirovaniya asinhronnogo dvigatelya v usloviyah nekachestvennogo pitaniya. GIrnicha elektromehanIka ta avtomatika: naukovo-tehnIchniy zbIrnik. Vip. 81. DnIpropetrovsk, 2008. 51-54. **4.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. Realizatsiya modeli asinhronnogo dvigatelya dlya usloviy nekachestvennogo pitaniya.Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo polItehnIchnogo unIversitetu. No 3. – Kremenchuk, 2009. 56-58. **5.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. Otsenka adekvatnosti matematicheskoy modeli asinhronnogo dvigatelya v usloviyah nekachestvennogo pitaniya Integrovani tehnologii ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. No 3. – Harkiv: NTU «HPI», 2009. 67-69. **6.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. Modelirovanie asinhronnogo dvigatelya dlya usloviy nekachestvennogo pitaniya. Problemyi povyisheniya effektivnosti elektromehanicheskih preobrazovateley v energeticheskih sistemah. Materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. – Sevastopol, 2009. 55-56. **7.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. O metodike vyibora ekonomicheski tselesoobraznyih sredstv zaschityi asinhronnyih dvigateley, rabotayuschih v usloviyah nekachestvennoy elektroenergii Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi. Schokvartalniy naukovo-virobnichiy zhurnal. – Kremenchuk: KDPU, 2011. – Vipusk 4/2011(16). 53-57. **8.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. O modelirovanii napryazheniy v elektricheskih setyah promyishlennyih predpriyatiy. Elektrotehnika i elektroenergetika. – No 1. 2012. – 72-75. **9.** Prohorov, S. A. Matematicheskoe opisanie i modelirovanie sluchaynyih protsessov. – Uralsk: Samar. gos. aerokosm. un-t, 2001. – 209. **10.** Yaglom, Ya. M. Korrelyatsionnaya teoriya statsionarnyih sluchaynyih funktsiy. M.: Nauka, 1983. 320. **11.** Bendat, Dzh. Prikladnoy analiz sluchaynyih dannyih M.: Mir, 1989. – 540. **12.** Kachan, Yu. G., Nikolenko, A. V., Kuznetsov, V. V. O vliyanii garmonicheskogo sostava pitayuschego napryazheniya na energeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelya Girn. elektromehanIka ta avtomatika: nauk.-tehn. z.b – Vip. 83. – Dnipropetrovsk, 2009. 113-118. **13**. Kobzar, A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika– M.: Fizmatlit, 2006. – 238. **14.** Neylor, G. Mashinnyie imitatsionnyie eksperimentyi s modelyami ekonomicheskih sistem – M.: Mir, 1975. – 412. **15.** Gmurman, V. E. Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnosti i matematicheskoy statistike: Ucheb. posobie dlya studentov vuzov: Vyissh. shk., 2004. – 404. **16.** Kendall M. Statisticheskie vyivodyi i svyazi / M. Kendall, A. Styuart. – M.: Nauka, 1973. – 326.

Поступила

УДК 62-526

Б. І. ПРИЙМАК, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ»

ВЛАСТИВОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З МАКСИМІЗАЦІЄЮ МОМЕНТА У ЗОНІ ВИСОКИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРА

Вступ. У багатьох виробничих механізмах, таких як металообробні верстати, електромобілі, трамваї, тролейбуси тощо, асинхронні електроприводи (АЕП) з векторним керуванням повинні працювати як на нижчих, так і на значно вищих від номінальної швидкостях ротора. На високих швидкостях, де обмежується амплітуда напруги живлення асинхронного двигуна (АД), стандартним законом зміни потокозчеплення ротора є зворотно пропорційна залежність від швидкості двигуна [1]. Але цей закон не забезпечує повноцінне використання енергетичних ресурсів привода, чого можна досягти за рахунок екстремального керування.

На сьогодні відомо чимало робіт [2-4], де розглядається проблема поліпшення характеристик АЕП у зоні високих швидкостей двигуна. Серед недоліків цих робіт є використання моделі АД без врахування нелінійності магнітного кола чи втрат потужності у залізі. В праці [5] для розширеної моделі АД отримано граничні характеристики при максимізації момента та показано істотне зростання перевантажувальної здатності привода. Проте на сьогодні не всі властивості АЕП з екстремальним керуванням моментом двигуна є достатньо вивченими, зокрема потребує дослідження питання точності визначення швидкості, що розмежовує зони номінального та оптимального потокозчеплення ротора.

Метою роботи є дослідження властивостей АЕП з оптимальним щодо максимізації електромагнітного момента формуванням потокозчеплення ротора на високих швидкостях обертання при врахуванні обмежень струму та напруги живлення статора.

Матеріали дослідження. Короткозамкнений АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора $\overline{\Psi}_r$ координатах (d,q) при врахуванні втрат у залізі і кривої намагнічування можна описати системою диференційних рівнянь [5]

$$\begin{aligned}
dI_{sd}/dt &= L_{s\sigma}^{-1}\left[-(R_s+R_z)I_{sd}-R_zL_{r\sigma}^{-1}\Psi_{rd}+T_z^{-1}L_rL_{r\sigma}^{-1}\Psi_{md}+U_{sd}\right]+\omega_0 I_{sq};\\
dI_{sq}/dt &= L_{s\sigma}^{-1}\left[-(R_s+R_z)I_{sq}+T_z^{-1}L_rL_{r\sigma}^{-1}\Psi_{mq}+U_{sq}\right]-\omega_0 I_{sd};\\
d\Psi_{rd}/dt &= T_{r\sigma}^{-1}(-\Psi_{rd}+\Psi_{md});\\
d\Psi_{md}/dt &= R_z\left(I_{sd}+\Psi_{rd}/L_{r\sigma}-L_rL_m^{-1}L_{r\sigma}^{-1}\Psi_{md}\right)+\omega_0\Psi_{mq};\\
d\Psi_{mq}/dt &= R_z\left(I_{sq}-L_rL_m^{-1}L_{r\sigma}^{-1}\Psi_{mq}\right)-\omega_0\Psi_{md};\\
d\omega/dt &= J^{-1}(M-M_L),
\end{aligned} \tag{1}$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора $\overline{U}_s$, струму статора $\overline{I}_s$, потокозчеплення ротора $\overline{\Psi}_r$; головного потокозчеплення $\overline{\Psi}_m$; ω_0 – швидкість обертання координат (d,q); z_p – кількість пар полюсів; ω – швидкість ротора; R_s, R_r – активні опори фаз статора та ротора; $R_z = R_z(\omega_0,\omega)$ – еквівалентний опір, що відображає втрати потужності у залізі машини; $L_m = L_m(\Psi_m)$ – взаємна індуктивність; $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання; $L_r = L_m + L_{r\sigma}$, $T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r$, $T_z = L_m/R_z$; M, M_L – моменти двигуна та навантаження відповідно; J – сумарний момент інерції. Враховуючи те, що в зорієнтованих координатах $\Psi_{rd} = \left|\overline{\Psi}_r\right| \equiv \Psi_r$, електромагнітний момент двигуна та швидкість координат в (1) обчислюються як

$$M = 1.5z_pL_{r\sigma}^{-1}\Psi_r\Psi_{mq}, \qquad \omega_0 = z_p\omega + \Psi_{mq}/(T_{r\sigma}\Psi_r). \tag{2}$$

Насичення магнітопроводу в (1) враховується за рахунок нелінійної функції $L_m = L_m(\Psi_m)$, отриманої на основі кривої намагнічування двигуна та апроксимованої поліноміальним виразом

$$L_m = L_{mn}\sum_{i=0}^{k} a_i\Psi_m^{k-i}, \tag{3}$$

де a_i – коефіцієнти полінома; k – степінь полінома; L_{mn} – номінальне значення взаємної індуктивності (індексом "n" нижче позначатимуться номінальні значення величин); $\Psi_m = \left|\overline{\Psi}_m\right|$.

Магнітний опір можна визначати за виразом [6]

$$R_z = \left(K_h\left(1+|s|\right)/f_0 + K_e\left(1+s^2\right)\right)^{-1}, \tag{4}$$

© Б.І. Приймак, 2015

де K_h, K_e – коефіцієнти втрат від гістерезису та вихрових струмів; $f_0 = |\omega_0|/2\pi$ – частота живлення АД; $s = (\omega_0 - z_p\omega)/\omega_0$ – ковзання двигуна.

Опис (1)-(4) слід доповнити існуючими в АЕП обмеженнями модуля вектора напруги статора $U_s = |\bar{U}_s|$ на рівні номінальної напруги двигуна U_{sn} та модуля вектора струму статора $I_s = |\bar{I}_s|$ на рівні I_{max} у вигляді

$$0 \le U_s \le U_{sn}; \qquad 0 \le I_s \le I_{max}. \tag{5}$$

Стандартний закон формування модуля вектора потокозчеплення ротора має вигляд

$$F_{st}(\omega) = \begin{cases} \Psi_{rn} & \text{при} \quad |\omega| \le \omega_n, \\ \Psi_{rn}\,\omega_n/|\omega| & \text{при} \quad |\omega| > \omega_n. \end{cases} \tag{6}$$

Отже задача оптимізації електромагнітного момента двигуна на високих швидкостях ротора формулюється наступним чином: для АД з описом (1)-(4) при врахуванні обмежень (5) за критерієм $M \Rightarrow \max$ для швидкостей $0 \le \omega \le \omega_{max}$, де ω_{max} – максимально допустима швидкість двигуна, знайти оптимальний закон формування потокозчеплення ротора в рушійному режимі, а для швидкостей $-\omega_{max} \le \omega \le 0$ – в режимі рекуперативного гальмування (у генераторному режимі).

Враховуючи високий порядок та суттєву нелінійність опису (1)-(5), очевидно, що точно дану задачу оптимізації можна розв'язати лише чисельно. У числових дослідженнях в статті використано типовий чотириполюсний АД потужністю 1,5 кВт, номінальні дані якого подані у табл. 1.

Таблиця 1 – Номінальні дані АД потужністю 1,5 кВт

1500 Вт	380/220 В	3,56 А	50 Гц	1413 об/хв	cosφ=0,83
$R_s = 6{,}46$ Ом	$R_r = 3{,}87$ Ом	$R_z = 1380$ Ом	$L_s = 0{,}389$ Гн	$L_r = 0{,}398$ Гн	$L_m = 0{,}374$ Гн

Оптимальне потокозчеплення ротора $\Psi_r = F_{opt}^m(\omega)$ для опису (1)-(5) отримано за допомогою генетичного алгоритму числової оптимізації. На рис. 1 зображені статичні характеристики АД при стандартному, а на рис. 2 – при оптимальному законах формування потокозчеплення ротора для $I_{max} = 1{,}5 I_{sn}$, де змінні нормовані відносно своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

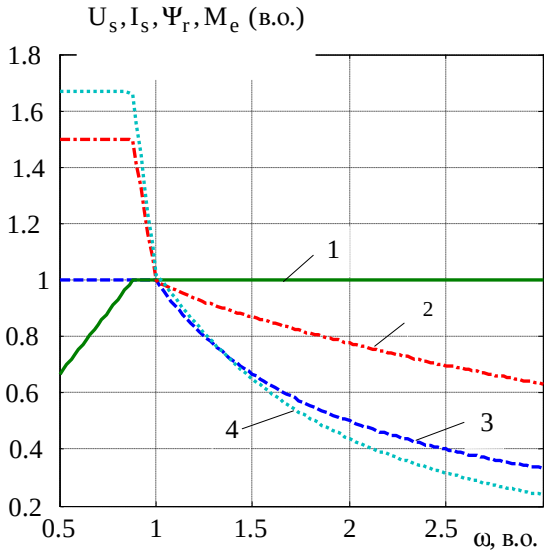


Рисунок 1 – Характеристики АД при стандартному формуванні потокозчеплення $\Psi_r = F_{st}(\omega)$: 1 – U_s; 2 – I_s; 3 – Ψ_r; 4 – M.

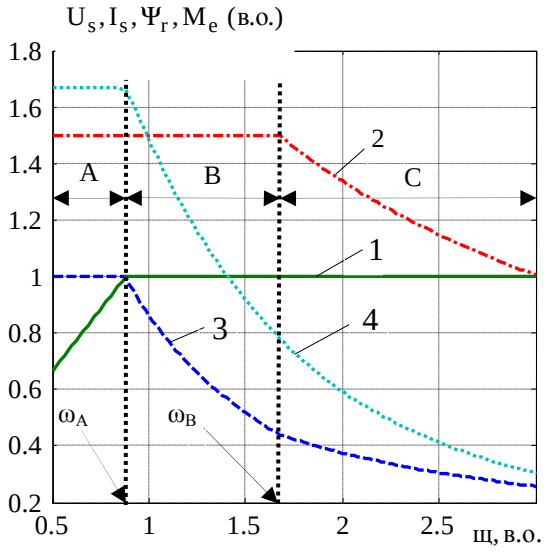


Рисунок 2 – Характеристики АД при оптимальному формуванні потокозчеплення $\Psi_r = F_{opt}^m(\omega)$: 1 – U_s; 2 – I_s; 3 – Ψ_r; 4 – M.

Аналізуючи рис. 2 варто відмітити, що за обмеження напруги та струму живлення двигуна доцільно розглядати не дві (як це робиться у класичній теорії електропривода), а три зони регулювання швидкості, які можна назвати зонами А, В і С. Межовим значенням швидкості для зон А та В є швидкість, при якій напруга статора сягає свого обмеження, а для зон В та С – коли струм статора перестає обмежуватися. На рис. 2 ці межові швидкості позначено відповідно як ω_A та ω_B. Отже зоні А відповідають швидкості $0 \le \omega \le \omega_A$, зоні В – $\omega_A < \omega \le \omega_B$, а зоні С – $\omega_B < \omega \le \omega_{max}$. Важливим є те, що в кожній із вказаних зон швидкості причини обмеження електромагнітного момента двигуна є різними.

Зокрема, в зоні А максимальний момент двигуна визначається обмеженням струму статора, в зоні В – обмеженнями як струму так і напруги статора, а в зоні С – лише обмеженням напруги статора.

На рис. 3 подані графіки стандартного та оптимальних законів формування потокозчеплення для двох значень I_{max}. Ці графіки засвідчують, що для різних значень обмеження струму статора залежності $\Psi_r = F_{opt}^m(\omega)$, а, відповідно, і досягнутий максимальний момент двигуна відрізняються між собою лише в зоні швидкості В. Для оцінювання ефекту від оптимізації було обчислено показник оптимальності момента двигуна k_μ, що є відношенням оптимізованого до не оптимізованого моментів АД (рис. 4). Згідно з рис. 4, завдяки оптимальному закону формування потокозчеплення момент АД в зоні високих швидкостей істотно зростає.

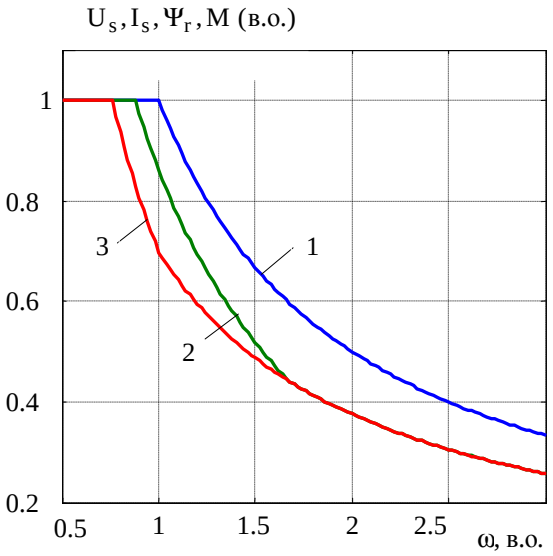


Рисунок 3 – Стандартний (крива 1) та оптимальні (криві 2, 3) закони формування потокозчеплення: (2 – $I_{max} = 1{,}5I_{sn}$; 3 – $I_{max} = 2I_{sn}$).

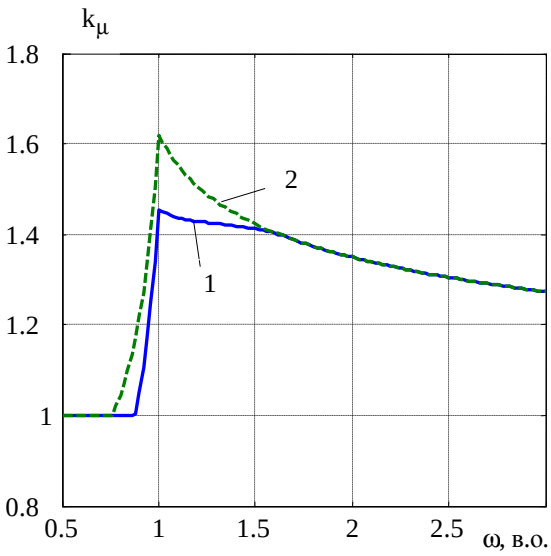


Рисунок 4 – Показник оптимальності момента двигуна для $I_{max} = 1{,}5I_{sn}$ (крива 1) та $I_{max} = 2I_{sn}$ (крива 2).

Як зазначено вище, за наявності обмежень напруги та струму статора АД існують три зони регулювання його швидкості. Ці зони відокремлюються між собою відповідно двома межовими швидкостями – ω_A та ω_B (рис. 2). Перша межова швидкість ω_A відіграє важливу роль, оскільки при максимізації електромагнітного момента саме з неї треба починати зниження магнітного потоку АД. Вище ця швидкість визначалася при числовому отриманні оптимального потокозчеплення двигуна. Проте для задач аналізу властивостей АЕП з максимізацією момента та для налаштування параметрів алгоритму екстремального векторного керування корисно мати аналітичний вираз для визначення ω_A. Щоб віднайти такий вираз, використаємо опис ідеалізованого АД [1], де магнітне коло вважається лінійним, а втрати в залізі не враховуються.

Усталені електромагнітні процеси ідеалізованого АД у зорієнтованих за $\overline{\Psi}_r$ координатах (d,q) описуються системою рівнянь

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s' I_{sd} - \omega_0 L_s' I_{sq} - K_r \Psi_r / T_r ; \\ U_{sq} &= R_s' I_{sq} + \omega_0 L_s' I_{sd} + K_r \Psi_r z_p \omega ; \\ \Psi_r &= L_m I_{sd} ; \\ \omega_0 &= z_p \omega + K_r R_r I_{sq} / \Psi_r , \end{aligned} \qquad (7)$$

де $L_s' = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$; $R_s' = R_s + K_r^2 R_r$; $K_r = L_m / L_r$; $L_m = L_{mn}$. На модулі векторів струму та напруги статора двигуна накладені обмеження

$$I_{sd}^2 + I_{sq}^2 \le I_{max}^2 ; \qquad U_{sd}^2 + U_{sq}^2 \le U_{max}^2 . \qquad (8)$$

Межове значення швидкості ω_A фізично відповідає досягненню напругою статора рівня обмеження при обмеженні струму. В цьому разі виконуватимуться наступні умови: $I_{sd}^2 + I_{sq}^2 = I_{max}^2$; $U_{sd}^2 + U_{sq}^2 = U_{max}^2$; $\Psi_r = \Psi_{rn}$. За таких умов з (7) отримаємо вираз для моментної складової струму статора

$$I_{sq} = \pm\sqrt{I_{max}^2 - \Psi_{rn}/L_m}\,, \tag{9}$$

а також наступне квадратичне рівняння для значення швидкості $\omega = \omega_A$:

$$a_0\omega_A^2 + a_1\omega_A + a_2 = 0\,, \tag{10}$$

де $a_0 = b_2^2 + c_2^2$, $a_1 = -2(c_1c_2 - b_1b_2)$, $a_2 = b_1^2 + c_1^2 - U_{max}^2$, $b_1 = \Psi_r(R_s'/L_m - K_r/T_r) - L_s'K_rR_rI_{sq}^2/\Psi_r$, $b_2 = -z_pL_s'I_{sq}$, $c_1 = -(R_s' + L_s'/T_r)I_{sq}$, $c_2 = z_p(L_s'/L_m + K_r)\Psi_r$.

Розв'язок рівняння (10) має вигляд

$$\omega_A = \left(-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}\right)\Big/2a_0 \tag{11}$$

Формула (11) дозволяє визначати межову швидкість ω_A як у рушійному режимі АЕП, так і в генераторному режимі. Для цього в першому разі у (9) слід брати додатні значення, а в другому – від'ємні.

За (11) при $U_{max} = U_{sn}$ були розраховані залежності $\omega_A(I_{max})$ для двигуна потужністю 1,5 кВт, дані якого наведені в табл. 1, та для типового 4-х полюсного АД потужністю 30 кВт. Ці залежності представлені відповідно на рис. 5 та 6, де криві 1 отримані для рушійного режиму, а криві 2 – для режиму рекуперативного гальмування.

Аналізуючи наведені на рис. 5, 6 графіки, можна зауважити деякі характерні ознаки. Для рушійного режиму роботи двигунів швидкість ω_A при зростанні I_{max} монотонно спадає за близькими до лінійної залежностями. Причому інтенсивність спадання ω_A більша для двигуна меншої потужності. Лише при обмеженні струму статора на рівні номінального $I_{max} = I_{sn}$ межова швидкість дорівнює номінальній $\omega_A = \omega_n$, що відповідає стандартному закону формування потокозчеплення. Для генераторного режиму двигунів швидкість ω_A при зростанні I_{max} змінюється за певними нелінійними залежностями. Що стосується взаємної віддаленості між кривими $\omega_A(I_{max})$ для рушійного та генераторного режимів роботи, то вона значно більша для двигуна потужністю 1,5 кВт, ніж для АД потужністю 30 кВт.

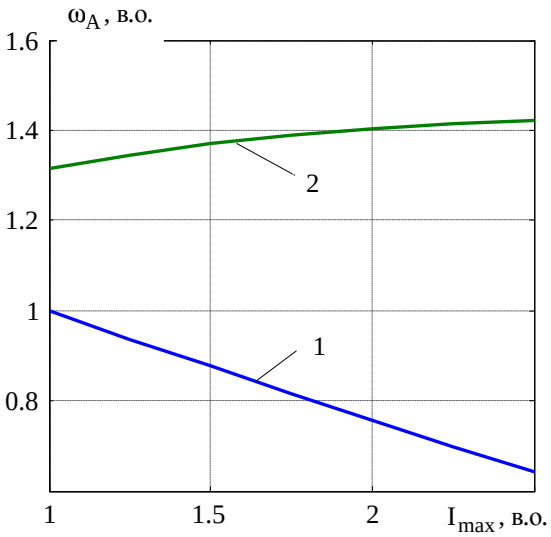


Рисунок 5 – Залежності швидкості $\omega_A(I_{max})$ для рушійного (крива 1) та генераторного (крива 2) режимів АД потужністю 1,5 кВт.

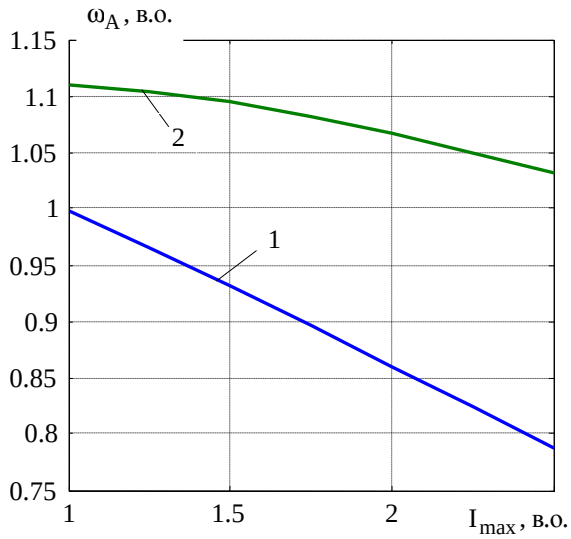


Рисунок 6 – Залежності швидкості $\omega_A(I_{max})$ для рушійного (крива 1) та генераторного (крива 2) режимів АД потужністю 30 кВт.

Варто відмітити, що отримана формула (11) відрізняється від відомого аналогу [4] кращою точністю. Це пояснюється тим, що у зазначеному аналогу знехтувано активним опором статора – $R_s = 0$. У цьому зв'язку корисно оцінити рівень помилок при визначенні межової швидкості, до яких призводить нехтування активним опором статора двигуна. Відносна помилка межової швидкості обчислюється як

$$\delta\omega_A = (\tilde{\omega}_A - \omega_A)/\omega_A\,, \tag{12}$$

де ω_A – значення межової швидкості, отримане власне за виразом (11), $\tilde{\omega}_A$ – значення межової швидкості, отримане за виразом (11) при $R_s = 0$.

За (12) були розраховані залежності помилки межової швидкості від максимально допустимого струму статора $\delta\omega_A(I_{max})$ для двигунів потужністю 1,5 кВт та 30 кВт. Ці залежності представлені відповідно на рис. 5

та 6, де криві 1 отримані для рушійного режиму двигунів, а криві 2 – для режиму рекуперативного гальмування. Аналіз наведених на цих рисунках графіків дозволяє зазначити наступне.

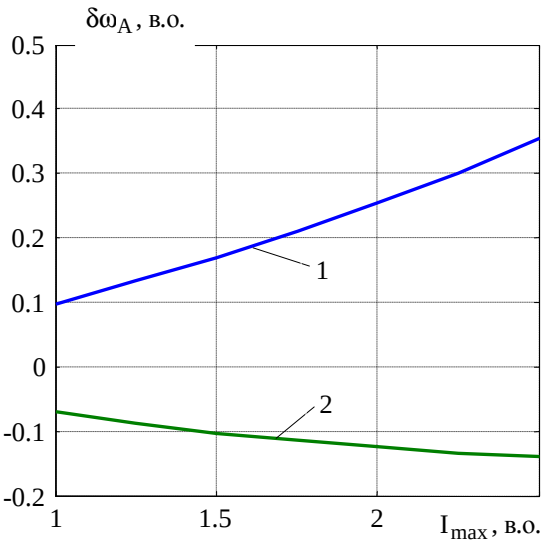


Рисунок 5 – Залежності помилки $\delta\omega_A(I_{max})$ для рушійного (крива 1) та генераторного (крива 2) режимів АД потужністю 1,5 кВт.

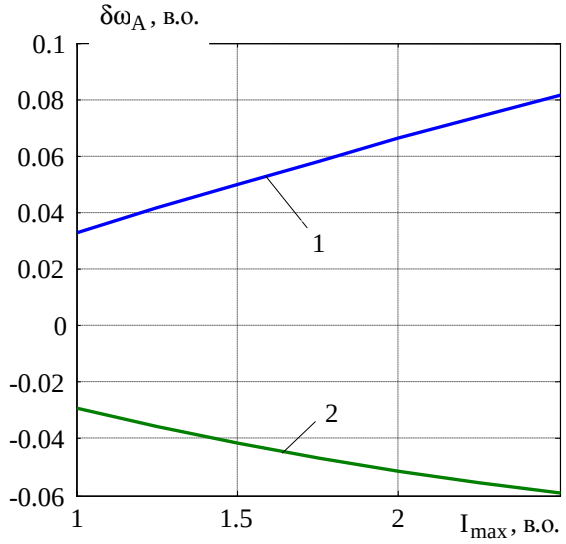


Рисунок 6 – Залежності помилки $\delta\omega_A(I_{max})$ для рушійного (крива 1) та генераторного (крива 2) режимів АД потужністю 30 кВт.

Абсолютні значення відносних помилок межової швидкості для обох АД монотонно зростають при збільшенні I_{max}, причому їх величина та інтенсивність зростання є більшими для рушійного режиму ніж для генераторного. Для АД потужністю 1,5 кВт помилки сягають досить істотних значень – 14% у генераторному та 35% у рушійному режимах при $I_{max} = 2{,}5I_{sn}$. Для двигуна потужністю 30 кВт помилки зменшуються і сягають 6% у генераторному та 8% у рушійному режимах.

Отже, врахування активного опору статора у виразі (11) дозволяє уникнути помилок визначення межової швидкості ω_A, рівень яких може сягати десятків відсотків для АД малої потужності та одиниць відсотків для двигунів великої потужності.

Висновки. 1) Застосування оптимального закону формування потокозчеплення ротора уможливлює істотне збільшення момента АД в зоні високих швидкостей. 2) Залежності межової швидкості, що розділяє зони номінального та оптимального потокозчеплення ротора, від максимального струму статора є більш віддаленими в рушійному та генераторному режимах для двигунів малої потужності, ніж для великої. 3) Врахування опору статора в отриманому аналітичному виразі для межової швидкості дозволяє суттєво зменшити помилки її визначення, причому для двигунів малої потужності більшою мірою, ніж для великої.

Список літератури: 1. *Leonhard W.* Control of electrical drives, Springer Verlag, 1985. – 346 p. **2.** *Bodson M., Chiasson J.N., Novotnak R.T.* A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors // IEEE Trans. on Control Sys.Technol., Vol. 3, No. 4, 1995, pp. 388 -397. **3.** *Wieser R.S.* Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region / Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS, 1997, Vol.1, pp. 401-409. **4.** *Lim S., Nam K.* Loss-minimizing control scheme for induction motors, Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 151, No. 4,. 2004, pp. 385-397. **5.** *Приймак Б.І.* Максимізація момента асинхронного двигуна в зоні високих швидкостей ротора за допомогою генетичного алгоритму / *Б.І. Приймак* // Вісник Нац. техн. ун-ту "Харківський політехн. ін-тут". Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». № 36. 2013. – С. 493-494. **6.** *Приймак Б.І.* Математичні моделі асинхронної машини з врахуванням втрат у залізі / *Б.І. Приймак* // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2005. – № 3 (12). – С. 60-66.

Bibliography (transliterated): 1. Leonhard, W. "Control of electrical drives." *Springer Verlag*, 1985. Print. **2.** Bodson, M., Chiasson, J.N. and Novotnak, R.T. "A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors." *IEEE Trans. on Control Sys.Technol*. 3.4 (1995): 388 -397. Print. **3.** Wieser, R.S. "Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region." *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS* 1 (1997): 401-409. Print. **4.** Lim, S., Nam, K. "Loss-minimizing control scheme for induction motors." *Proc. Inst. Elect. Eng.* 151.4. (2004): 385-397. Print. **5.** Pryymak, B. "Maksimizatsiya momenta asinhronnogo dviguna v zoni visokih shvidkostey rotora za dopomogoyu genetichnogo algoritmu." *Visnik Nats. tehn. un-tu "Harkivskiy politehn. In-tut". Temat. vip. «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika»*, Kharkiv, Ukraine. 36 (2013): 493-494. Print. **6.** Pryymak, B. "Matematichni modeli asinhronnoyi mashini z vrahuvannyam vtrat u zalizi." *Pratsi In-tu elektrodinamiki NAN Ukrayini*, Kyiv, Ukraine, 3 (2005): 60-66. Print.

Надійшла (received) 20.07.2015

УДК 62-83

Д. И. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры АЭМС, ДонГТУ, Лисичанск
Е. С. РУДНЕВ, канд. техн. наук, доц. кафедры АЭМС, ДонГТУ, Лисичанск
И. С. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, проф. кафедры АЭМС, ДонГТУ, Лисичанск

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЦЕПИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение. Расчет пусковых сопротивлений двигателей с нелинейной механической характеристикой рекомендуется производить графическими методами [1]. В частности для расчета пусковых сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя (АД) в учебниках по электроприводу можно найти два приближенных метода с линеарзаицией механической характеристики (МХ) на рабочем участке и построением лучевой диаграммы: с размещением полюса лучевой диаграммы в точке идеального холостого хода; с размещением полюса в точке с положительным значением момента при скорости идеального холостого хода. При линераизации МХ первым методом возможно аналитическое решение с применением известных выражений для расчета пусковых сопротивлений двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ), однако это решение не является точным. Второй метод подразумевает графическое построение лучевой диаграммы с итерационной процедурой определения момента переключения и положения полюса лучевой диаграммы и в [1] назван точным.

С другой стороны, нелинейная МХ асинхронного двигателя имеет известное аналитическое описание. Более того, вариантов ее описания несколько в зависимости от принятых допущений. Наличие описания позволяет разработать методику аналитического расчета пусковых сопротивлений в цепи ротора АД.

Задача. Разработка аналитических методик расчета пусковых сопротивлений в роторной цепи асинхронного двигателя для нормального и форсированного пуска без применения линеаризации механических характеристик.

Решение. Исходными данными являются: параметры естественной МХ (критическое скольжение s_{Ke}, критический момент M_K); число пусковых ступеней n; тип пуска (форсированный или нормальный) с заданным моментом переключения (максимальным M_1 или минимальным M_2) соответственно.

При разработке методики используем описание МХ АД упрощенной формулой Клосса, помня, что критическое скольжение на искусственной характеристике пропорционально полному сопротивлению цепи ротора. Получение выражений для общего случая с числом пусковых ступеней n произведем по индукции, основываясь на выражениях для случая пуска в две ступени $n=2$. Семейство механических характеристик для этого случая приведено на рисунке 1, на котором: «0», «1», «2» – номер искусственной характеристики; «е» – естественная характеристика; s_{12} – скольжение переключения с характеристики 1-й ступени на 2-ю; s_{2e} – скольжение переключения с характеристики 2-й ступени на естественную; M_1, M_2 – моменты переключения; λ_1, λ_2 – относительные моменты переключения, $\lambda_1=\frac{M_K}{M_1}$; $\lambda_2=\frac{M_K}{M_2}$.

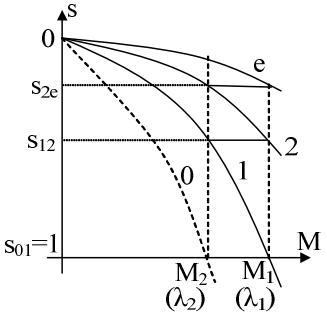


Рис. 1 Семейство пусковых МХ двухступенчатого пуска

При выводе соотношений используем такой же подход, как и для ДПТ с НВ – записывая выражения для скоростей (скольжений) переключения на смежных характеристиках.

Форсированный пуск. Считаем заданным значение максимального момента переключения M_1 или задаемся им из условия $M_1=(0.7\div 0.8)M_K$. Так как сопротивления рассчитываются исходя из критических скольжений на каждой из пусковых характеристик, найдем выражения для s_{Ki}.

Рассчитываем относительный момент переключения

$$\lambda_1=\frac{M_K}{M_1}.$$

Зная λ_1, определяем критическое скольжение на характеристике первой ступени по точке $s=1$

$$s_{K1}=1\cdot\left(\lambda_1+\sqrt{\lambda_1^2-1}\right).$$

Зная s_{Ke}, s_{K1}, n найдем относительный момент переключения – λ_2.

© Д.И. Морозов, Е.С. Руднев, И.С. Шевченко, 2015

Найдем значения скольжений переключения для каждой пары характеристик. Переключение с характеристики 1 на характеристику 2

$$s_{12} = s_{K1}\left(\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}\right),\ s_{12} = s_{K2}\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right). \quad (1)$$

Переключение характеристики 2 на естественную:

$$s_{2e} = s_{K2}\left(\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}\right),\ s_{2e} = s_{Ke}\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right). \quad (2)$$

Рассмотрим (1) и (2) совместно и исключим из них скольжения, при которых происходят переключения. В результате получим

$$s_{K1} = s_{Ke}\left(\frac{\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}}{\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}}\right)^2.$$

В общем случае для n характеристик получим

$$s_{K1} = s_{Ke}\left(\frac{\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}}{\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}}\right)^n. \quad (3)$$

Из полученного выражения найдем λ_2:

$$\lambda_2 = \frac{\left(\sqrt[n]{\frac{s_{Ke}}{s_{K1}}}\right)^2\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right)^2 + 1}{2\cdot\left(\sqrt[n]{\frac{s_{Ke}}{s_{K1}}}\right)\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right)}. \quad (5)$$

Зная λ_1 и λ_2, находим критические скольжения на пусковых ступенях

$$s_{Ki} = s_{Ke}\left(\frac{\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}}{\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}}\right)^{n+1-i}, \quad (6)$$

где i – номер пусковой ступени, $i = 1...n$ (при $i = n+1$ – естественная характеристика, имеем $s_{Ki} = s_{Ke}$).

Зная критические скольжения, находим в общем виде полные сопротивления ротора на пусковых ступенях (R_i) и сопротивления ступеней (r_i):

$$R_i = r_p \frac{s_{Ki}}{s_{Ke}};\ r_i = R_i - R_{(i+1)}. \quad (7)$$

Нормальный пуск. Считаем заданным значение минимального момента переключения M_2 или задаемся им из условия $M_2 = (1.2 \div 1.5)M_c$. Для удобства введем фиктивную «нулевую ступень» (характеристика «0» на рис. 1), которая характеризуется следующими скольжениями: s_{01} – скольжение переключения с характеристики нулевой ступени на 1-ю, $s_{01} = 1$; s_{K0} – критическое скольжение на нулевой характеристике.

Рассчитываем относительный момент переключения

$$\lambda_2 = \frac{M_K}{M_2}.$$

Зная λ_2, определяем критическое скольжение на характеристике нулевой ступени по точке $s = 1$

$$s_{K0} = 1\cdot\left(\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 - 1}\right).$$

Найдем значения скольжений переключения для каждой пары характеристик (на примере двухступенчатого пуска):

$$s_{01} = s_{K0}\left(\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}\right) = s_{K1}\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right);$$

$$s_{12} = s_{K1}\left(\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}\right) = s_{K2}\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right);$$

$$s_{2e} = s_{K2}\left(\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}\right) = s_{Ke}\left(\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}\right).$$

Откуда после последовательных подстановок найдем выражение связи между s_{K0}, s_{Ke}, λ_1, λ_2:

$$\frac{s_{K0}}{s_{Ke}} = \left(\frac{\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 1}}{\lambda_2 - \sqrt{\lambda_2^2 - 1}}\right)^3.$$

В общем случае для n ступеней будем иметь

$$\frac{s_{K0}}{s_{Ke}}=\left(\frac{\lambda_1-\sqrt{\lambda_1^2-1}}{\lambda_2-\sqrt{\lambda_2^2-1}}\right)^{(n+1)}. \qquad (8)$$

Из полученного выражения (8) найдем неизвестное – λ_1. В результате получим

$$\lambda_1=\frac{\left(\sqrt[(n+1)]{\frac{s_{K0}}{s_{Ke}}}\right)^2\left(\lambda_2-\sqrt{\lambda_2^2-1}\right)^2+1}{2\cdot\left(\sqrt[(n+1)]{\frac{s_{K0}}{s_{Ke}}}\right)\left(\lambda_2-\sqrt{\lambda_2^2-1}\right)}.$$

Далее по (6) и (7) находим критические скольжения и сопротивления.

Представим в таблице 1 полученные результаты в виде методик для двух вариантов пуска.

Таблица 1 – Методики расчета пусковых сопротивлений

	Нормальный пуск	Форсированный пуск
Заданный момент переключения	$M_2=(1.2\div1.5)M_c;\ \lambda_2=\frac{M_K}{M_2}$	$M_1=(0.7\div0.8)M_K;\ \lambda_1=\frac{M_K}{M_1}$
	$s_{K0}=1\cdot\left(\lambda_2+\sqrt{\lambda_2^2-1}\right)$	$s_{K1}=1\cdot\left(\lambda_1+\sqrt{\lambda_1^2-1}\right)$
Относительный момент переключения	$\lambda_1=\frac{\left(\sqrt[(n+1)]{\frac{s_{K0}}{s_{Ke}}}\right)^2\left(\lambda_2-\sqrt{\lambda_2^2-1}\right)^2+1}{2\cdot\left(\sqrt[(n+1)]{\frac{s_{K0}}{s_{Ke}}}\right)\left(\lambda_2-\sqrt{\lambda_2^2-1}\right)}$	$\lambda_2=\frac{\left(\sqrt[n]{\frac{s_{Ke}}{s_{K1}}}\right)^2\left(\lambda_1-\sqrt{\lambda_1^2-1}\right)^2+1}{2\cdot\left(\sqrt[n]{\frac{s_{Ke}}{s_{K1}}}\right)\left(\lambda_1-\sqrt{\lambda_1^2-1}\right)}$
Проверка условий для найденного момента переключения	$M_1=\frac{M_K}{\lambda_1};\ M_1<(0.8\div0.9)M_K$	$M_2=\frac{M_K}{\lambda_2};\ M_2>(1.1\div1.2)M_c$
Критические скольжения на пусковых ступенях	$s_{Ki}=s_{Ke}\left(\frac{\lambda_1-\sqrt{\lambda_1^2-1}}{\lambda_2-\sqrt{\lambda_2^2-1}}\right)^{n+1-i}$, i – номер пусковой ступени, $i=1...n$	
Сопротивления: полные (R_i) и ступеней (r_i)	$R_i=r_p\frac{s_{Ki}}{s_{Ke}};\ r_i=R_i-R_{(i+1)}$.	

Сравним результаты расчета сопротивлений, полученные по упрощенной аналитической методике (с полюсом семейства характеристик в точке идеального х.х. – как у ДПТ с НВ) и по разработанной методике на примере АД с параметрами МХ $s_{Ke}=0,3$, $M_K=2,5M_н$ для нормального пуска в 3 ступени ($n=3$) с $M_2=M_н$. Наклон линеаризованной естественной МХ задаем точкой ($2M_K$; s_{Ke}). В результате получим: $M_1=2.021M_н$, $r_1=4.166r_p$, $r_2=2.062r_p$, $r_3=1.021r_p$. По предложенной методике $M_1=1.777M_н$, $r_1=3.993r_p$, $r_2=1.997r_p$, $r_3=0.999r_p$. Сравнивая значения сопротивлений видим, что точная методика дает меньшие их значения. Различие в значениях сопротивлений, рассчитанных по двум методикам, не превышает 5%.

Вывод. Используя упрощенную формулу Клосса получены выражения для моментов переключения при многоступенчатом пуске АД с фазным ротором. Разработаны методики аналитического расчета пусковых сопротивлений в цепи ротора для нормального и форсированного вариантов пуска с учетом нелинейности механической характеристики асинхронного двигателя.

Практическое применение. Более точный расчет сопротивлений, по сравнению с приближенными методами, практически мало применим т.к. сами сопротивления устанавливаются с 10-15% отклонением. В настоящее время, при практически повсеместном применении управляемых преобразователей для обеспечения динамических режимов двигателя, актуальность аналитического метода расчета сопротивлений довольно сомнительна. Однако с точки зрения теории электропривода данный материал представляет определенный интерес. Данная статья может быть полезна при изучении курса «Теория электропривода» хотя бы потому, что в ней показано, что аналитический расчет сопротивлений в цепи ротора с учетом нелинейности МХ АД в принципе возможен и существуют методики такого расчета.

Список литературы: 1. *Вешеневский С.Н.* Характеристики двигателей в электроприводе / *С.Н Вешеневский*. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

Bibliography (transliterated): 1. Veshenevskij S.N. *Harakteristiki dvigatelej v elektroprivode*. Moscow: Energiya, 1977. Print.

Поступила (recieved) 30.06.2015

УДК 621.313

О.М. СІНЧУК, д.т.н., проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет»;
Ю.Г. ОСАДЧУК, к.т.н., доц., ДВНЗ «Криворізький національний університет»;
І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З КОВЗНИМ РЕЖИМОМ ПРИ РОБОТІ НА НИЗЬКІЙ КУТОВІЙ ШВИДКОСТІ

Вступ. За останнє десятиліття значно збільшився попит на застосування електромеханічних систем з бездатчиковим векторним керуванням асинхронними двигунами у виробничих установках та технологічних комплексах [1-4]. Використання бездатчикових систем дозволяє знизити витрати на впровадження, зменшити габаритні розміри приводу, а також є придатним для використання у тяжких промислових умовах. Способи непрямого оцінювання невимірюваних змінних стану приводу у таких системах можна класифікувати на ті, що використовують анізотропії асинхронної машини, та ті, що використовують її ідеалізовану математичну модель.

Способи, що використовують анізотропії асинхронної машини, базуються на знаходженні просторового положення вісі насичення головної індуктивності машини, асиметрії пазів ротора або зміни індуктивності розсіяння для знаходження поточного положення ротора [5-6]. Дана група способів використовують складні алгоритми обробки сигналів та вимагають використання потужних мікропроцесорних засобів.

Оскільки у попередні періоди розвитку бездатчикових систем рівень розвитку обчислювальних засобів не дозволяв використовувати способи, що базуються на анізотропіях машини, то використовувався більш простий підхід до оцінювання невимірюваних змінних стану, що полягав у використанні ідеалізованої математичної моделі двигуна. Найбільш суттєвим недоліком даного рішення є чутливість до зміни параметрів схеми заміщення під час роботи, що пов'язано з нагрівом, зміною властивостей сталі і т.д. При роботі на низьких кутових швидкостях найбільшу роль відіграють коливання значення активного опору статорних обмоток машини. Визначення даної величини під час попереднього тестування машини при налаштуванні приводу має недостатню точність для подальшого використання, оскільки невідповідність між встановленим та реальним значенням може призвести до втрати стійкості при переході на низьку кутову швидкість.

У [7] представлена адаптивна система з задаючою моделлю, що використовує паралельне оцінювання величини кутової швидкості та активного опору статорних обмоток за рахунок оцінювання як фазної, так і амплітудної помилки між вихідними сигналами незалежних моделей. Проте, активний опір статора – не єдиний параметр, що суттєво змінюється під час роботи машини. Наприклад, зміна активного опору роторних обмоток призводить до помилки у оцінюванні кутової швидкості при роботі у широкому діапазоні її зміни. На відміну від активного опору статорної обмотки, одночасне оцінювання величин кутової швидкості та опору роторних обмоток є можливим лише за умови зміни величини роторного потокозчеплення, що робить неможливим таку ідентифікацію в усталених режимах роботи [1, 3]. В даному випадку існуючі рішення [7-8] передбачають допущення щодо незмінності величини індуктивності роторних обмоток, що дозволяє виконувати визначення зміни роторного опору у відповідності зі зміною сталої часу роторного ланцюга. Введення малих тестових сигналів до статорного струму двигуна дозволяють адаптивній системі з задаючою моделлю визначати поточне значення сталої часу роторного кола.

Одночасно з розвитком адаптивних систем з задаючою моделлю були розроблені нові способи оцінювання, що базуються на існуючих алгоритмах визначення кутової швидкості, проте здатні покращити динамічні властивості системи, стійкість до впливу перешкод на вимірювальні канали, а також підвищити чутливість до зміни параметрів схеми заміщення. До них відноситься використання нелінійних спостерігачів повного порядку [8], розширеного фільтру Калмана [9] та спостерігачів з ковзним режимом [10]. Синтез нелінійних спостерігачів повного порядку полягає у визначенні коефіцієнтів матриці зворотного зв'язку, при яких система є стійкою у широкому діапазоні зміни кутових швидкостей. Спостерігачі, що використовують розширений фільтр Калмана, відрізняються здатністю збереження працездатності за умови наявності значних перешкод у вимірювальних каналах системи. У [9] представлено електромеханічну систему з використанням двох розширених фільтрів Калмана, що використовуються у послідовно-перехресній схемі. Це дозволяє значно підвищити точністю оцінювання активних опорів статорної та роторної обмоток, проте відсутність чітких критеріїв налаштування матриць фільтрів Калмана знижує привабливість такого рішення для впровадження у електроприводах, що серійно випускаються.

Мета дослідження. Розробка теоретичних аспектів синтезу способів непрямого оцінювання величин кутової швидкості та потокозчеплення ротора при роботі на низьких кутових швидкостях, що дозволяє зменшити чутливість до зміни параметрів схеми заміщення машини.

Матеріали дослідження. Математична модель асинхронного двигуна у системі координат $\alpha\beta$, що є нерухомою відносно статора, через складові векторів статорного струму та потокозчеплення ротора може бути записана наступним чином:

© О.М. Сінчук, Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, 2015.

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}\right) i_{s\alpha} + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}\psi_{r\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\psi_{r\beta}\omega + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha};$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}\right) i_{s\beta} + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}\psi_{r\beta} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\psi_{r\alpha}\omega + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta};$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}\omega;$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{r\beta} + \psi_{r\alpha}\omega,$$

де R_s, R_r -- активні опори статорної та роторної обмоток; L_s, L_r -- індуктивності обмоток статора і ротора; L_m -- взаємна індуктивність статорної та роторної обмоток; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ -- складові вектору струму статора двигуна; $\psi_{r\beta}$, $\psi_{r\beta}$ -- складові вектору потокозчеплення ротора; ω -- кутова швидкість ротора; σ -- коефіцієнт розсіяння двигуна.

Спостерігач з ковзним режимом другого порядку у найпростішій формі може бути записаний так:

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = f(\hat{x}_2) + k_1\sqrt{|x_1 - \hat{x}_1|}\cdot sign(x_1 - \hat{x}_1) + z_1;$$

$$\frac{d\hat{x}_2}{dt} = k_2 \cdot sign(x_1 - \hat{x}_1) + z_2,$$

де x_1, x_2 -- змінні стану системи; k_1, k_2 -- коефіцієнти підсилення перемикаючих функцій; z_1, z_2 -- складові сигналу збурення.

Виконаємо перетворення вихідних рівнянь наступним чином:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{s\alpha} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha};$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} i_{s\beta} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta};$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}\omega;$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{r\beta} + \psi_{r\alpha}\omega$$

Тоді спостерігач другого порядку може бути записаний так:

$$\frac{d\hat{i}_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s}\hat{i}_{s\alpha} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} + k_1\sqrt{|i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}|}\cdot sign(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}); \quad (1)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} = k_2 \cdot sign(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}); \quad (2)$$

$$\frac{d\hat{i}_{s\beta}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s}\hat{i}_{s\beta} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta} + k_3\sqrt{|i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}|}\cdot sign(i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}); \quad (3)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} = k_4 \cdot sign(i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}), \quad (4)$$

де $\hat{i}_{s\alpha}$, $\hat{i}_{s\beta}$, $\hat{\psi}_{r\beta}$, $\hat{\psi}_{r\beta}$ -- розраховані значення (оцінювання) відповідних величин; k_1, k_3 -- коефіцієнти підсилення головного спостерігача з ковзним режимом; k_2, k_4 -- коефіцієнти підсилення допоміжного спостерігача з ковзним режимом.

Оскільки рівняння (1) – (2) та (3) – (4) є незалежними, то дослідження впливу збурень на роботу спостерігача з ковзним режимом можна дослідити окремо для кожної вісі нерухомої відносно статора системи відліку. У такому випадку за умови зміни параметрів об'єкту керування систему рівнянь спостерігача можна записати так:

$$\frac{d\hat{i}_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s}\hat{i}_{s\alpha} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} + k_1\sqrt{|i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}|}\cdot sign(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) + z_1;$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} = k_2 \cdot sign(i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) + z_2$$

В даному випадку збурення, що викликане зміною параметрів статорного кола відображається величиною z_1, а зміна параметрів роторного кола -- z_2. Згідно з теорією спостерігачів з ковзним режимом, для будь-якого значення $\varepsilon > 0$ існують коефіцієнти підсилення k_1 та k_2 при яких оцінювання, що здійснюється спостерігачем, буде стійким за умови обмеження сигналів збурення $|z_2| < \varepsilon$. При цьому слід зазначити, що спостерігач є чутливим до величини z_1, що формується за рахунок зміни статорного опору обмоток двигуна. Визначення величини активного опору статора є дуже важливим при роботі на низькій кутовій швидкості, оскільки наявність розбіжності між реальним значенням опору та тим, що використовується у системі керування, може призвести не тільки до виникнення помилки в оцінюванні кутової швидкості, а й до втрати стійкості. Отже, для використання даного способу оцінювання в системах з широким діапазоном регулювання вимагає застосування додаткових засобів для ідентифікації величини статорного опору. В той же час слід зазначити, що інтенсивність зміни статорного опору є значно нижчою в порівнянні зі зміною струмів, напруг та потокозчеплень машини, тому для оцінювання за допомогою спостерігача з ковзним режимом можна вважати, що статорний опір є постійним. Таким чином, використання спостерігача другого порядку дозволяє досягнути нечутливості до зміни роторного опору обмоток машини, але залишається чутливим до зміни статорного опору.

Оцінювання кутової швидкості на основі адаптивної системи з задаючою моделлю передбачає використання двох моделей машини з різними структурами для визначення аналогічних змінних стану системи. В якості вихідних сигналів моделей використовуються складові вектору роторного потокозчеплення, протиЕРС, реактивна потужність і т.д. При виборі складових вектору потокозчеплення ротора сигнал помилки системи розраховується наступним чином:

$$\varepsilon = \psi_{r\alpha 2}\psi_{r\beta 1} - \psi_{r\beta 2}\psi_{r\alpha 1}$$

Таким чином, сигнал помилки формується на основі кутової різниці двох оцінок векторів потокозчеплення, що отримані в різних моделях.

Оскільки значення похідних складових вектору роторного потокозчеплення були отримані за допомогою спостерігача з ковзним режимом, то необхідно синтезувати механізм адаптації кутової швидкості на основі цих величин.

У матричній формі рівняння складових роторних потокозчеплень асинхронного двигуна, що називаються струмовою моделлю, можуть бути записані так:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Для величин, що є оцінками відповідних змінних дана система рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\hat{\omega} \\ \hat{\omega} & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Виконуючи віднімання (6) від (5):

$$\begin{bmatrix} \frac{d(\psi_{r\alpha} - \hat{\psi}_{r\alpha})}{dt} \\ \frac{d(\psi_{r\beta} - \hat{\psi}_{r\beta})}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} - \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} - \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} - \Delta\omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix}$$

Для бездатчикового оцінювання кутової швидкості можна вважати, що вихід задаючої моделі адаптивної системи відповідає реальним значенням складових вектору потокозчеплення ротора. Тоді:

$$\hat{\omega} = \left(K_n + \frac{K_i}{s}\right) \begin{bmatrix} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \end{bmatrix} = \left(K_n + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} - \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \right)$$

Порівнюючи структуру отриманої адаптивної системи з задаючою моделлю з існуючою, можна відзначити, що синтезована система не містить операцій чистого інтегрування, що спрощує реалізацію та дозволяє усунути проблеми, що пов'язані з невизначеністю початкових умов та дрейфом нуля інтеграторів.

Як вже було сказано раніше, точність визначення статорного опору двигуна значним чином впливає на показники якості керування кутовою швидкістю при роботі в зоні низьких швидкостей. Тому розроблена система бездатчикового керування має підсистему ідентифікації статорного опору. Розглянемо вираз для складових роторного потокозчеплення, що має назву «напружної» моделі:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_m}{L_r}\left(\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} - \left(R_s \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \sigma L_s \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}\right)\right)$$

Для величин, що є оцінками відповідних змінних дана система рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{L_m}{L_r}\left(\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} - \left(R_s \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix} + \sigma L_s \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix}\right)\right)$$

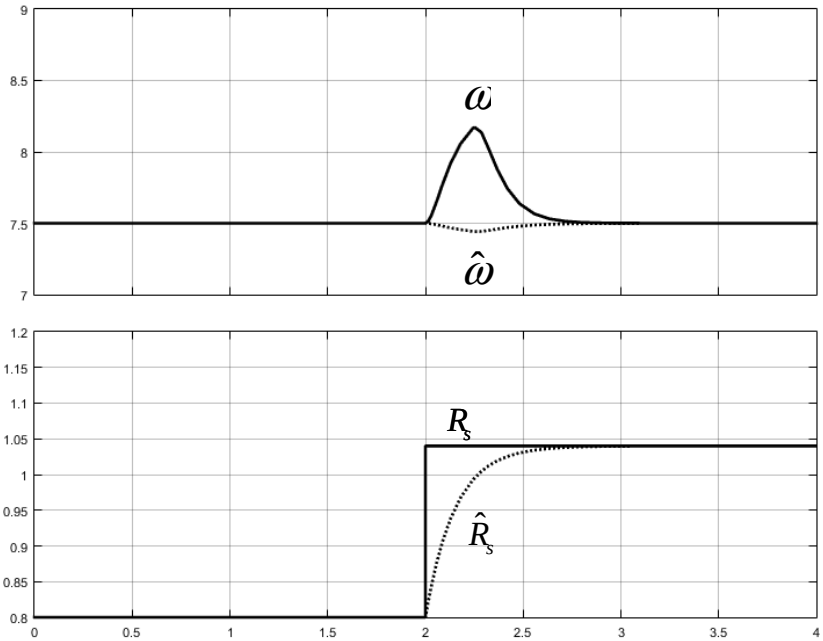


Рис. 1. Результати моделювання системи частотно-керованого електроприводу з представленим способом бездатчикового визначення невимірюваних змінних стану

Вважаючи, що вектор виміряного струму еквівалентний до оцінки вектору струму статора, що забезпечується роботою спостерігача з ковзним режимом, сигнал помилки можна записати так:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{\Delta R_s L_m}{L_r} i_{s\alpha}$$

В такому випадку оцінка величини статорного опору здійснюється за допомогою ПІ-регулятора наступним чином:

$$\hat{R}_s = -\left(K_n + \frac{K_i}{s}\right)\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = -\left(K_n + \frac{K_i}{s}\right)\left(i_{s\alpha}\left(\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt}\right) + i_{s\beta}\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt}\right)$$

З метою аналізу роботи розробленої системи була розроблена математична модель частотно-керованого електроприводу. Моделювання виконувалося для умови роботи з низькою кутовою частотою при стрибкоподібній зміні величини активного опору статора двигуна на 30%. З наведених результатів (рис. 1) видно, що помилка регулювання кутової швидкості зменшується по мірі того, як адаптивна система підлаштовує значення активного опору під його реальну величину.

Висновки. Представлений спосіб бездатчикового визначення величин кутової швидкості та складових вектору потокозчеплення ротора є комбінацією спостерігача струму з ковзним режимом другого порядку, а також адаптивної системи з задаючою моделлю, здатний враховувати зміну величини активного опору обмоток статора, оскільки відхилення налаштування даного параметру у системі керування від його реального значення може призводити до суттєвого погіршення показників якості керування при роботі на низькій кутовій швидкості або навіть втрати стійкості. Дослідження системи шляхом математичного моделювання та експерименту підтвердили здатність отримання оцінки невимірюваних змінних приводу з необхідною точністю навіть в умовах відхилення параметрів схеми заміщення, що використовуються у системі керування, від їх реальних значень.

Список літератури: **1.** Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с. **2.** Козярук А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков; под общ. руд. А.Г. Народицкого. С-Петербург, 2001. – 126 с. **3.** Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Онанко А.Ю., Воронко А.Б. Робастное косвенное векторное управление скоростью асинхронного двигателя с ориентацией по вектору потокосцепления статора: теоретический анализ и результаты экспериментального тестирования // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 4/2014 (28). – С. 10-17. **4.** Пересада С.М., Дымко С.С. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 16-20. **5.** Gao Q., Turner L., Colby R.S. A frequency demodulation approach to induction motor speed detection // IEEE Transactions on Industry Applications, № 47/4, pp. 1632-1642, 2011. **6.** Gao Q., Asher G., Sumner M. Sensorless position and speed control of induction motors using high-frequency injection and without offline precommissioning // IEEE Transactions on Industry Electronics, №54/5, pp. 2474-2481. **7.** Vasic V., Vukosavic S.N., Levi E. A stator resistance estimation scheme for speed sensorless rotor flux oriented induction motor drives // IEEE Transactions on Energy Conversion, №18/4, pp. 476-483, 2003. **8.** Kyo-Beum L., Blaabjerg F. Reduced-order extended Luenberger observer based sensorless vector control driven by matrix converter with nonlinearity compensation // IEEE Transactions on Industry Electronics, № 53/1, pp. 66-75, 2005. **9.** Barut M., Bogosyan S., Gokasan M. Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors // IEEE Transactions on Industry electronics, 2008. **10.** Пересада С.М., Трандафилов В.Н. Метод синтеза и робастность наблюдателей потокосцепления асинхронного двигателя, работающих в скользящих режимах // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» науково-виробничого журналу. Кременчук: КрНУ. – Вип. 3/2012 (19), с. 40-45, 2012.

Bibliography (transliterated): 1. Sokolovskyi, G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem*. Moscow: Academia, 2006. Print. **2.** Kozyaruk, A. and Rudakov, V. *Sovremennoe i perspektivnoe algoritmicheskoe obespechenie chastotno-reguliruemykh elektroprivodov*. Sankt-Peterburg, 2001. Print. **3.** Peresada, S.M., Kovbasa S.N., Onanko, A.Y. and Voronko, A. "Robust stator field oriented indirect vector control of induction motor speed theoretical analysis and experimental investigations results", *Elektromekhanichni ta energozberihayuchi systemy*, Vol. 4, pp. 10-17. 2014. Print. **4.** Peresada, S.M. and Dymko, S.S. "Direct vector control of torque of induction motors with maximization of relation torque-current", *Elektromekhanichni ta energozberihayuchi systemy*, Vol. 3, pp. 16-20, 2011. Print. **5.** Gao, Q., Turner, L. and Colby, R.S. "*A frequency demodulation approach to induction motor speed*", // IEEE Transactions on Industry Applications, № 47/4, pp. 1632-1642, 2011. **6.** Gao, Q., Asher, G. and Sumner, M. "*Sensorless position and speed control of induction motors using high-frequency injection and without offline precommissioning*" IEEE Transactions on Industry Electronics, №54/5, pp. 2474-2481. **7.** Vasic, V., Vukosavic, S.N. and Levi, E. "*A stator resistance estimation scheme for speed sensorless rotor flux oriented induction motor drives*", IEEE Transactions on Energy Conversion, №18/4, pp. 476-483, 2003. **8.** Kyo-Beum, L. and Blaabjerg, F. "Reduced-order extended Luenberger observer based sensorless vector control driven by matrix converter with nonlinearity compensation", IEEE Transactions on Industry Electronics, № 53/1, pp. 66-75, 2005. **9.** Barut, M., Bogosyan, S. and Gokasan, M. Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors // IEEE Transactions on Industry electronics, 2008. **10.** Peresada, S.M. and Trandafilov, V.N. "Method for synthesis and robustness of flux observers for induction motors with sliding modes", *Elektromekhanichni ta energozberihayuchi systemy*, Vol. 3, pp. 40-45., 2012.

Надійшла (received) 25.08.2015

УДК 621.771.06:233.2

Н. А. ЗАДОРОЖНИЙ, канд. техн. наук, доц., доцент каф. ЭСА, ДГМА, Краматорск;
И. Н. ЗАДОРОЖНЯЯ, канд. техн. наук, доц., доцент каф. ЭСА, ДГМА, Краматорск.

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ АСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С ЗАДАННОЙ СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ И МИНИМАЛЬНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТЬЮ

Введение. При проектировании современных и модернизированных действующих электроприводов основной задачей является точное воспроизведение заданных законов движения исполнительных органов машины и ограничение динамических нагрузок. Для электроприводов, работающих в режиме стабилизации скорости, применяются двухкратноинтегрирующие системы автоматического управления (САУ). При возмущении по нагрузке такие САУ обеспечивают нулевой статизм и являются астатическими. Отработка возмущающих и управляющих воздействий астатической САУ сопровождается возбуждением в электромеханической системе (ЭМС) привода технологических машин упругих механических колебаний. Колебания координат электропривода приводят к отклонению переходных процессов от предписанных технологией и способствуют росту дополнительных динамических нагрузок на электрическое и механическое оборудование. Известны научно-исследовательские работы по ограничению, подавлению фильтрацией и компенсации влияния упругих механических колебаний в электроприводе, но для астатических систем автоматического управления двухмассового электропривода вопросы синтеза остаются актуальными.

Постановка задачи. При выборе параметров регуляторов при настройке контуров регулирования оптимизируется колебательность привода на основании статизма моментной характеристики $\omega = f(M)$ и типовые настройки контуров регулирования приводов постоянного и переменного тока осуществить невозможно [1, 2].

Задачи синтеза таких систем автоматического управления при существенном влиянии упругих звеньев электромеханических систем решаются на основании общих принципов формирования переходных характеристик [3, 4]. Если исходить из практической целесообразности, то на основании принципа электромеханической совместимости [5] при существенном влиянии упругих механических колебаний возможно осуществить синтез параметров астатической САУ заданной степени устойчивости и минимума колебательности ЭМС.

Динамические свойства двухмассовой механической части характеризуются частотой свободных колебаний и коэффициентом распределения инерционных масс

$$\Omega_{12}=\sqrt{C_{12}\frac{(T_{M1}+T_{M2})}{T_{M1}T_{M2}}}, \tag{1}$$

$$\gamma=\frac{(T_{M1}+T_{M2})}{T_{M1}}. \tag{2}$$

Задача решается применительно к электроприводам постоянного и переменного тока при линеаризации характеристик двигателя и элементов САУ, учете ограничений по перегрузочной способности двигателя, при допущении отсутствия трения в механических передачах и движения без размыкания зазоров.

Материалы исследований. При высоком быстродействии контура тока (момента) и при условии $T_y >> T_\mu$ [2] при использовании пропорционально-интегрального регулятора скорости с $\tau >> T_\mu$ [6] для ЭМС с $1{,}05 < \gamma < 1{,}5$ передаточная функция контура регулирования тока (момента) для относительных единиц представляется

$$W_{KT}(p)=1{,}0\,, \tag{3}$$

где $T_y = 1 / \Omega_{12}$ – постоянная времени упругих колебаний; T_μ – малая некомпенсируемая постоянная времени; τ – постоянная интегрирования регулятора скорости.

Структурная схема с учетом допущений для общепринятых обозначений приведена на рис. 1. Структурная схема линеаризованной ЭМС определена следующими параметрами: $T_{M1} = J_1\omega_H / M_H$ – механическая постоянная времени первой масс электромагнитной подсистемы; $T_{M2} = J_2\omega_H / M_H$ – механическая постоянная времени первой масс электромагнитной подсистемы; $T_C = 1 / c_{12}$ – постоянная времени, характеризующая упругость звеньев механической передачи; $c_{12} = C_{12}\omega_H / M_H$ – относительное значение коэффициента жесткости упругого звена двухмассового электропривода; $K_{РС}$ – коэффициент усиления пропорциональной части пропорционально-интегрального регулятора скорости; τ – постоянная времени интегрирования регулятора скорости астатической САУ.

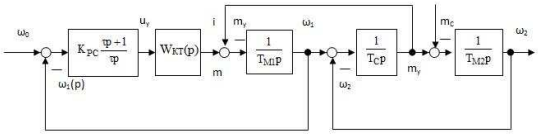


Рис. 1 Структурная схема астатической САУ

САУ двухмассовым электроприводом на основании процедуры разделения ЭМС [3, 5] представим в виде двух отдельных (парциальных) подсистем – упругой механической подсистем (МП) и связанной с ней электромагнитной подсистемой (ЭП). МП при допущении отсутствия диссипативных элементов $\xi_{МП}=\xi_{12}=0$ обладает свойствами консервативного звена с передаточной функцией

© Задорожний Н.А., Задорожняя И.Н., 2015

$$W_{МП}(p)=\frac{1}{T_y^2 p^2+1}, \tag{4}$$

где $T_y = 1/\Omega_{12}$, а Ω_{12} определена в (1).

ЭП при указанных допущениях и учете (3) аппроксимируется колебательным звеном с передаточной функцией

$$W_{ЭП}(p)=\frac{K_{PC}(\tau p+1)}{T_{M1}\tau p^2+\tau K_{PC} p+K_{PC}}, \tag{5}$$

которое для канонической формы характеризуется в динамике частотой свободны колебаний

$$\Omega_{ЭП}^2(p)=\frac{K_{PC}}{T_{M1}\tau} \tag{6}$$

и, соответственно, коэффициентом демпфирования

$$\xi_{ЭП}=\xi_Д=\frac{1}{2}\frac{\sqrt{K_{PC}\tau}}{T_{M1}} \tag{7}$$

Для анализа процессов демпфирования упругих механических колебаний достаточно рассмотреть свободное движение полной (составной) ЭМС при связанности подсистем, которое описывается характеристическим уравнением

$$Q(p)=\gamma T_{M1}\tau T_y^2 p^4+\gamma K_{PC}\tau T_y^2 p^3+\gamma(T_{M1}\tau+K_{PC}T_y^2)p^2+K_{PC}\tau p+K_{PC}=0 \tag{8}$$

Анализ характеристического уравнении в форме абсолютных величин параметров (8) оказывает, что в электродвигателе системы осуществляется связь механического движения привода (4) с электрическими процессами в системе автоматического управления (5) и наоборот [7]. Усиление электромеханической связи в астатической САУ осуществляется посредством оптимизации динамической жесткости механической характеристики $\omega = f(M)$ и проявляется на способности электропривода демпфировать упругие механические колебания при восстановлении отклонения скорости двигателя в динамике при приложении и сбросе нагрузки (с нулевой ошибкой). Существенность электромеханической связи определяется «близостью» друг друга частот парциальных ЭП и МП, когда колебания МП «раскачивают» ЭП и в результате эффекта взаимодействия энергия упругих колебаний из МП целиком (без остатка) отводится ЭП [8].

При взаимодействии парциальные частоты в зависимости от преобладающего вида связи (упругая или инерционная) [8] «раздвигаются» или «сближаются». Формально это необходимое условие оценки степени взаимодействия подсистем можно записать в виде [5]

$$\Omega_{12}^2=K_B\Omega_{ЭП}^2, \tag{9}$$

где K_B – коэффициент электромеханического взаимодействия и квадраты частот взяты для избавления от радикалов в записи параметров, а физически оценивают энергетику процесса отвода и преобразование энергии колебаний.

Критерий (9) близости по существу отражает условие связанности и существенности взаимодействия подсистем. Характер процессов отвода и преобразования энергии упругих колебаний в ЭП – как реакции на возбуждение колебаний – должен быть таким, чтобы исключить переход энергии в обратном направлении (от ЭП к МП). Это условие (достаточное) требует и строго определенной скорости затухания колебаний – при «раскачивании» ЭП со стороны МП колебания в ЭП должны затухнуть не ранее и не позднее момента полного извлечения энергии упругих колебаний из МП. Физически это означает, что в таком особом случае время отвода энергии из МП в точности соответствует времени ее преобразования в ЭП. Это условие диктует временные (фазовые) соотношения в процессах взаимодействия подсистем при колебаниях.

Скорость затухания характеризуется относительным коэффициентом затухания

$$\xi_{ЭП}=\xi_Д=\frac{\alpha_{ЭП}}{\Omega_{ЭП}}. \tag{10}$$

Обобщенные показатели (9), (10) процессов электромеханического взаимодействия с оптимальным демпфированием упругих колебаний в ЭМС можно выразить через параметры ЭП и МП, которые приняты в качестве исходных

$$\begin{cases} K_B=\dfrac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{ЭП}^2}=\tau\dfrac{T_{M1}}{K_{PC}T_y^2}; & (11) \\ \xi_Д=\dfrac{\alpha_{ЭП}}{\Omega_{ЭП}}=\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{K_{PC}\tau}{T_{M1}}}. & (12) \end{cases}$$

При совместном рассмотрении (11) и (12) устанавливаются соотношения взаимосвязи параметров исходной структурной схемы с обобщенными показателями процессов электромеханического взаимодействия

$$\begin{cases} \tau=2\sqrt{K_B}\xi_Д T_y; & (13) \\ \dfrac{T_{M1}}{K_{PC}}=\dfrac{\sqrt{K_B}T_y}{2\xi_Д}. & (14) \end{cases}$$

Практическая ценность полученных соотношений заключается в том, что установлена взаимосвязь параметров ЭП и МП в форме обобщенных показателей и соотношения позволяют осуществить выбор оптимальных по критерию затухания параметров в функции $K_В$ и $\xi_Д$.

Если учесть форму нормирования по обобщенным показателям (11), (12) характеристического уравнения ЭМС (8), его можно представить в следующем виде

$$Q(p)=\gamma K_В T_y^4 p^4+2\gamma\sqrt{K_В}\xi_Д T_y^3 p^3+\gamma(1+K_В)T_y^2 p^2+2\sqrt{K_В}\xi_Д T_y p+1=0\ . \quad (15)$$

Характер процессов демпфирования упругих механических колебаний определяется распределением корней уравнения (15), которое формируется в зависимости от обобщенных показателей $K_В$, $\xi_Д$ и γ. Постоянная времени T_y является масштабом длительности переходных процессов. Обобщенные показатели имеют физический смысл, имеют граничные значения для того или иного класса электроприводов, упрощают анализ характеристического уравнения и позволяют судить о динамических качествах полной ЭМС (15) по свойствам отдельных подсистем и видам связи между ними (11), (12).

Из уравнения (15) также следует, что ЭМС не имеет чисто мнимых корней и при $\gamma > 1{,}0$, $\xi_Д > 0$, $K_В > 0$ обладает значительным запасом устойчивости. В результате электромеханического взаимодействия МП утрачивает свойства недемпфированного колебательного звена (4) и в общем случае с учетом свойств ЭП отвода и преобразования энергии колебаний МП с рассеянием или возвратом в сеть процессы в ЭМС можно представить в практическом плане характеристическим уравнением эталонного вида

$$Q(p)=(T_0^2 p^2+2\xi_Э T_0 p+1)(T_0^2 p^2+2\xi_М T_0 p+1)=0\ . \quad (16)$$

Уравнение (16) описывает реальные процессы отвода и преобразования энергии в системе с вносимым демпфированием $\xi_М$ при взаимодействии колебательных звеньев фактически при неполной тождественности, когда $\xi_М \neq \xi_Э$. Так как в качестве исходной парциальной подсистемы принимается консервативная МП ($\xi_{12} = 0$), то «вносимое» в ЭМС со стороны ЭП демпфирование ($0 < \xi_М < 1{,}0$) в результате эффекта взаимодействия (для такого неблагоприятного варианта) будет являться количественной оценкой степени затухания упругих механических колебаний за счет демпфирующего действия собственно электропривода.

Реализация процессов демпфирования упругих механических колебаний эталонного вида (16) возможна в полной ЭМС, когда в нормированном уравнении (15) выбором параметров обеспечивается

$$K_В=\gamma\quad , \quad (17)$$

и в ЭМС будут происходить колебания одной частоты

$$\Omega_{ЭО}=\Omega_{МО}=\Omega_0\quad , \quad (18)$$

которое можно выразить через постоянную времени

$$T_0=1/\Omega_0=\sqrt{\gamma}T_y\ . \quad (19)$$

Последовательная декомпозиция характеристического уравнения (15) в виде (16) требует выполнения соотношений для необратимого преобразования энергии

$$\begin{cases}\xi_Э+\xi_М=\xi_Д; & (20)\\ \xi_Э\xi_М=\dfrac{(\gamma-1)}{4}. & (21)\end{cases}$$

Все условия (17)-(21) получены из сопоставления коэффициентов при соответствующих степенях характеристического нормированного и эталонного уравнений.

При оптимизации нас естественно интересует вносимое демпфирование $\xi_М$, и с целью нахождения экстремума функции демпфирующего действия электропривода производим анализ системы уравнений (20), (21). Если выразить из (20) коэффициент демпфирования процессов $\xi_Э$ в связанной ЭП (в составе ЭМС) и произвести подстановку в (21) получим следующее уравнение одной переменной

$$\xi_Д\xi_М-\xi_М^2=\frac{(\gamma-1)}{4}\ . \quad (22)$$

Для удобства анализа обозначим функцию вносимого демпфирования в зависимости от параметров ЭП и МП в виде

$$F(\xi_М)=-\xi_М^2+\xi_Д\xi_М-\frac{(\gamma-1)}{4}\ . \quad (23)$$

и исследуем ее на экстремум.

Функции $F(\xi_М)$ определена в области параметров ЭМС

$$\begin{aligned}0<\xi_Д<2{,}0;\\ 1{,}0<\gamma\le 5{,}0\ .\end{aligned} \quad (24)$$

Границы изменения параметров (24) соответствуют физическим соображениям о характере процессов в особом случае (20), (21) и необратимого преобразования отвода энергии при колебаниях – $0 < \xi_М < 1{,}0$ и $0 < \xi_Э < 1{,}0$. Тогда первая производная функции (23)

$$F^{(\xi_М)}=-2\xi_М+\xi_Д\ , \quad (25)$$

а значения переменной $\xi_М$ при которых функция (23) имеет экстремум (минимум или максимум) находится из условия [9] равенства ее производной (25) нулю

$$-2\xi_M+\xi_Д=0\ . \tag{26}$$

Величины возможных коэффициентов демпфирования (вносимого в МП), при которых функция достигает экстремума, находим из (26)

$$\xi_M=\frac{1}{2}\xi_Д\ . \tag{27}$$

Вторая производная функции (23) определяется основании (25) и имеет значение

$$F^{//}(\xi_M)=-2 \tag{28}$$

Анализ поведения функции $F(\xi_M)$ вблизи корня (27) показывает, что она меняет знак с положительного на отрицательный, поэтому при отрицательном значении (28) второй производной квадратичная функция имеет экстремум – максимум.

Подстановка $\xi_М$ из (27) в уравнение (22) определяет оптимальную величину коэффициента демпфировании отдельной (парциальной) ЭП, которая определяет ординату вершины параболы $F(\xi_M)$

$$\xi_Д=\sqrt{\gamma-1}\ . \tag{29}$$

Искомая зависимость величины вносимого демпфирования $\xi_М$ в экстремальном случае гашения электроприводом упругих механических колебаний определяется как результат подстановки (29) в (27) и имеет следующий вид

$$\xi_M=\frac{1}{2}\sqrt{\gamma-1}\ . \tag{30}$$

Из системы уравнений (20), (21) при подстановке найденного при исследовании на экстремум функции (23) коэффициента «вносимого» демпфирования $\xi_М$ (30) для области значений параметра γ (30) получаем выражение для коэффициента демпфирования колебаний в ЭП для предельного случая максимума затухания упругих колебаний

$$\xi_Э=\frac{1}{2}\sqrt{\gamma-1} \tag{31}$$

Выводы. Полученные результаты исследования показывают, что максимум демпфирующего эффекта электропривода при астатическом регулировании достигается при соблюдении соотношений для обобщенных показателей

$$\begin{cases} K_B=\gamma\ ; \\ \xi_Д=\sqrt{\gamma-1}\ . \end{cases} \tag{32}$$

Для экстремального случая (32) максимума демпфирующего эффекта электропривода определим влияние параметров ЭМС на степень устойчивости и колебательность (при астатическом регулировании). С этой целью находим корни характеристического уравнения (16)

$$p_{1,2}=p_{3,4}=-\alpha\pm j\,\beta=-\frac{\sqrt{\gamma-1}}{2}\cdot\frac{1}{\sqrt{\gamma}\,T_y}\pm j\,\frac{\sqrt{5-\gamma}}{2\sqrt{\gamma}\,T_y}\ . \tag{33}$$

Степень устойчивости ЭМС физически означает способность электропривода рассеять (преобразовать) энергию упругих колебаний и для комплексно-сопряженных кратных корней (33) определяется в виде соотношения

$$\eta_0=|\alpha_{min}|=\frac{\sqrt{\gamma-1}}{2}\cdot\frac{1}{\sqrt{\gamma}\,T_y}=\frac{\sqrt{\gamma-1}}{2}\cdot\frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}}\ . \tag{34}$$

Колебательность ЭМС в экстремальном случае демпфирования упругих колебаний при астатическом регулировании как следует из (33)

$$\mu_0=\left|\frac{\beta}{\alpha}\right|=\sqrt{\frac{5-\gamma}{\gamma-1}}\ . \tag{35}$$

Заданная степень устойчивости (34) и минимальна колебательность координат ЭМС (35) достигается при колебаниях одной частоты

$$\Omega_0=\frac{1}{2}\sqrt{\gamma-1}\cdot\frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}}\ . \tag{36}$$

Сравнение показателей (34), (35), (36) астатической системы автоматического управления и показателей при регулировании процессов в статической САУ показывает, что предельное демпфирование в астатической САУ достигается при частоте в $\sqrt{\gamma}$ раз ниже. Это обстоятельство практически расширяет диапазон возможных оптимальных параметров при синтезе САУ облегчает реализацию в системе демпфирующих свойств электропривода при упругих механических колебаниях.

Обеспечить показатели процессов демпфирования упругих колебаний для экстремального (предельного) случая можно за счет выбора параметров (13, (14). При подстановке оптимальных величин обобщенных показателей (32) в соотношения взаимосвязи параметров (13), (14) дает следующие зависимости для настройки регуляторов САУ:

– регулятор скорости

$$K_{PC}=\frac{2T_{M1}}{T_y}\cdot\sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\ ; \tag{37}$$

$$\tau=2\sqrt{\gamma(\gamma-1)}T_y\ ; \tag{38}$$

– контур регулирования тока (момента) требует настройки на максимум быстродействия по критерию «модульный» оптимум с некомпенсируемой постоянной времени $T_\mu << T_y$.

Результаты данных теоретических исследований проверялись путем моделирования – на рис. 2 приведены графики переходных процессов упругого момента $M_{УПР}$ и ω_2 для режима ударного приложения нагрузки, полученные на математической модели в пакете Matlab Simulink для относительных единиц.

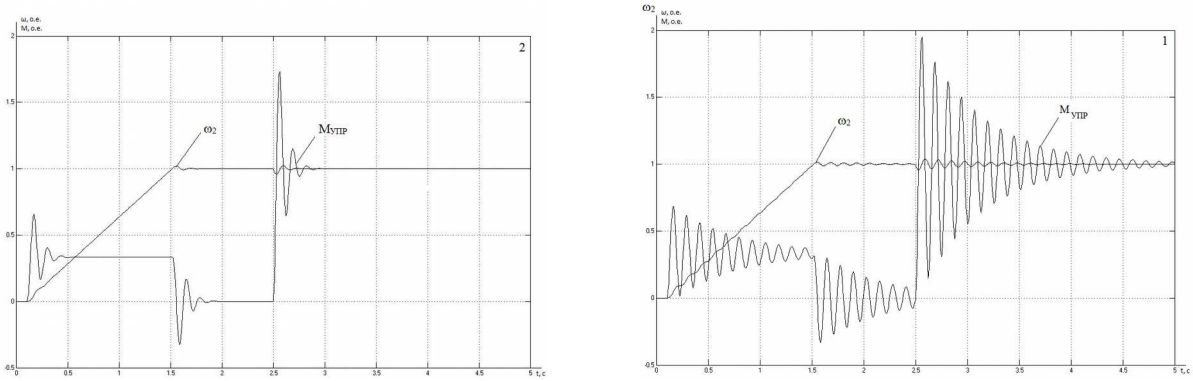


Рис.2. Графики переходных процессов для режима ударного приложения нагрузки для типовых (1) и оптимальных (2) настроек САУ

При наладке электропривода в промышленных условиях полученные соотношения использовались в качестве базовых для определения границ области усиления электромеханической связи [10].

Список литературы: 1. *Ключев В.И., Жильцов Л.В., Калашников Ю.П.* Состояние и перспективы развития теории электропривода с упругими механическими связями // Электричество. – 1981. – №7. – С. 29-32. **2.** *Борцов Ю. А.* Автоматизированный электропривод с упругими связями / *Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский*. – СПБ.: Энергоиздат, 1992. – 228 с. **3.** *Земляков В.Д., Задорожний Н.А.* О демпфировании электроприводом упругих электромеханических колебаний // Изв. вузов. Электромеханика. – 1985. – С. 99-92. **4.** *Бургин Б. Ш.* Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем / *Б. Ш. Бургин* – Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1992. – 199 с. **5.** *Задорожний Н. А.* Принцип электромеханической совместимости в приводах машин с упругими механическими связями / *Н. А. Задорожний* // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Х.: ХДПУ. – 1999. – № 61. – С. 123–124. **6.** *Задорожний Н. А.* Анализ демпфирующего действия электропривода с упругими механическими связями при астатическом регулировании / *Н. А. Задорожний, А. Н. Беш, И. Н. Задорожняя* // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» – Київ: Техніка. – 2011. – Вип. 03(79). – С. 101–104. **7.** *Ключев В. И.* Анализ электромеханической связи при упругих колебаниях в электроприводе / В. И. Ключев // Электричество. – 1971. – № 9. – С. 47–51. **8.** *Стрелков С. П.* Введение в теорию колебаний / *Стрелков С. П.* – М-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 344 с. **9.** *Выгодский М. Я.* Справочник по элементарной математике / *М. Я. Выгодский.* – М: АСТ Астрель, 2006 – 509 с. **10.** *Ребедак, О.А.* Оптимизация режимов работы слябового подъемника машины непрерывного литья заготовок с целью ограничения динамических нагрузок / *О.А. Ребедак, С.А. Бакан, Н.А. Задорожний* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний впуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012(19). – С. 439-444.

Bibliography (transliterated): 1. *Klyuchev V.I., Zhiltsov L.V., Kalashnikov Yu.P.* Sostoyanie i perspektivyi razvitiya teorii elektroprivoda s uprugimi mehanicheskimi svyazyami // Elektrichestvo. 7.1981. 29-32. Print **2.** *Bortsov, Yu. A.* Avtomatizirovannyiy elektroprivod s uprugimi svyazyami / *Yu. A. Bortsov, G. G. Sokolovskiy.* – SPB.: Energoizdat, 1992. Print. **3.** *Zemlyakov V.D., Zadorozhniy N.A.* O dempfirovanii elektroprivodom uprugih elektromehanicheskih kolebaniy // Izv. vuzov. Elektromehanika. – 1985. 99-92. Print. **4.** *Burgin B. Sh.* Analiz i sintez dvuhmassovyih elektromehanicheskih sistem / *B. Sh. Burgin* – Novosibirsk: Novosib. elektrotehn. in-t, 1992. Print. **5.** *Zadorozhniy, N. A.* Printsip elektromehanicheskoy sovmestimosti v privodah mashin s uprugimi mehanicheskimi svyazyami / *N. A. Zadorozhniy* // Visnik HarkIvskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu. – H.: HDPU. 61.1999. 123–124. Print. **6.** *Zadorozhniy, N. A.* Analiz dempfiruyuschego deystviya elektroprivoda s uprugimi mehanicheskimi svyazyami pri astaticheskom regulirovanii / *N. A. Zadorozhniy, A. N. Besh, I. N. Zadorozhnyaya* // Elektrotehnichni ta komp`yuternI sistemi. Tematichniy vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. TeorIya I praktika» – Kyiv: Tehnika. – 03(79). 2011. 101–104. Print. **7.** *Klyuchev V. I.* Analiz elektromehanicheskoy svyazi pri uprugih kolebaniyah v elektroprivode / *V. I. Klyuchev* // Elektrichestvo. 9.1971. 47–51. Print. **8.** *Strelkov, S. P.* Vvedenie v teoriyu kolebaniy / Strelkov S. P. – M-L.: Gosudarstvennoe izdatelstvo tehniko-teoreticheskoy literaturyi, 1950. Print. **9.** *Vyigodskiy, M. Ya.* Spravochnik po elementarnoy matematike / *M. Ya. Vyigodskiy.* – M: AST Astrel, 2006. Print. **10.** *Rebedak, O.A.* Optimizatsiya rezhimov rabotyi slyabovogo pod'emnika mashinyi nepreryivnogo litya zagotovok s tselyu ogranicheniya dinamicheskih nagruzok / *O.A. Rebedak, S.A. Bakan,N.A. Zadorozhniy* // Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi. Tematichniy vpusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika» naukovo-virbnichogo zhurnalu – Kremenchuk: KrNU. 3.19.2012. – 439-444. Print.

Поступила (received)

УДК 621.34

И. В. ОБРУЧ, ст. преподаватель, НТУ «ХПИ»;
А. В. ХОРЕВА, мл. научн. сотр., НТУ «ХПИ».

НОВАЯ МОДЕЛЬ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ

Динамические свойства электромеханической системы (ЭМС) зависят от ее физических параметров. Математическая модель в классической форме даже простейшей одномассовой системы управления двигателем независимого возбуждения [1] включает в себя 7 параметров: $R_я$ и $L_я$ – сопротивление и индуктивность цепи якоря двигателя, соответственно, $R_в$ и $L_в$ – аналогичные величины цепи возбуждения, K – конструктивный коэффициент, $Ф$ – магнитный поток, J – момент инерции ЭМС. В случае зависимости характеристики нагрузки от скорости электродвигателя (ЭД) добавляется 8-ой параметр $\beta_c = dM_c / d\omega$ – жесткость механической характеристики нагрузки $M_c = f(\omega)$.

Переход к обобщенным параметрам при неизменности потока возбуждения: $T_я = L_я / R_я$ –электромагнитная постоянная времени силовой цепи ЭД, $\beta = \left(K\Phi_н\right)^2 / R_я$ – модуль жесткости механической характеристики электропривода, $T_м = J \cdot R_я / \left(K\Phi_н\right)^2$ – электромеханическая постоянная времени сокращает при $M_c = f(\omega)$ число параметров до 4-х.

Для двухмассовой ЭМС с упругой кинематической связью, даже если не учитывать ее внутреннее вязкое трение, добавляются параметры $c_{1.2}$ – жесткость упругой связи, J_2 – момент инерции 2-ой массы, т.е. число параметров оказывается равным 6-ти.

Известно [2, 3], что в ЭМС с нелинейным трением, характеристика которых содержит падающий участок, возможно возникновение фрикционных автоколебаний (АКФ), ухудшающих показатели технологического процесса машин и механизмов. Возможность возникновения АКФ устанавливается по факту расходящегося динамического процесса при перемещении рабочей точки по падающему участку, на котором электропривод может рассматривается как электромеханическая система с отрицательным вязким трением (ЭМС с ОВТ). В свою очередь, характер динамического процесса определяется корнями характеристического полинома передаточной функции ЭМС, коэффициенты которого зависят от физических параметров системы.

С практической точки зрения, для графического отображения областей устойчивости ЭМС с ОВТ в зависимости от параметров системы желательно свести к минимуму число параметров, однозначно определяющих характер динамического процесса. В [4] показано, что это может быть достигнуто удачным выбором системы обобщенных параметров и относительных единиц, через которые выражаются коэффициенты и переменные исходной структурно-алгоритмической схемы электромеханической системы. Переход в нормированной схеме к безразмерному времени $t_* = t \cdot \Omega_{1.2}$ и соответственно к безразмерному оператору Лапласа $p_* = p / \Omega_{1.2}$, где $\Omega_{1.2}$ – собственная частота упругих недемпфированных колебаний упругой механической системы, равная

$$\Omega_{1.2} = \sqrt{c_{1.2} \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2}}, \qquad (1)$$

позволил сократить для двухмассовой системы с неизменным моментом нагрузки число обобщенных параметров до 3-х: $\gamma = \left(J_1 + J_2\right) / J_1$ – коэффициент соотношения масс, $T_э{*} = T_э \cdot \Omega_{1.2}$, $T_{м.1*} = T_{м.1} \cdot \Omega_{1.2} = J_1 / \beta \cdot \Omega_{1.2}$.

Возможность сокращения числа обобщенных параметров по сравнению с числом физических параметров указывает на наличие между ними физической взаимосвязи по влиянию на характер динамического процесса. Минимальное число обобщенных параметров, однозначно определяющих характер динамического процесса (апериодический, колебательный, сходящийся, расходящийся), равно порядку характеристического полинома передаточной функции ЭМС.

В [5] приведены варианты безразмерных обобщенных параметров для ЭМС с нелинейным трением. Общим для них является введение параметра $b = \beta_c / \beta_c$, представляющего отношение жесткости механической характеристики нагрузки к модулю жесткости механической характеристики электропривода. Показано, что для одномассовой ЭМС такими параметрами могут быть b и $m = \frac{T_{м1}}{T_э}$, от значений которых зависит принадлежность к той или иной области динамического процесса. Для двухмассовой ЭМС использовались параметры γ, $T^*_{м1}$, b, а также параметр $\nu = \frac{\Omega^2_{1.2}}{\Omega^2_{эм}}$, где $\Omega_{эм} = \frac{1}{\sqrt{T_э \cdot T_{м1}}}$.

В настоящей работе предлагается иная совокупность обобщенных безразмерных параметров, позволяющая несколько упросить вид структурно-алгоритмической схемы двухмассовой электромеханической системы с нелинейным трением.

Математическая модель двухмассовой электромеханической системы в структурной форме, учитывающая линеаризованную зависимость $M_c = f$

© И. В. Обруч, А. В. Хорева, 2015

(ω) в диапазоне перемещения рабочей точки во время динамического процесса, показана на рис. 1. В данной структурной схеме обозначено: ω_0, ω_1, ω_2 – скорости холостого хода, электродвигателя и рабочего органа соответственно; β – модуль жесткости рабочего участка механической характеристики электропривода; $T_э$ – электромагнитная постоянная времени электропривода; J_1 – момент инерции ротора (якоря) электродвигателя и жестко связанных с ним движущихся масс, $c_{1.2}$ – жесткость упругой кинематической связи; J_2 – момент инерции 2-й массы (рабочий орган и жестко связанные с ним массы); M_1, $M_{1.2}$ – момент электродвигателя и упругий момент; β_c –жесткость рабочего участка механической характеристики нагрузки. Следует заметить, что данная структурная схема может быть применена для анализа процесса возбуждения фрикционных автоколебаний в электроприводах постоянного и переменного тока (если во время динамического процесса рабочая точка не выходит за рабочий участок характеристики АД), при условии нелинейной характеристики трения на отдельных участках.

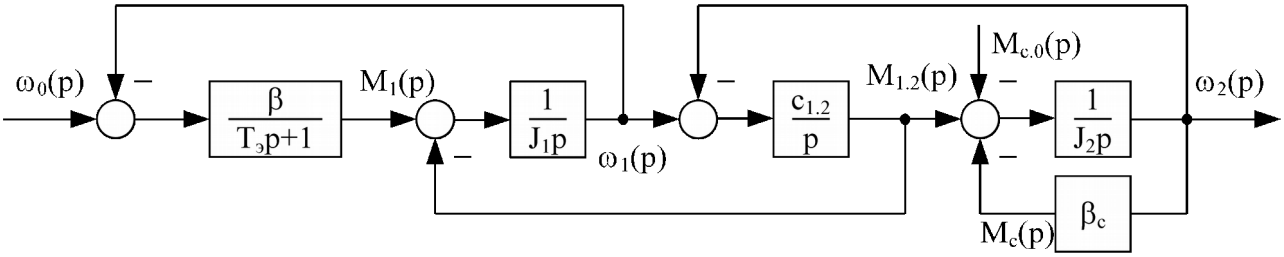


Рисунок 1 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы в физических параметрах

Используя обобщенные безразмерные параметры: $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$ – коэффициент инерции; $T_{м.1*} = T_{м.1} \cdot \Omega_{1.2} = J_1 / \beta \cdot \Omega_{1.2}$ – относительная электромеханическая постоянная времени; $\nu = \Omega_{1.2}^2 / \Omega_{эм}^2$ – отношение квадратов частот недемпфированных механического и электромеханического резонансов; коэффициентов $\mu = \beta_{12} / c_{1.2} \cdot \Omega_{1.2}$ и параметра $b = \beta_c / \beta$, а также выбрав в качестве базовых величин: $M_{к.з.} = \beta \cdot \omega_0$ – момент короткого замыкания и ω_0 – скорость холостого хода электропривода может быть получена структурная схема, которая представлена на рис. 2. Данная структурная схема стала традиционной при написании многих диссертационных и научно-исследовательских работ.

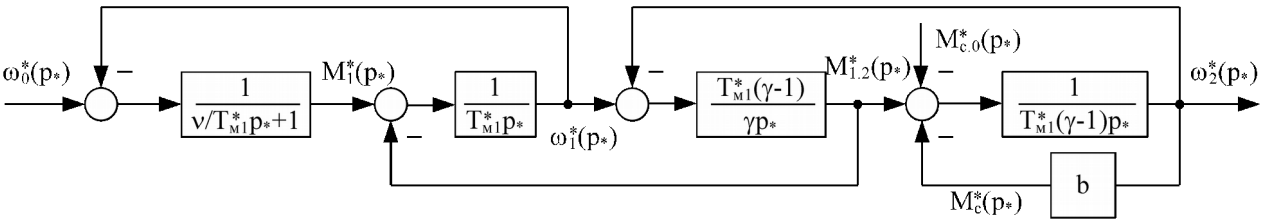


Рисунок 2 – Традиционная структурная схема двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах

Данный набор относительных безразмерных параметров характеризует динамические свойства не одной какой-либо системы, а целого класса систем с одинаковыми обобщенными параметрами. Преимуществом такого представления систем, по сравнению с описанием системы в физических параметрах, является возможность получить, например, законы управления для широкого класса объектов электропривода.

Кроме вышеперечисленных положительных свойств описания двухмассовых электроприводов при помощи обобщенных параметров, традиционная структурная схема на рис. 2 имеет и ряд недостатков. К ним следует отнести:

1) традиционную двухмассовую структурную схему невозможно преобразовать в одномассовую путем отбрасывания звеньев, моделирующих упругие кинематические связи и инерционность второй массы, так как в описание звена электромагнитного преобразования энергии входит безразмерный параметр (ν), не имеющий смысла для одномассовой электромеханической системы. Т.е. возникает необходимость получения самостоятельной модели в виде структурной схемы для одномассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах;

2) характер динамического процесса электромеханической системы зависит от соотношения механической и электромагнитной постоянных времени электропривода $m = T_м / T_э$, а этот безразмерный коэффициент не попал в математическое описание традиционной двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах. Вместо него используется относительная электромеханическая постоянная времени $T^*_{м1}$.

Для того чтобы осуществить переход от двухмассовой электромеханической системы в физических параметрах (рис. 1) к новой структурной схеме двухмассовой электромеханической системы в обобщенных пара-

метрах (рис. 3), примем следующие обозначения: $t_*=\frac{t}{T_э}$ – относительное время, при этом $p_*=T_э\cdot\frac{d}{dt}=T_э p$ – относительный безразмерный оператор дифференцирования, а в качестве базовых величин: $M_{к.з}=\beta\cdot\omega_0$ – момент короткого замыкания и ω_0 – скорость холостого хода электропривода.

Уравнение электромеханического преобразования энергии в операторной форме имеет вид

$$M_1\cdot(T_э p+1)=(\omega_0-\omega_1)\cdot\beta\ . \quad (2)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (2) на $\beta\cdot\omega_0$, после преобразования величин получим уравнение электромеханического преобразования энергии в относительных величинах

$$M_1^*\cdot(p_*+1)=\omega_0^*-\omega_1^*\ . \quad (3)$$

Уравнение движения 1-ой массы в операторной форме с учетом того, что $T_{м1}=\frac{J_1}{\beta}$ имеет вид

$$T_{м1}\beta\cdot p\,\omega_1=M_1-M_{1.2}\ . \quad (4)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (4) на $\beta\cdot\omega_0\cdot T_э$, после преобразования величин получим

$$m\cdot p_*\omega_1^*=M_1^*-M_{1.2}^*\ . \quad (5)$$

Процессы, происходящие в упругой кинематической связи, описываются уравнением, имеющим вид

$$pM_{1.2}=c_{1.2}\cdot(\omega_1-\omega_2)\ . \quad (6)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (6) на $\beta\cdot\omega_0\cdot T_э$ получим

$$\frac{pM_{1.2}}{\beta\cdot\omega_0\cdot T_э}=\frac{c_{1.2}\cdot(\omega_1-\omega_2)}{\beta\cdot\omega_0\cdot T_э}\ , \quad (7)$$

$$p_*M_{1.2}^*=T_э\frac{c_{1.2}}{\beta}\left(\omega_1^*-\omega_2^*\right)\ . \quad (8)$$

Учитывая, что $\Omega_{1.2}^2=c_{1.2}\frac{J_1+J_2}{J_1\cdot J_2}=c_{1.2}\frac{\gamma}{J_2}=c_{1.2}\frac{\gamma}{(\gamma-1)J_1}$, $\nu=\Omega_{1.2}^2/\Omega_{эм}^2=\Omega_{1.2}^2\cdot T_э T_{м1}$, а $T_{м1}=J_1/\beta$ выражение (7) можно преобразовать к виду

$$p_*M_{1.2}^*=\frac{\nu(\gamma-1)}{\gamma}\left(\omega_1^*-\omega_2^*\right)\ . \quad (9)$$

Уравнение движения 2-ой массы в операторной форме имеет вид

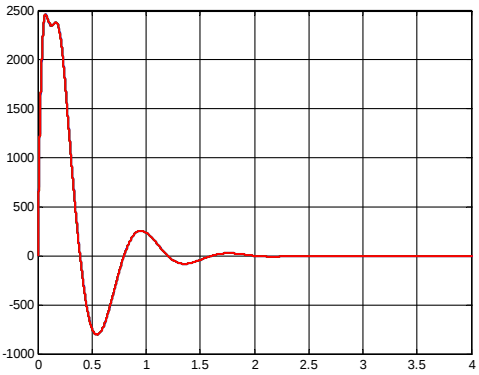
$$J_2\cdot p\,\omega_2=M_{1.2}-M_c\ . \quad (10)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (10) на $\beta\cdot\omega_0\cdot T_э$, с учетом $T_{м1}=J_1/\beta$ и $m=T_{м1}/T_э$ преобразуем выражение 10 к виду

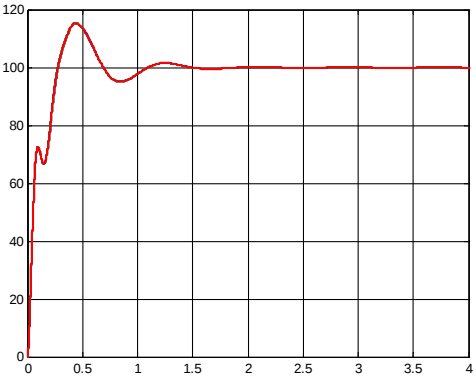
$$m(\gamma-1)\cdot p_*\omega_2^*=M_{1.2}^*-M_c^*\ . \quad (11)$$

Таким образом, на основании уравнений (3), (5), (9), (11) новая структурная схема двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах примет вид, показанный на рис. 3.

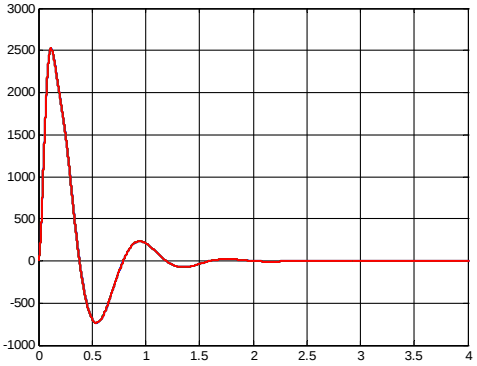
Рисунок 3 – Новая структурная схема двухмассовой



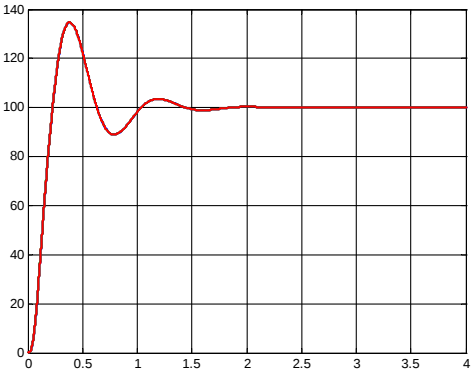
а) момент электродвигателя (Н·м)



б) скорость электродвигателя (рад/с)



в) упругий момент (Н·м)



г) скорость второй массы (рад/с)

Рисунок 4 – Переходные процессы в двухмассовой электромеханической системы от времени (с)

электромеханической системы в обобщенных параметрах

Полученная структурная схема не учитывает наличия внутреннего вязкого трения в упругой кинематической связи двухмассовой электромеханической системе представляемого звеном с передаточной функцией вида $W(p)=M_{вт}\frac{(p)}{\omega_1(p)-\omega_2(p)}=\beta_{1.2}$, где момент вязкого трения равен

$$M_{вт}=(\omega_1-\omega_2)\cdot\beta_{1.2}. \quad (12)$$

Разделив правую и левую часть уравнения (12) на $\beta\cdot\omega_0$ и преобразовав результат, получим

$$M^*_{вт}=(\omega^*_1-\omega^*_2)\cdot\frac{\beta_{1.2}}{\beta}=(\omega^*_1-\omega^*_2)\cdot\beta^*_{1.2}. \quad (13)$$

Учитывая, что

$$\beta_{1.2}=\frac{\mu\cdot c_{1.2}}{\Omega_{1.2}}=\frac{\mu\cdot c_{1.2}\cdot\Omega_{1.2}}{\Omega^2_{1.2}}, \quad (14)$$

с учетом зависимости $\Omega_{1.2}$, полученной выше, коэффициент вязкого трения может быть записан как

$$\beta_{1.2}=\frac{\mu\cdot c_{1.2}\cdot\Omega_{1.2}}{c_{1.2}\gamma/J_1(\gamma-1)}=\frac{\mu\cdot\Omega_{1.2}\cdot J_1(\gamma-1)}{\gamma}=\frac{\mu\cdot\Omega_{1.2}\cdot m\cdot T_э\cdot\beta\cdot(\gamma-1)}{\gamma}. \quad (15)$$

Таким образом, окончательно передаточную функцию, описывающую вязкое трение в безразмерных параметрах, с учетом (14, 15) можно записать как

$$W(p_*)=\frac{M^*_{вт}(p)}{\omega^*_1(p)-\omega^*_2(p)}=\beta^*_{1.2}=\frac{\beta_{1.2}}{\beta}=\frac{\mu m(\gamma-1)}{\gamma}\Omega^*_{1.2}, \quad (16)$$

где $\mu=\frac{\beta_{1.2}}{c_{1.2}}\Omega_{1.2}$¿, а $\Omega^*_{1.2}=\Omega_{1.2}\cdot T_э$ – относительная частота механического резонанса двухмассовой электромеханической системы.

Для проверки адекватности полученного результата была промоделирована двухмассовая электромеханическая система со следующими физическими параметрами: $\omega_0=100\,рад/с$, $\beta=75\,Н\cdot м\cdot с$, $T_э=0{,}1\,с$, $J_1=1\,кг\cdot м^2$, $c_{1.2}=500\,Н\cdot м$, $J_2=4\,кг\cdot м^2$, $\beta_{1.2}=18\,Н\cdot м\cdot с$. По данным физическим параметрам были рассчитаны обобщенные – $\nu=0{,}8$, $\mu=0{,}9$, $T^*_{м1}=0{,}33$, $\gamma=5$, $m=0{,}13$. После моделирования всех систем (рис.1, рис. 2, рис. 3) полученные переходные процессы (рис. 4) были пересчитаны из относительных координат в физические и отображены для всех систем в одних осях (для удобства сопоставления каждая координата электропривода отображена на отдельном рисунке).

Из анализа осциллограмм переходных процессов можно сделать вывод, что все структурно-алгоритмические схемы (рис. 1 ÷ 3) двухмассовой электромеханической системы показали абсолютно одинаковые результаты, тем самым подтвердив адекватность разработанной новой модели двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах.

Выводы. Разработана новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах, адекватность которой подтверждена компьютерным моделированием.

Список литературы: 1. *Ключев В.И.* Теория электропривода. –М.: «Энергоатомиздат», 2001, 704с. **2**. *Klepikov V. B., Osychev A. V.* Self-exited oscillations in electromechanically systems with negative viscous friction. Proc. 4th Intern. Conf. “Uncontinental electromechanical and electrical system”, IEEE-99, St. Petersburg, 1999, pp. 12-28. **3**. *Клепиков В. Б.* Особенности динамики электромеханических систем с отрицательным вязким трением. “Технічна електродинаміка”, Тем. Вып. “Проблеми сучасної електротехніки”. –Київ, 2000, сс. 40-45. **4**. *Ключев В.И.* Теория электропривода. –М.: «Энергоатомиздат», 1985, 560с. **5**. *Клепиков В. Б.* Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. –Х., Изд-во «Підручник НТУ “ХПІ”», 2014, 408 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Klyuchev V.I.* Teoriya elektroprivoda. –M.: «Energoatomizdat», 2004, 704 s. **2**. *Klepikov V. B., Osychev A. V.* Self-exited oscillations in electromechanically systems with negative viscous friction. Proc. 4th Intern. Conf. “Uncontinental electromechanical and electrical system”, IEEE-99, St. Petersburg, 1999, pp. 12-28. **3**. *Klepikov V. B.* Osobennosti dinamiki elektromekhanicheskikh sistem s otritsatel'nym vyazkim treniem. “Tekhnichna elektrodina-mika”, Tem. Vyp. “Problemi suchasnoї elektrotekhniki”. –Kiïv, 2000, ss. 40-45. **4**. *Klyuchev V.I.* Teoriya elektroprivoda. –M.: «Energoatomizdat», 1985, 560 s. **5**. *Klepikov V. B.* Dinamika elektromekhanicheskikh sistem s nelineinym treniem: monografiya. –Kh., Izd-vo «Pidruchnik NTU “KhPI”», 2014, 408 s.

Поступила (received) 02.07.2015

УДК 621.314

В. М. РЯБЕНЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. НУК им. адм. Макарова, Николаев;
А. О. УШКАРЕНКО, канд. техн. наук, доц. НУК им. адм. Макарова, Николаев;
ЯЗИД ДЖАМАЛ ИСМАИЛ АЛЬ-ШАЙХ, аспирант НУК им. адм. Макарова, Николаев

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В АВАРИЙНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Введение. Основными потребителями электроэнергии на судах являются асинхронные электродвигатели. Поскольку пусковой ток асинхронного двигателя в несколько раз превышает его номинальный, то при пуске возникают значительные провалы напряжения (ПН) сети, которые негативно отражаются на работающих потребителях, а также могут привести к возникновению аварийной ситуации и обесточиванию системы [1]. С целью повышения достоверности расчетных значений токов короткого замыкания и пусковых токов мощных нагрузок, учитывая, что предприятие-изготовитель электрораспределительных устройств (ЭРУ) несет ответственность за качество функционирования электростанции, необходимо выполнить дополнительные проверки на модели судовой электроэнергетической системы (СЭЭС). Коммутационная аппаратура дополнительно проверяется как по току перегрузки (токо-временные зависимости), так и по величине тока короткого замыкания (КЗ) с помощью специальных станций. Это обусловлено прежде всего тем, что электромагнитные контакторы имеют низкую точность срабатывания. Электронные обеспечивают высокую точность, но их стоимость значительно выше.

Провалы напряжения (ПН) влияют на подключенные к сети потребители электроэнергии, которые могут иметь различные уровни устойчивости к ПН. Превышение уровня устойчивости электроприемника к ПН, как правило, приводит к нарушению условий его нормального функционирования или отказу. Исследованию процессов в асинхронных короткозамкнутых электродвигателях судового исполнения [2, 3]. В них представлены теоретические и экспериментальные исследования как прямого пуска с различными по величине и характеру моментами сопротивления на валу двигателя, так и регулируемого. Однако в этих работах было принято, что источник питания – трехфазный генератор – имеет бесконечную мощность, т.е. не учитывалось влияние на сеть токов как при прямом пуске двигателя.

Таким образом, существует актуальная научная задача разработки перспективных судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) с защитой от провалов напряжения.

Решение этой научной задачи предполагает постановку двух взаимосвязанных задач:

1) получение вероятностно статистических оценок провалов напряжения (длительностей и величин провалов и всплесков напряжения), возникающих случайным образом, и принимаемых в качестве исходных данных для разработки мероприятий по снижению провалов и всплесков напряжения в СЭЭС;

2) проектирование СЭЭС на основе разработки методов и средств преодоления появления провалов и всплесков напряжения, обеспечивающих повышение бесперебойности питания ответственных потребителей электроэнергии.

Модели СЕЕС могут быть использованы и для решения задач оптимизации расположения ЭРУ в машинном отделении судна, а также при оценке возможных путей снижения величины токов короткого замыкания (КЗ) за заранее установленные пределы.

Целью работы является разработка модели судовой электроэнергетической системы и исследование её работы в аварийных и динамических режимах для оценки величины изменения напряжения в различных точках и осуществления наиболее обоснованного выбора мероприятий по оптимизации качества электроэнергии.

Материалы исследования. Для расчета характеристик ПН необходимо учитывать реальную структуру и конфигурацию СЭЭС и ее режим работы электрооборудования, подключенных к шинам. Модель исследуемой СЭЭС должна отражать ее так подробно, чтобы выполненные расчеты дали возможность определять не только напряжения в интересующих узлах, но и отклонения этих параметров от нормальных установившихся значений.

На рис.1 представлена схема для расчета токов КЗ. Схема ориентирована на типовой широкий ряд электростанций, имеющих три дизель-генераторных агрегата, и диапазон мощностей генерирующих агрегатов находится в диапазоне от сотен кВт до нескольких тысяч [1]. Такие автономные электростанции находят применение не только в судовой практике, и широко используются в качестве резервных электростанций на предприятиях с непрерывным циклом работы. При расчете системы необходимо определить значения токов КЗ на таких элементах: шинах генератора, распределительных или коммутационных щитах, подключенных к генераторным шинам главного распределительного щита, которые получают питание через трансформатор.

© В.М. Рябенький, А.О. Ушкаренко, Язид Джамал Исмаил Аль-шайх, 2015

В аварийных режимах работы электростанции расчеты токов короткого замыкания для системы должны охватывать токи КЗ, произведенные всеми двигателями и генераторами, подключенными к системе, включая токи на генераторных шинах, вторичных коммутационных щитах и распределительных щитах.

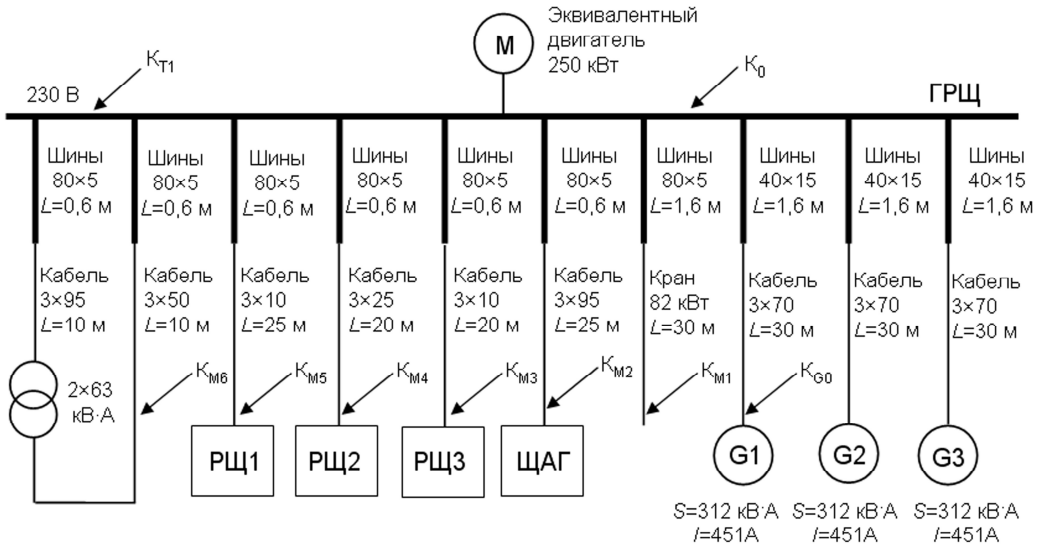


Рис. 1. Схема для расчета токов короткого замыкания.

Значение минимального напряжения в относительных единицах при работе электростанции в динамических режимах (пуск мощного асинхронного двигателя) определяется по формуле [5]:

$$U_{\min} = U_{нач} + \left(U_{нач} - U_{уст}\right)e^{-t_{\min}/\tau'_d} + k_2 k\left[t_{\min} - \tau'_d\left(1 - e^{-t_{\min}/\tau'_d}\right)\right], \quad (1)$$

где $t_{\min}$ – время достижения минимального значения напряжения для генератора с самовозбуждением [5]:

$$t_{\min} = \tau'_d \ln\left(\frac{U_{нач} - U_{уст}}{k_2 k \tau'_d}\right), \quad (2)$$

начальное напряжение в выражении (3) можно определить по формуле:

$$U_{нач} = E'_d \frac{x_d}{x_g + x'_d}, \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{x_g}{x_g + x'_d}, \quad (4)$$

где r_a, x_d, x_q – относительные активное и реактивное сопротивления по продольной и поперечной осям.

Установившееся напряжение в (1) определяется выражением:

$$U_{уст} = E_d \frac{x_g}{x_g + x_d}, \quad (5)$$

постоянная времени обмотки возбуждения в (2) при замкнутой обмотке статора с сопротивлением x_g:

$$\tau'_d = \tau'_{d0} \frac{x_g + x'_d}{x_g + x_d}, \quad (6)$$

реактивное сопротивление двигателя в формулах (3)-(6):

$$x_g = \frac{S_{нг}}{k_П S_{нд}} \left(\frac{U_{нд}}{U_{нг}}\right)^2, \quad (7)$$

где $S_{нг}$, $U_{нг}$ – номинальные мощность и напряжение генератора, $S_{нд}$, $U_{нд}$ – номинальные мощность и напряжение двигателя, $k_п$ – кратность пускового тока двигателя по отношению к номинальному.

На рис. 2 представлена модель СЭЭС, созданная в пакете MatLab и ориентирована для моделирования аварийных режимов, то есть оценки значений токов КЗ. Электростанция содержит три 3-х фазных источника переменного напряжения (3-Phase Source) с действующим значением линейного напряжения 380 В. Источники работают на активно-индуктивную трехфазную нагрузку. Порты моделей A, B и C являются выводами статор-

ных обмоток машин. Блоки RMS и RMS1 показывают действующие значения токов фазы. На выходных портах m_SI формируются векторные сигналы, состоящие из 12 элементов: токов (isa, isb, isc), напряжений (va, vb, vc) и ЭДС (ea, eb, ec) обмотки статора, углового положения (thetam) и скорости ротора (vm), а также электромагнитной мощности (Pe). Для удобства извлечения переменных машин из выходных векторов измеряемых переменных в библиотеке SimPower Systems предусмотрен блок Machines Measurement Demux. Сигналы, равные механической мощности на валу машин, подаются на входные порты Pm, а на выходные порты E подаются сигналы, задающие действующие значения линейных ЭДС обмоток статоров.

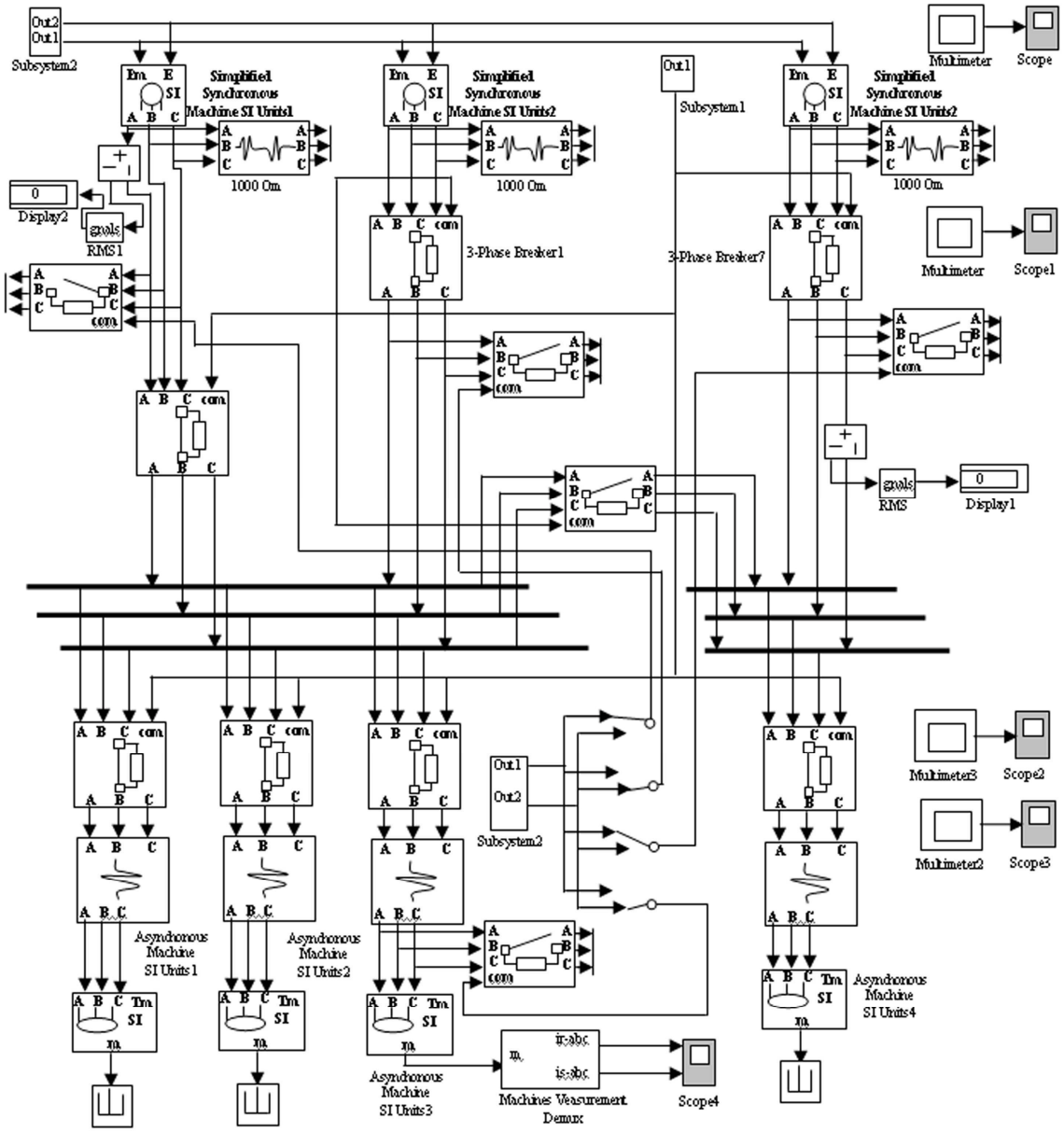
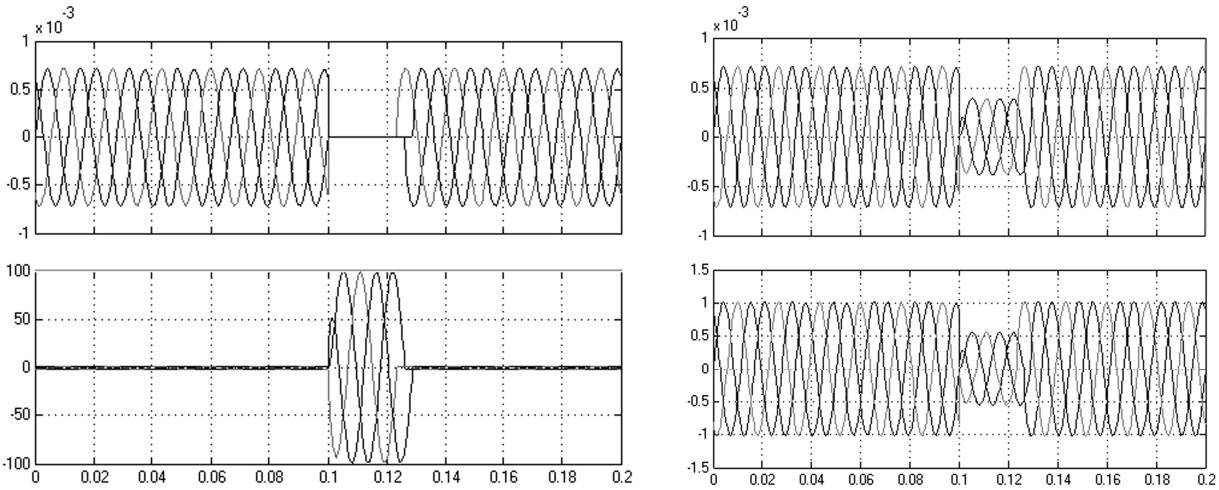


Рис. 2. Схема судовой электростанции.

Методики расчета применяются для состояния трехфазного симметричного короткого замыкания, то есть когда трехфазные проводники замкнуты друг на друга или на корпус судна, и когда короткое замыкание возникает на всех трех полюсах одновременно. Для определения токов короткого замыкания используются блоки 3-Phase Fault, в которых в определенный момент времени происходит межфазное короткое замыкание. Управление блоком 3-Phase Fault осуществляется через порт com. При подаче управляющего сигнала происходит короткое замыкание в цепи.

Короткое замыкание можно моделировать непосредственно в источнике напряжения, на линии передачи напряжения, и непосредственно на нагрузке. Выбор места короткого замыкания осуществляется с помощью ручных переключателей Manual Switch, которые соединены с блоком Subsystem (сигнал 1 – верхний вывод или 0 – нижний вывод). С помощью ключей управляющие сигналы подаются на тот или иной блок 3-Phase Fault. Манипулируя ключами, задается короткое замыкание на нагрузке Load 3. В результате моделирования были

получены осциллограммы напряжения и тока короткого замыкания, представленные на рис. 3, а. Для сравнения на рис. 3, б, представлены графики токов и напряжений на нагрузке Load1, где короткое замыкание отсутствовало.



а б

Рис. 3. Результаты моделирования: а – осциллограммы напряжений и токов на нагрузке Load3; б – осциллограммы токов и напряжений на нагрузке Load1

Выводы. Для расчета характеристик провалов напряжения необходимо учитывать реальную структуру и конфигурацию энергосистемы, а также режим работы электрооборудования. Модель исследуемой электростанции должна отражать ее достаточно подробно для того, чтобы выполненные расчеты дали возможность определять не только напряжения, токи, мощности в интересующих узлах, но и отклонения этих параметров от нормальных постоянных значений. Разработанная модель позволяет решать задачи определения токов короткого замыкания и пусковых токов мощных потребителей электроэнергии, например, асинхронных двигателей. Сравнительная оценка теоретических методов расчета и модельных исследований показали высокую степень точности результатов моделирования. Максимальный разброс расчетных значений не превышает 10%, что вполне достаточно для таких решения задач. При расчете пиковых значений пусковых токов погрешности также находились в пределах 10-15%. Однако для практики расчета пусковых токов важное значение имеют токовременные характеристики автоматических выключателей. В этом отношении модельные исследования и получение кривых переходных процессов пуска мощных потребителей дают возможность более точно выбирать тип автоматического выключателя и его уставки. Минимизация ущерба от провалов напряжения достигается комплексом мероприятий, применением специальных быстродействующих систем защит и автоматики, внедрением эффективных структур и методов запуска ответственных электродвигателей. Наиболее эффективным способом, решающих проблемы провалов напряжения, является упреждающее управление.

Список литературы: 1. *Подимака В. І.* Розрахунок струмів короткого замикання в суднових електроенергетичних системах: Методичні вказівки / *В. І. Подимака, А. А. Ставинський, В. К. Чекунов.* – Миколаїв: НУК, 2004. –32 с. **2.** *Карандашов Ю. С.* Математическое моделирование электрических нагрузок судовых электростанций / *Ю. С. Карандашов* // Судостроение. – Москва: Судостроение, 2004. – №2. – С. 31–34. **3.** *Hatzilau I. K.* On electric load characterization and categorization in ship electric installations / *I. K. Hatzilau, G. J. Tsekouras, J. M. Prousalidis* // IEEE Transactions on Power Systems. – IEEE: Piscataway, 2007. – №3. – P. 1120-1128. **4.** *Арешян Г. Л.* Провалы напряжений и токи при пуске асихронного двигателя от автономного синхронного генератора / *Г. Л. Арешян* // Электричество. – Ереван: Известия НАН РУ и ГИУА, 2000. – Том LIII. – №3. – С. 345-352. **5.** *Яковлев Г. С.* Судовые электроэнергетические системы / *Г. С. Яковлев*. – Л.: Судостроение, 1980. – 288 с.

Bibliography (transliterated): 1. Podymaka, V. I., Stavyns'kyy A. A., Chekunov V. K. Rozrakhunok strumiv korotkoho zamykannya v sudnovykh elektroenerhetychnykh systemakh: Metodychni vkazivky. – *Mykolayiv: NUK*, 2004. – 32 s. **2.** Karandashov Yu. S. Matematycheskoe modelyrovanye ɜlektrycheskykh nahruzok sudovykh elektrostantsyy. *Sudostroenye. Moskva: Sudostroenye*, 2004. No. 2. – S. 31-34. **3.** Hatzilau I. K., Tsekouras G. J., Prousalidis J. M. On electric load characterization and categorization in ship electric installations. *IEEE Transactions on Power Systems. – IEEE: Piscataway*, 2007. – №3. – P. 1120-1128. **4.** Areshyan H. L. Provaly napryazhenyy y toky pry puske asykhronnoho dvyhatelya ot avtonomnoho synkhronnoho heneratora. *Elektrychestvo. – Erevan: Yzvestyya NAN RU y HYUA*, 2000. – Tom LIII. – No. 3. – S. 345-352. 5. Yakovlev G.S. Sudovie elektroenergeticheskie sistemy. – *L.: Sudostroenie*, 1980. – 288 s.

Поступила (received) 08.08.2015

УДК 62-83-52:621.311.24

Д. Г. АЛЕКСЕЕВСКИЙ, канд. тех. наук, доц. каф. ЭС ЗГИА, Запорожье

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЗВЕНА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ

Введение. Схема с аэродинамическим мультиплицированием, в настоящее время, являются достаточно перспективной, альтернативной по отношению к классической, схемой построения электромеханической системы ВЭУ [1]. Она позволяет избавиться от механического мультипликатора при одновременном использовании генераторов с большими номинальными угловыми скоростями вращения вала, что, в свою очередь, не требует увеличения их массы и габаритов. Увеличение угловой скорости на валу генератора достигается за счет того, что скорость вторичного воздушного потока в несколько раз превышает скорость ветра. Однако свойства данной системы существенно отличаются от свойств классической схемы преобразования мощности в электромеханической системе ВЭУ. Наличие двойного аэромеханического преобразования повышает порядок системы и предъявляет специфические требования к системе управления ВЭУ.

Анализ последних достижений и литературы. Исследованию свойств системы с аэродинамическим мультиплицированием были посвящены работы [1], [2], [3]. В работе [1] исследовались статические режимы при постоянном значении угловой скорости на валу генератора. Была предложена математическая модель системы и описан эффект автооптимизации, который присутствует в данной системе. Работы [2] и [3] и другие работы этих же авторов были посвящены динамическим свойствам системы с аэродинамическим мультиплицированием.

Цель статьи. Целью данной работы является определения, в результате аналитического исследования, передаточной функции звена аэромеханического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

Постановка проблемы. Передаточная функция звена аэродинамического мультиплицирования необходима при процедуре синтеза методами теории авторегулирования системы управления электромеханической системы ВЭУ. Исходная математическая модель данного звена имеет существенные нелинейности, поэтому требует проведение линеаризации с предварительным определением значений координат рабочих точек.

Материалы и результаты исследования.

Модель звена аэродинамического мультиплицирования. При построении исходной модели звена аэродинамического мультиплицирования были приняты следующие допущения.

1. Моменты механических потерь включены в механические характеристики ветротурбин.
2. В данном приближении все вращающиеся подсистемы считаются жесткими.
3. Вторичная аэромеханическаясистема состоит из трех идентичных подсистем.
4. Потоки мощности равномерно распределяются между тремя элементами вторичной аэромеханической подсистемы.
5. Все зависимости представляются в относительных единицах.

На рисунке 1 изображена блок-схема подсистемы аэродинамического мультиплицирования. Она содержит структурные элементы, которые определяют ее нелинейность: механическая характеристика первичной ветротурбины (NB1), механическая характеристика вторичной ветротурбины (NB2), операция умножения (NB3), операция деления (NB4).

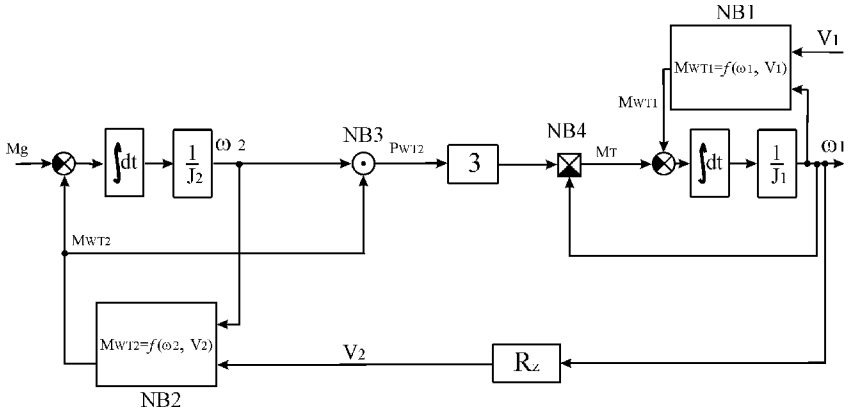


Рис.1 – Исходная блок схема модели звена аэродинамического преобразования.

© Д.Г. Алексеевский, 2015

Как видно из схемы, все эти элементы имеют два входа и один выход. Следовательно, в графической интерпретации они представляют собой трехмерную поверхность. Их линеаризующими выражениями являются уравнения плоскостей в трехмерном пространстве касательные к исходным поверхностям в рабочей точке. Общая форма линеаризующего выражения имеет вид:

$$y(x_1, x_2) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 , \quad (1)$$

где: a_0 , a_1 , a_2 - коэффициенты линеаризующего выражения,

x_1 , x_2 - входные переменные.

Для выполнения условия гомогенности [4] система рассматривается в координатах приращений соответствующих переменных. Нелинейный элемент, в этом случае, описывается соответствующей линейной комбинацией типа:

$$y(x_1, x_2) = a_1 x_1 + a_2 x_2 . \quad (2)$$

Полученная таким образом, блок-схема приведена на рисунке 2.

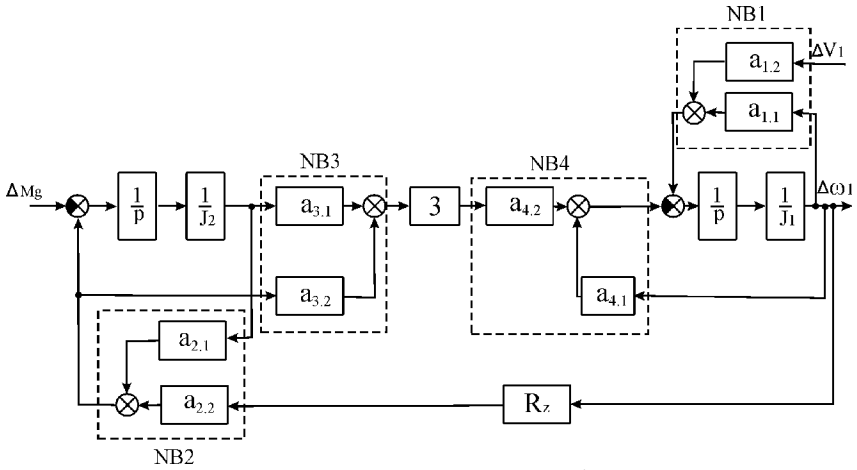


Рис.2 – Блок-схема модели звена аэродинамического преобразования после линеаризации.

Нумерация коэффициентов включает в себя номер нелинейного блока и номер элемента в нелинейном блоке.

Определение координат рабочей точки. Первым этапом определения коэффициентов является определение координат рабочей точки. Значения переменных в рабочей точке соответствуют установившемуся режиму при фиксированных значениях входных переменных всей подсистемы. Он характеризуется нулевыми значениями входов интеграторов (см. рис.1).

Исходя из данного свойства, могут быть получены следующие выражения:

$$M_{WT1}^{*0} = M_T^{*0} , \quad (3)$$

$$M_{WT2}^{*0} = M_g^{*0} , \quad (4)$$

где: M_{WT1}^{*0} - момент первичной ветротурбины в установившемся режиме,

M_T^{*0} - момент торможения первичной аэромеханической подсистемы в установившемся режиме,

M_{WT2}^{*0} - момент вторичной ветротурбины в установившемся режиме,

M_g^{*0} - момент на валу генератора в установившемся режиме.

Кроме того, следует, при составлении системы уравнений, учесть зависимость:

$$V_2^{*0} = R_Z^* \cdot \omega_1^{*0} , \quad (5)$$

где: R_Z^* - радиус закрепления вторичной ветротурбины,

ω_1^{*0} - угловая скорость вращения первичной ветротурбины в рабочей точке,

V_2^{*0} - скорость вторичного воздушного потока в рабочей точке.

Для проведения линеаризации нелинейных блоков необходимо определить значения следующего набора параметров рабочей точки звена аэродинамического преобразования: ω_1^{*0}, ω_2^{*0}, M_T^{*0}, P_{WT2}^{*0}, V_2^{*0}, M_{WT1}^{*0}, M_{WT2}^{*0}, где: ω_2^{*0} - угловая скорость вращения первичной ветротурбины в рабочей точке, P_{WT2}^{*0} - мощность вторичной ветротурбины.

Значения первых четырех из них могут быть определены в результате решения следующей системы трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} f_{WT1}(\omega_1^{*0}, V_1^{*0}) - M_T^{*0} = 0 \\ f_{WT2}(\omega_2^{*0}, V_2^{*0})\big|_{V_2^{*0}=R_Z^{*}\cdot\omega_1^{*0}} - M_g^{*0} = 0 \\ P_{WT2}^{*0} - \omega_2^{*0}\cdot M_g^{*0} = 0 \\ M_T^{*0} \dfrac{-3\cdot P_{WT2}^{*0}}{\omega_1^{*0}} = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Остальные три могут быть определены с помощью выражений (3), (4), (5).

В системе уравнений функции f_{WT1} и f_{WT2} представляют собой выражения семейства механических характеристик первичной и вторичной ветротурбин соответственно, и определяются следующими выражениями (используя [5]):

$$f_{WT1}(\omega_1^{*0}, V_1^{*0}) = \frac{\left(V_1^{*0}\right)^3}{\omega_1^{*0}} \cdot Cp_1^{*0}, \quad (7)$$

$$f_{WT2}(\omega_2^{*0}, V_2^{*0}) = \left(\frac{R_2^{*}}{R_1^{*}}\right)^2 \cdot \frac{\left(V_2^{*0}\right)^3}{\omega_2^{*0}} \cdot Cp_2^{*0}, \quad (8)$$

Значения коэффициентов мощности Cp_1^{*0} и Cp_2^{*0} определяются из выражений:

$$Cp_1^{*0}(Z_1^{*0}) = \begin{cases} Cp_1^{*max} \cdot \left(\dfrac{Z_1^{*0}}{Z_1^{*pot}}\right)^{b1} \cdot \left[-2\cdot\left(\dfrac{Z_1^{*0}}{Z_1^{*opt}}\right)^{b2} + 3\right] & при \quad 0 < Z_1^{*0} \le Z_1^{*opt} \\ Cp_1^{*max} - \dfrac{Cp_1^{*max}}{\left(Z_1^{*xx} - Z_1^{*opt}\right)^{b3}} \cdot \left(Z_1^{*0} - Z_1^{*opt}\right)^{b4} & при \quad Z_1^{*opt} < Z_1^{*0} < Z_1^{*xx} \\ Cp_1^{*max} - \dfrac{Cp_1^{*max}}{\left(Z_1^{*xx} - Z_1^{*opt}\right)^{b5}} \cdot \left(Z_1^{*0} - Z_1^{*opt}\right)^{b6} & при \quad Z_1^{*xx} \le Z_1^{*0} < +\infty \end{cases}, \quad (9)$$

$$Cp_2^{*0}(Z_2^{*0}) = \begin{cases} Cp_2^{*max} \cdot \left(\dfrac{Z_2^{*0}}{Z_2^{*pot}}\right)^{b7} \cdot \left[-2\cdot\left(\dfrac{Z_2^{*0}}{Z_2^{*opt}}\right)^{b8} + 3\right] & при \quad 0 < Z_2^{*0} \le Z_2^{*opt} \\ Cp_2^{*max} - \dfrac{Cp_2^{*max}}{\left(Z_2^{*xx} - Z_2^{*opt}\right)^{b9}} \cdot \left(Z_2^{*0} - Z_2^{*opt}\right)^{b10} & при \quad Z_2^{*opt} < Z_2^{*0} < Z_2^{*xx} \\ Cp_2^{*max} - \dfrac{Cp_2^{*max}}{\left(Z_2^{*xx} - Z_2^{*opt}\right)^{b11}} \cdot \left(Z_2^{*0} - Z_2^{*opt}\right)^{b12} & при \quad Z_2^{*xx} \le Z_2^{*0} < +\infty \end{cases}, \quad (10)$$

где: C_1^{*max}, C_2^{*max} - максимальные значения коэффициентов мощности в относительных единицах первичной и вторичной ветротурбин соответственно,

Z_1^{*opt}, Z_2^{*opt} - оптимальные значения быстроходности в системе относительных единиц первичной и вторичной ветротурбин соответственно,

Z_1^{*xx}, Z_2^{*xx} - значения быстроходности при холостом ходе в системе относительных единиц первичной и вторичной ветротурбин соответственно,

Z_1^{*0}, Z_2^{*0} - значения быстроходности для установившегося режима в системе относительных единиц первичной и вторичной ветротурбин соответственно,

b_1,..., b_{12} - коэффициенты аппроксимации.

С учетом (5) система (6) может быть записана в виде:

$$\begin{cases} f_{WT1}(\omega_1^{*0}, V_1^{*0}) - M_T^{*0} = 0 \\ f_{WT2}(\omega_1^{*0}, \omega_2^{*0}) - M_g^{*0} = 0 \\ P_{WT2}^{*0} - \omega_2^{*0}\cdot M_g^{*0} = 0 \\ M_T^{*0} - \dfrac{3\cdot P_{WT2}^{*0}}{\omega_1^{*0}} = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Значения быстроходности первичной и вторичной ветротурбин определяются с помощью следующих выражений:

$$Z_1^{*0}=\frac{\omega_1^{*0}\cdot R_1^*}{V_2^{*0}}\,, \tag{12}$$

$$Z_2^{*0}=\frac{\omega_2^{*0}\cdot R_2^*}{\omega_1^{*0}\cdot R_Z^*}\,. \tag{13}$$

где: R_1^*, R_2^* - значения радиусов первичной и вторичной ветротурбин в относительных единицах.

Определение коэффициентов линеаризации. Коэффициенты $a_{1.1}$ и $a_{1.2}$ определяются из выражения:

$$\begin{pmatrix} a_{1.1} \\ a_{1.2} \end{pmatrix}=\nabla_{X_{NB1}} f_{WT1}\left(X_{NB1}\right) \tag{14}$$

где $X_{NB1}=\begin{pmatrix} \omega_1^{*0} \\ V_1^{*0} \end{pmatrix}$ и $f_{NB1}\left(X_{NB1}\right)=f_{WT1}\left(\omega_1^*, V_1^*\right)$

Коэффициенты $a_{2.1}$ и $a_{2.2}$ определяются их выражения:

$$\begin{pmatrix} a_{2.1} \\ a_{2.2} \end{pmatrix}=\nabla_{X_{NB2}} f_{WT2}\left(X_{NB2}\right) \tag{15}$$

где $X_{NB2}=\begin{pmatrix} \omega_2^{*0} \\ V_2^{*0} \end{pmatrix}$ и $f_{NB2}\left(X_{NB2}\right)=f_{WT2}\left(\omega_2^*, V_2^*\right)$

Коэффициенты $a_{3.1}$ и $a_{3.2}$ определяются их выражения:

$$\begin{pmatrix} a_{3.1} \\ a_{3.2} \end{pmatrix}=\nabla_{X_{NB3}} f_{NB3}\left(X_{NB3}\right), \tag{16}$$

где $X_{NB3}=\begin{pmatrix} \omega_2^{*0} \\ M_{WT2}^{*0} \end{pmatrix}$ и $f_{NB3}\left(X_{NB3}\right)=\omega_2^*\cdot M_{WT2}^*$.

Коэффициенты $a_{4.1}$ и $a_{4.2}$ определяются их выражения:

$$\begin{pmatrix} a_{4.1} \\ a_{4.2} \end{pmatrix}=\nabla_{X_{NB4}} f_{NB4}\left(X_{NB4}\right), \tag{17}$$

где $X_{NB4}=\begin{pmatrix} \omega_1^{*0} \\ 3\cdot P_{WT2}^{*0} \end{pmatrix}$ и $f_{NB4}\left(X_{NB4}\right)=\frac{3\cdot P_{WT2}^*}{\omega_1^*}$.

Определение передаточной функции звена аэродинамического мультиплицирования. На основании линеаризованной модели звена аэродинамического мультиплицирования (см. рис.2) может быть составлена модель в переменных состояния в матричной форме (проходная матрица отсутствует) [6]:

$$\begin{cases} \dot{x}=A\cdot x+B\cdot u \\ y=C\cdot x \end{cases} \tag{18}$$

Системе (18) соответствуют следующие матрицы:

$$A=\begin{pmatrix} \frac{a_{1.1}-a_{4.1}-3\cdot a_{4.2}\cdot a_{3.2}\cdot a_{2.2}\cdot R_Z^*}{J_1^*} & \frac{-3\cdot a_{4.2}\cdot\left(a_{3.1}+a_{3.2}\cdot a_{2.1}\right)}{J_1^*} \\ \frac{a_{2.2}\cdot R_Z^*}{J_2^*} & \frac{a_{2.1}}{J_2^*} \end{pmatrix}, \tag{19}$$

$$B=\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-1}{J_2^*} \end{pmatrix},\ C=\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix},\ x=\begin{pmatrix} \omega_1^* \\ \omega_2^* \end{pmatrix},$$

где: J_1^*, J_2^* - моменты инерции первичной и вторичной аэромеханических подсистем в относительных единицах.

Передаточная функция определяется с помощью матричного выражения [6]:

$$W\left(p\right)=C\cdot\left(p\cdot I-A\right)^{-1}\cdot B\,, \tag{20}$$

где I - единичная матрица.

После соответствующих преобразований получаем передаточную функцию звена:

$$W\left(p\right)=\frac{Ky}{T^2\cdot p^2+2\cdot\xi\cdot T+1}\,, \tag{21}$$

где:

$$Ky=\frac{\left(a_{3.1}\cdot a_{4.4}+a_{2.1}\cdot a_{3.2}\cdot a_{4.4}\right)}{\left(\frac{1}{3}\cdot a_{1.1}\cdot a_{2.1}-\frac{1}{3}\cdot a_{2.1}\cdot a_{4.1}+R_Z^*\cdot a_{2.2}\cdot a_{3.1}\cdot a_{4.4}\right)}, \quad (22)$$

$$T=\sqrt{\frac{\left(\frac{1}{3}\cdot J_1^*\cdot J_2^*\right)}{\left(\frac{1}{3}\cdot a_{1.1}\cdot a_{2.1}-\frac{1}{3}\cdot a_{2.1}\cdot a_{4.1}+R_Z^*\cdot a_{2.2}\cdot a_{3.1}\cdot a_{4.4}\right)}}, \quad (23)$$

$$\xi=\frac{\left(\frac{1}{3}\cdot J_2^*\cdot a_{1.1}-\frac{1}{3}\cdot J_2^*\cdot a_{2.1}+\frac{1}{3}\cdot J_2^*\cdot a_{4.1}+J_2^*\cdot R_Z^*\cdot a_{2.2}\cdot a_{3.2}\cdot a_{4.2}\right)}{2\cdot T\cdot\left(\frac{1}{3}\cdot a_{1.1}\cdot a_{2.1}-\frac{1}{3}\cdot a_{2.1}\cdot a_{4.1}+R_Z^*\cdot a_{2.2}\cdot a_{3.1}\cdot a_{4.4}\right)}. \quad (24)$$

Выводы

1. В результате линеаризации нелинейной модели звена аэродинамического преобразования была получена передаточная функция данного звена и предложена методика расчета ее параметров.

2. Значения параметров передаточной функции зависят от положения рабочей точки на статической траектории регулирования. В соответствии с этим их значения являются функциями скорости первичного воздушного потока.

3. Параметры регулятора, определяемые с помощью полученной передаточной функции, могут корректироваться в зависимости от информации от датчика скорости первичного воздушного потока в соответствии с заданной рабочей точкой.

Список литературы: **1.** *Голубенко Н.С.* Моделированиеэлектромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиместабилизациискоростиветровых турбин / *Н.С.Голубенко, П.Д.Андриенко, И.Ю.Немудрый, Д.Г.Алексеевский* // Эл.техника и эл.энергетика. – 2011. – № 1.– С.70-73. **2.** *Миргород В. Ф.* Управление ветроэнергетической установкой большой мощности по запасам аэродинамической устойчивости / *В. Ф. Миргород* // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 67–70. **3.** *Алексеевский Д.Г.* Динамика ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией / *Д.Г.Алексеевский, В.П.Метельский, И.Ю.Немудрый* // Електротехніка та комп'ютерні системи. -2011. - №3 (79), – С. 253 – 254. **4.** *Дорф Р.* Современные системы управления/ *Р. Дорф, Р. Бишоп.* Пер. с англ. *Б.И. Копылова*. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.- 832с.:ил. **5.** *Кривцов В.С.* Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / *В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев*. - Учебник. - Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк.авиац. ин-т", Севастополь:Севаст.нац. тех. ун-т,2003.- 400 с. **6.** *Филлипс Ч.* Системы управления с обратной связью / *Ч. Филлипс,Р. Харбрр.* Пер. с англ. *Б.И. Копылова*. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. - 616с.:ил.

Bibliography (transliterated): **1.** Golubenko, N. S., et al. "Modelirovanie elektromehanicheskoj sistemy vetroenergeticheskoj ustanovki s aerodinamicheskim multiplikatorom v rezhyme stabilizacii skorosti vetrovyh turbin." *El.tekhnika i el.energetika* 1(2011): 70-73. Print. **2.** Mirgorod, V. F. "Upravleniye vetroenergeticheskoy ustanovkoy bolshoy moshchnosti po zapasam aerodinamicheskoyustoychivosti."*Vestnik dvigatelestroyeniya*3(2009): 67–70. Print. **3**. Alekseevskiy, D. G., V. P. Metelsky, and I. Yu. Nemudry. "Dinamika vetroelektricheskoy ustanovki s aerodinamicheskoy multiplikatsiyey." *Yelektrotekhnika ta komp'yuterni sistemi*3.79(2011): 253–254. Print. **4**. Dorf, R., and R. Bishop. *Sovremennye sistemy upravleniya.* Per. s angl. B.I. Kopylova. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znany, 2002. Print. **5**. Krivtsov, V.S.,A. M. Oleynikov, and A. I. Yakovlev. *Neischerpayemaya energiya*. *Vetroelektrogeneratory.*Vol. 1. Kharkov: Nats. aerokosm.un-t "Khark.aviats. in-t"; Sevastopol:Sevast.nats. tekh. un-t,2003. Print.**6.** Fillips, Ch., endR. Kharbrr. *Sistemy upravleniya s obratnoy svyazyu.* Per. s angl. B.I. Kopylova. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znany, 2001. Print.

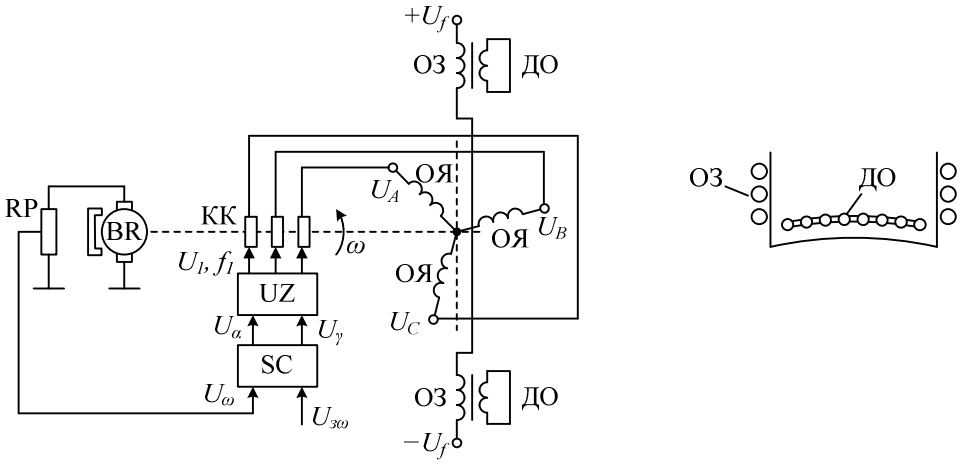
Поступила (received)

УДК 62-83

Д. І. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри АЕМС, ДонДТУ, Лисичанськ;
І. С. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, проф., професор кафедри АЕМС, ДонДТУ, Лисичанськ

АСИНХРОННІ РЕЖИМИ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА БАЗІ ЯВНОПОЛЮСНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ОБЕРНЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

У якірній обмотці нормальної машини постійного струму (МПС) при змінній швидкості протікають такі ж процеси, як і у якірній обмотці явнополюсної синхронної машини (СМ) оберненої конструкції при відповідному частотному управлінні останньою [1]. Відмінність лише в тому, що асинхронні режими в першій виникають тільки в динаміці, а в другій – при невідповідному управлінні частотою напруги ротора. Через те, що швидкість обертання магнітного потоку відносно якоря у першому випадку жорстко зв'язана з частотою обертання останнього завдяки колектору як перетворювачу частоти, а незалежний перетворювач частоти, що живить обмотку якоря, яка розміщена на роторі СМ, може мати частоту не жорстко пов'язану з частотою обертання ротора. Функціональна схема безколекторної машини постійного струму (БКМПС) показана на рисунку 1.



$U_{з\omega}, U_{\omega}$ – сигнали завдання на рівень швидкості ротора та фактичної швидкості відповідно;

U_{α}, U_{γ} – сигнали управління частотою (U_{α}) та амплітудою (U_{γ}) якірних напруг МПС;

U_1 (U_A, U_B, U_C) – якірні напруги; U_f – напруга збудження;

SC – система керування; UZ – перетворювач частоти; BR – датчик швидкості ротора;
КК – контактні кільця; ОЗ, ОЯ, ДО – обмотки збудження, якоря, демпферна на полюсах відповідно

Рис. 1 Функціональна схема БКМПС

Асинхронні режими у двигуні протікають коли роторний магнітний потік (обмотки якоря) не є нерухомим у просторі, тобто рухається відносно ротора у зворотному напрямку або повільніше, ніж сам ротор.

У цих режимах на валу машини генерується декілька моментів, а саме:

1) взаємодією (трансформаторною) магнітного потоку якірних обмоток, що рухається у просторі, з обмоткою збудження (ОЗ) і демпферними (ДО), які знаходяться на нерухомих полюсах – так званий **асинхронний** момент;

2) взаємодією магнітних потоків полюсів і якірної обмотки – так званий **синхронний** момент;

3) взаємодією магнітного потоку якірної обмотки з явнополюсною конструкцією полюсів на статорі – так званий **реактивний** момент;

4) взаємодією магнітного потоку полюсів з замкненою рухомою якірною обмоткою – так званий момент **динамічного гальмування**.

При аналізі цих складових моменту приймемо такі спрощуючі припущення:

1) усі обмоткові параметри незмінні;

2) напруги перетворювача частоти синусоїдальні перемінної частоти $f_1 = f_{1н} \cdot \alpha$ та амплітуди $U_m(f_1)$, де $\alpha = f_1 / f_{1н}$ – відносне значення цієї частоти;

3) магнітна система машини ненасичена;

4) магнітні потоки полюсів і якоря розподілені у просторі синусоїдально.

© Д. І. Морозов, І. С. Шевченко, 2015

При прийнятих припущеннях вирази для вказаних складових моменту можна одержати, використовуючи принцип суперпозиції.

Асинхронний момент визначається активними втратами в замкненій обмотці збудження і демпферних від рухомого у просторі якірного потоку. Виходячи з теорії двох реакцій, вторинну систему ОЗ та ДО при розрахунках можна подати різними опорами по повздовжній і поперечній осях відповідно: r_f; $x_f \cdot \alpha$; r_{Dd}; $x_{Dd} \cdot \alpha$; r_{Dq}; $x_{Dq} \cdot \alpha$. Схема заміщення для цього випадку наведена на рисунку 2. Ключ К забезпечує замкнений або розімкнений стан ОЗ (без струму збудження). На схемі позначено:

r_1, x_1 – активний та реактивний (від потоку розсіяння при номінальній частоті $f_{1н}$) опір якірної обмотки;

x_{ad}, x_{aq} – реактивні опори якірної обмотки від робочого потоку по повздовжній та поперечній осях відповідно ($f_1 = f_{1н}$);

r_f, x_f – активний та реактивний опори обмотки збудження;

r_{Dd}, x_{Dd}, r_{Dq}, x_{Dq} – активні та реактивні опори демпферної обмотки по повздовжній і поперечній осях відповідно.

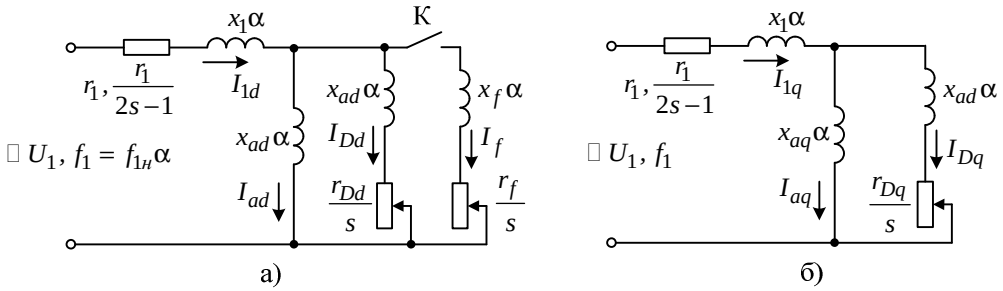


Рис. 2 Схема заміщення для розрахунку асинхронного моменту:
а – по повздовжній осі «d»; б – по поперечній осі «q»

Оскільки вторинна система (ОЗ, ДО) несиметрична, то пульсуючі поля цих обмоток приходиться розкладати на рухомі поля з прямим слідуванням і зворотнім та розглядати їх дію окремо. Опори r_1 і $r_1/(2s-1)$ якраз і відповідають такому підходу (перше – прямому, друге – зворотному).

Необхідно наголосити, що оскільки реалізується частотне регулювання двигуном, то раціонально використовувати не відносне ковзання $s = \Delta\omega / \omega_0$, а абсолютне $\beta = \dfrac{\Delta\omega}{\omega_{0н}} = \dfrac{\Delta\omega}{\omega_0 / \alpha} = s\alpha$.

Виходячи із схеми заміщення (рис. 2), напруги на намагнічувальному контурі якірної обмотки машини (ЕРС E_d, E_q), а значить, і на еквівалентних обмотках полюсів по відповідних осях, що приведені до числа витків і частоти двофазної обмотки якоря, можна подати так:

$$\begin{cases} \dot{E}_d = \dot{E}_1 + \dot{E}_3 = Z_{ad1} \cdot \dot{I}_1 + jZ_{ad3} \cdot \dot{I}_3; \\ \dot{E}_q = -j\dot{E}_1 + j\dot{E}_3 = -j\dot{I}_1 \cdot Z_{aq1} + j\dot{I}_3 \cdot Z_{ad3}, \end{cases} \tag{1}$$

де $\dot{E}_1$, $\dot{I}_1$, Z_{ad1} – ЕРС, струм і опір прямого слідування;

$\dot{E}_3$, $\dot{I}_3$, Z_{ad3} – ЕРС, струм і опір зворотного слідування;

$$Z_{ad1} = Z_{ad3} = Z'_{ad} = \frac{1}{\dfrac{1}{jx_{ad} \cdot \alpha} + \dfrac{1}{\dfrac{r_a}{s} + jx_{ad} \cdot \alpha} + \dfrac{1}{\dfrac{r_{Dd}}{s} + jx_{Dd}}}; \tag{2}$$

$$Z_{aq1} = Z_{aq3} = Z'_{aq} = \frac{1}{\dfrac{1}{jx_{aq} \cdot \alpha} + \dfrac{1}{\dfrac{r_{Dq}}{s} + jx_{Dq} \cdot \alpha}}. \tag{3}$$

Тоді складові якірного струму одержимо у такому вигляді:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_d + j\dot{I}_q}{2}; \; \dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_d - j\dot{I}_q}{2}, \tag{4}$$

а ЕРС

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1 \dfrac{Z'_{ad} + Z'_{aq}}{2} + \dot{I}_3 \dfrac{Z'_{ad} - Z'_{aq}}{2}; \\ \dot{E}_3 = \dot{I}_1 \dfrac{Z'_{ad} - Z'_{aq}}{2} + \dot{I}_3 \dfrac{Z'_{ad} + Z'_{aq}}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Напруга $\dot{U}_1$, що підводиться до якірної (роторної) обмотки, має, природно, пряме слідування, частоту $f_1 = f_{1н} \cdot \alpha$ синусоїдального характеру та врівноважена ЕРС $\dot{E}_1$ і падінням напруги від струму $\dot{I}_1$ прямого слідування:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1 \cdot \alpha). \quad (6)$$

Падіння ж напруг від струму зворотного слідування I_3, що мають частоту $f_1(2s-1)$, врівноважені ЕРС $\dot{E}_3$, тобто:

$$0 = \dot{E}_3 + \dot{I}_3 \left(\frac{r_1}{2s-1} + jx_1 \cdot \alpha \right). \quad (7)$$

Використовуючи (1–6), виразам складових струмів якірних обмоток, можна надати такого вигляду:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{U}_1 \dfrac{Z'_{d3} + Z'_{q3}}{Z'_{d1} Z'_{q3} + Z'_{d3} Z'_{q1}}; \\ \dot{I}_3 = -\dfrac{Z'_{d1} - Z'_{q1}}{Z'_{d3} + Z'_{q3}} \dot{I}_1, \end{cases} \quad (8)$$

де $Z'_{d1} = Z'_{ad} + r_1 + jx_1 \cdot \alpha$; $Z'_{q1} = Z'_{aq} + r_1 + jx_1 \cdot \alpha$; (9)

$$Z'_{d3} = Z'_{ad} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_1 \cdot \alpha; \; Z'_{q3} = Z'_{aq} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_1 \cdot \alpha. \quad (10)$$

Момент на валу машини є сумою двох складових:

$$M_a = M_1 + M_2 = I_1^2 \frac{r'_{2e}}{s} + I_3^2 \frac{r_1}{2s-1}, \quad (11)$$

де r'_{2e} / s – дійсна частина комплексу еквівалентного опору Z'_{2e} обмоток на головних полюсах машини:

$$Z'_{2e} = \frac{1}{2} \left[(Z'_{ad} + Z'_{aq}) - \frac{(Z'_{ad} - Z'_{aq})^2}{Z'_{d3} + Z'_{q3}} \right].$$

Взаємодію магнітних потоків якірної обмотки та збудження (так званий **синхронний момент**) можна описати відомою формулою

$$M_{cx} = \frac{3}{2} p_n \frac{x_{ad}}{\omega_{0н}} \vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2, \quad (12)$$

де $\vec{I}_1$, $\vec{I}_2$ – узагальнені вектори струмів вказаних обмоток відповідно.

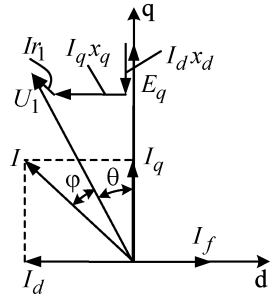


Рис. 3 Векторна діаграма БКМПС з врахуванням активного опору статора

Оскільки векторний добуток вимагає знання просторового кута між потоками, то його можна визначити з векторної діаграми (рис. 3). З неї можна визначити величини струмів якірної обмотки по осях «d» і «q» [2]:

$$\begin{cases} I_d = \dfrac{1}{Z_d} \left[U_1 \cos(\theta + \delta) - E_0 \cos\delta \right]; \\ I_q = \dfrac{1}{Z_q} \left[U_1 \sin(\theta + \delta) - E_0 \sin\delta \right], \end{cases} \quad (13)$$

де E_0 – величина ЕРС, що наводиться в обмотці якоря потоком ОЗ;

Z_d – величина опору якірної обмотки по осі «d» в режимі к.з.,

$$Z_d = \sqrt{r_1^2 + (x_d \alpha)^2}, \; \sin\delta = r_1 / Z_d, \; \cos\delta = x_d \alpha / Z_d.$$

Величину кута δ можна сприйняти як показник впливу r_1 на синхронний момент. В реальних БКМПС ця величина не перевищує $15° \div 20°$ при номінальній частоті.

Фактично величина моменту M_{cx} визначається електромагнітною потужністю, що «працює» в зазорі:

$$M_e = P_e / \omega_0 ;\ P_e = P_\partial - \Delta P_1 = mU_1 I_1 \cos\varphi_1 - mI_1^2 r_1 , \tag{14}$$

де P_∂, ΔP – активна потужність, що споживається машиною від джерела та втрати в її якірній обмотці відповідно,

$$\Delta P = \frac{3}{Z_d}\left[U_1^2 - E_0^2 - 2U_1 E_0 \cos\theta\right] sin\,\delta ; \tag{15}$$

$$M_{cx} = \frac{3}{Z_d}\left[U_1 E_0\, sin(\theta+\delta) - E_0^2\, sin\,\delta\right] . \tag{16}$$

Як видно з (16) кут δ, тобто наявність r_1, «зсовує» криву $M_{cx}(\theta)$ вліво та вниз в область генераторних (гальмівних) моментів. Враховуючи, що максимальний генераторний момент за рахунок втрат в якірній обмотці більший ніж двигунний, середнє значення M_{cx} за кожний оберт ротора буде мати гальмівний характер. Необхідно наголосити, що кут θ при асинхронному русі ротора є функцією не тільки навантаження, а й швидкості ротора ($\theta = p_n \omega t$) та часу. Тому M_{cx} машини при перемінній швидкості буде мати пульсуючий характер зі змінною частотою $f_m = p_n \omega / 2\pi = var$ (рис. 4). На рисунку 4 наведені залежності змінення синхронного момента від часу при різних фіксованих частотах напруги живлення і швидкостях з забезпеченням незмінного абсолютного ковзання. При розрахунку я кості електричних параметрів БКМПС прийняті значення параметрів синхронного двигуна СМ 136-8 ($P_н = 146$ кВт, $n_н = 750$ об/мин, $U_н = 380$ В, $I_н = 312$ А, $J = 21{,}75$ кгм^2). Струм обмотки збудження машини прийнято номінальним (тобто ЕРС E_0 пропорційна швидкості обертання ротора, $\omega^* = \alpha - \beta$). Закон змінення напруги якоря прийнято пропорційним частоті $U_1 \equiv \alpha$.

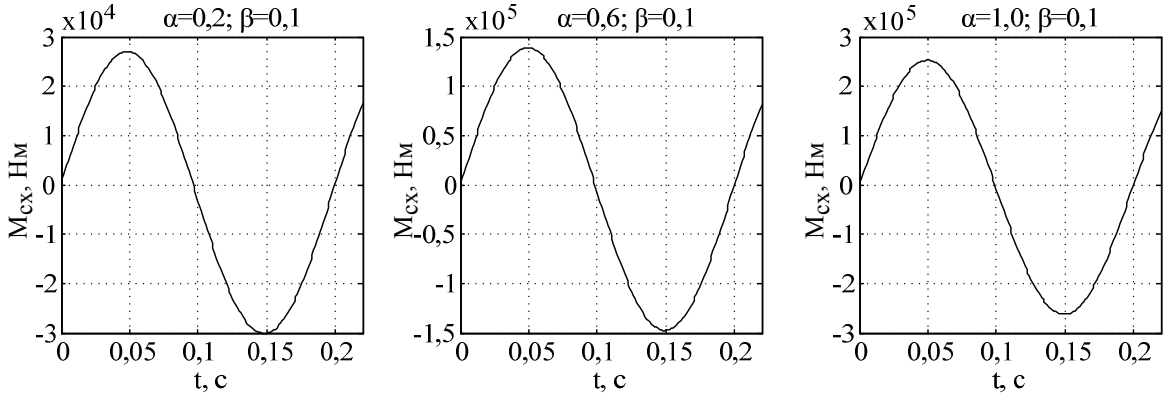


Рис. 4 Процеси змінення синхронного моменту при $\beta = 0{,}1$ і різних α

Реактивний момент M_p, що генерується взаємодією потока якоря з магнітопроводом статора машини, що має явнополюсну конструкцію, визначається також електромагнітною потужністю в зазорі. Використовуючи попередній підхід, після перетворень маємо

$$M_p = \frac{3}{\omega_0}\left[\left(\frac{E_{qq}}{Z_q} - \frac{E_0}{Z_d}\right) U_1\, sin(\theta+\delta) - \left(\frac{E_{qq}^2}{Z_q} - \frac{E_0^2}{Z_d}\right) sin\,\delta\right] , \tag{17}$$

де Z_q – величина головного опору якірної обмотки по поперечній осі в режимі к.з.,

$$Z_q = \sqrt{r_1^2 + (x_q \alpha)^2} ;$$

E_{qq} – еквівалентна ЕРС явнополюсної БКМПС, якщо розглядати її як неявнополюсну з синхронним опором, що дорівнює x_q реальної явнополюсної машини,

$$E_{qq} = E_0 + I_d (x_d - x_q)\alpha = E_0\left(\frac{x_q}{x_d}\right) + \left(1 - \frac{x_q}{x_d}\right) U_1 \cos\theta . \tag{18}$$

Якщо підставити E_{qq} в (17), то у виразі M_p з'являється складова, яка змінюється з подвійною частотою по відношенню до кута θ, що спостерігається і при нехтуванні втратами в r_1.

При відсутності магнітної асиметрії ($x_d = x_q$, $E_{qq} = E_0$) реактивний момент відсутній. Якщо нехтувати втратами в обмотці якоря ($r_1 = 0$, $\delta = 0$), вираз (17) трансформується у загальновідомий (при $\alpha = 1$) для реактивного момента:

$$M_p = \frac{3U_1^2}{2\omega_{0н}\alpha^2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) sin\,2\theta\,. \tag{19}$$

Четверта складова моменту генерується взаємодією магнітного потоку полюсів статора з наведеними ним струмами в замкненій обмотці якоря – так званий момент динамічного гальмування $M_{\partial г}$. У цьому випадку магнітна система ротора (якірної обмотки) є симетричною відносно полюсів індуктора (статора), і можна скористатися схемою заміщення рис. 2,а, замкнувши накоротко якірну обмотку ($U_1 = 0$), ліквідувавши гілку демпферної обмотки ($r_{\partial o} = x_{\partial o} = \infty$), оскільки остання нерухома відносно полюсів, і замінивши обмотку збудження з опорами r_f, x_f джерелом струму $I_f = const$. Скориставшись традиційним підходом ($M_e = P_e / \omega_0$) одержимо відомий вираз моменту динамічного гальмування асинхронної (синхронної) машини при збудженні її постійним струмом

$$M_{\partial г} = \frac{2M_{к\partial}}{\frac{s'_\partial}{s'_{к\partial}} + \frac{s'_{к\partial}}{s'_\partial}} = \frac{2M_{к\partial}}{\frac{\beta_\partial}{\beta_{к\partial}} + \frac{\beta_{к\partial}}{\beta_\partial}}\,, \tag{20}$$

де $M_{к\partial}$ – максимальне (критичне) значення гальмівного моменту,

$$M_{к\partial} = \frac{3I_e^2 x_{ad}^2 \alpha^2}{2(\omega_{0н}\alpha)(x_{ad} + x_1)\alpha} = \frac{3I_e^2 x_{ad}^2}{2\omega_{0н}(x_{ad} + x_1)}\,, \tag{21}$$

I_e – еквівалентне (за намагічувальною силою) значення намагнічувального струму трифазної обмотки ротора однофазній обмотці збудження,

$$I_e = k_{сх} I_f\,; \tag{22}$$

s'_∂, $s'_{к\partial}$, β_∂, $\beta_{к\partial}$ – відповідно відносне та абсолютне ковзання ротора відносно нерухомого магнітного поля полюсів,

$$s'_\partial = \frac{\omega}{\omega_{0i}} = \frac{\omega}{\omega_{0н}\alpha} = \frac{\beta_\partial}{\alpha}\,;\; s'_{к\partial} = \frac{\omega_к}{\omega_{0i}} = \frac{\omega_к}{\omega_{0н}\alpha} = \frac{\beta_{к\partial}}{\alpha}\,;\; \omega_{0i} = 2\pi f_i / p_n = \omega_{0н}\alpha\,;$$

$\omega_к$ – значення швидкості, при якій механічна характеристика «зламується», тобто при максимальному значенні гальмівного моменту $M_{к\partial}$.

Процеси змінення повного електромагнітного моменту БКМПС (суми всіх його складових) в асинхронному режимі при різних частотах підведених напруг і абсолютних ковзаннях наведені на рис. 5. Процеси одержані на динамічній моделі БКМПС, приведеній в [1]. При моделюванні прийнято живлення обмотки збудження від джерела напруги з номінальним її значенням; швидкість обертання ротора забезпечена незмінною і такою, що відповідає частоті напруги живлення і абсолютному ковзанню; закон змінення напруги якоря $U / f = const$, тобто напруга якоря пропорційна частоті живлення. Процеси змінення моментів показані в квазіусталеному режими, коли перехідні складові в струмах и потокозчепленнях обмоток загали.

На рис. 5 під відповідними графіками двох періодів пульсацій момента наведені його Фур'є-складові: M_0 – середнє значення (сума асинхронного момента і момента динамічного гальмування), M_1 – перша гармоніка (синхронний момент), M_2 – друга гармоніка (реактивний момент). За процесами бачимо, що синхронний та реактивний моменти у всіх випадках практично однакові. Непостійність цих складових визначається впливом опору якоря і змінністю струму збудження, що викликана наведенням в обмотці збудження ЕРС – при живленні ОЗ від джерела напруги в асинхронному режимі струм збудження має і пульсуючу складову. Окрім того, при законі $U / f = const$ точно не забезпечується незмінність потоку якоря. Асинхронний момент (M_0) очікувано збільшується при збільшенні абсолютного ковзання та частоти живлення ротора за рахунок збільшення ЕРС, що наводиться в обмотці та збільшенні потоку при збільшенні напруги і частоти за законом $U / f = const$. При $\alpha = 1$ і $\beta = 0{,}1$ асинхронний момент практично дорівнює номінальному (для обраної машини $M_н = 1859{,}9$ Нм), отже при «правильній» організації керування в асинхронному режимі виникнення цього момента може зіграти суттєву роль.

Висновок. Аналіз складових момента БКМПС в асинхронному режимі підтверджує, що для аналізу електромагнітного перетворення енергії в БКМПС можна застосовувати такі ж підходи, як і для синхронної машини – представлення електромагнітного момента сумою складових, кожна з яких визначається різними явищами. Появлення асинхронного моменту повинно враховуватися при формуванні керувань БКМПС в режимах змінення швидкості.

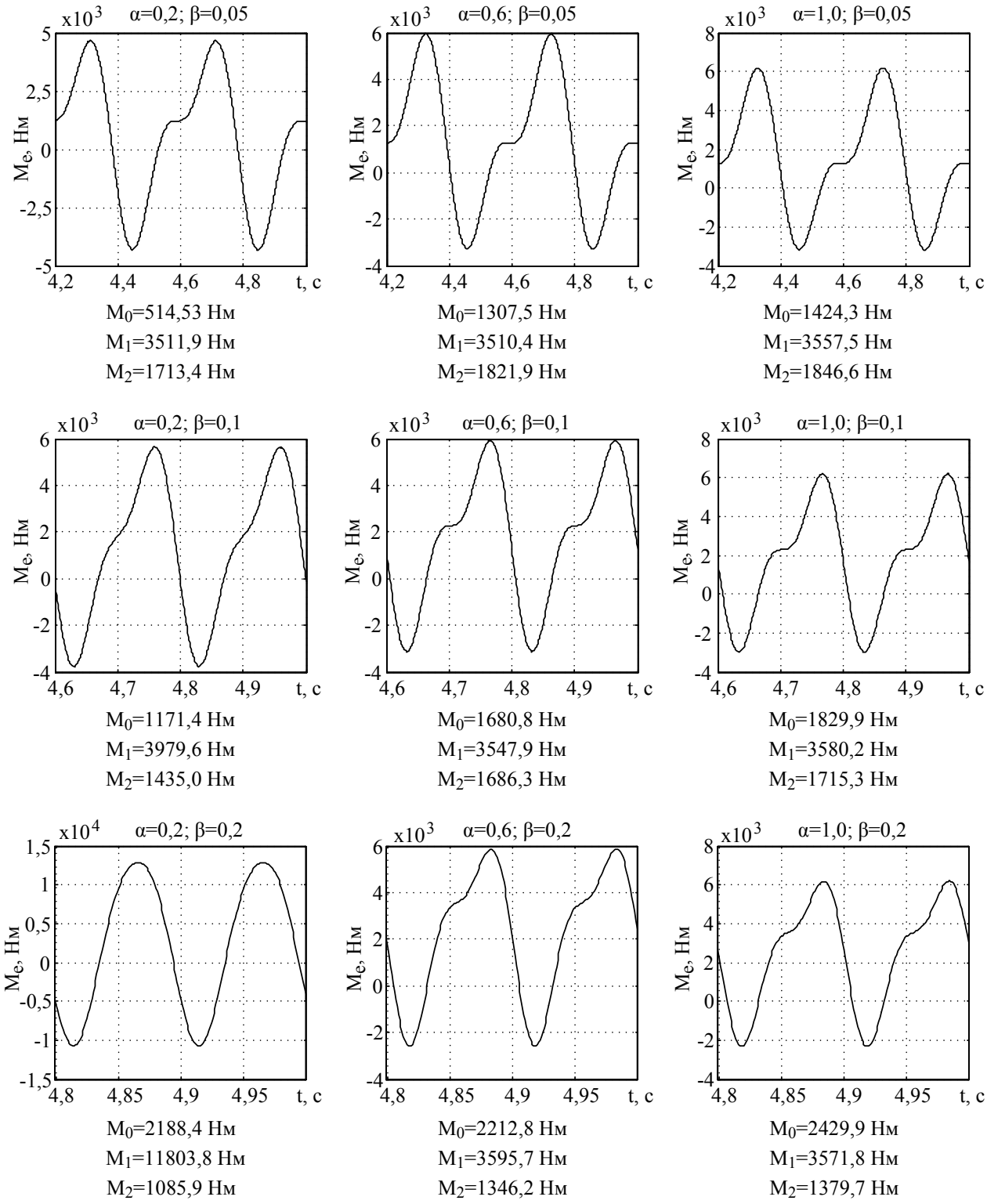


Рис 5. Процеси змінення повного моменту БКМПС в асинхронному режимі

Список літератури: **1.** Морозов Д. І. Вентильний двигун постійного струму на базі синхронної машини оберненої конструкції / Д. І. Морозов, І. С. Шевченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 6-12. **2.** Шевченко І. С. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка синхронного електропривода / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. – К.: Кафедра, 2014. – 276 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Morozov, D. I., I. S. Shevchenko. "Ventyl'nyj dvygun postijnogo strumu na bazi synhronnoi' mashyny obernenoi' konstrukcii'". Elektrotehnika ta elektroenergetyka. No. 2 (2014): 6-12. Print. **2.** Shevchenko, I. S., D. I. Morozov. Special'ni pytannja teorii' elektropryvoda. Dynamika synhronnogo elektropryvoda. Kiev: Kafedra, 2014. Print.

Надійшла (received) 02ю08ю2015

Современные системы промышленного электропривода

УДК 62.83.52

В. М. ЧЕРМАЛЫХ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПИ»;
А. В. ЧЕРМАЛЫХ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПИ»;
И. Я. МАЙДАНСКИЙ, ст. преп., НТУУ «КПИ».

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Введение. Ленточные конвейеры обладают многими технологическими преимуществами перед другими транспортными средствами и, поэтому, являются наиболее распространенными установками в различных отраслях промышленности, в частности горнорудной. При эксплуатации ленточных конвейеров расходы на электроэнергию достигают 45% всех издержек и существенно влияют на себестоимость основной продукции. Поэтому основной целью проводимых в настоящее время научно-исследовательских и проектных работ является снижение энергоемкости транспортирования грузов. Электроэнергия, потребляемая электроприводом ленточного конвейера, в основном расходуется на преодоление различных сопротивлений движению тягового органа и для конвейеров средней и большой длины может достигать 95% от всего энергопотребления. Поэтому, основными требованиями при проектировании современных ленточных конвейеров являются уменьшение величин сопротивлений движению ленты, а также выбор соответствующей системы электропривода.

Технология функционирования конвейерных установок предполагает продолжительную работу в течение значительного промежутка времени вследствие загрузки, транспортирования и разгрузки материалов в непрерывном режиме. Характерной особенностью является неравномерность грузопотока, поступающего на ленту конвейера. В результате при постоянной скорости происходит недогруз конвейера, что приводит к снижению статической нагрузки электропривода. При этом ухудшаются энергетические показатели, так как большая часть энергии тратится на перемещение ленты по роликам с одновременным увеличением удельного расхода энергии на транспортирование полезного груза. Снижение энергопотребления возможно за счет применения регулируемого электропривода. Изменение скорости необходимо производить в функции грузопотока таким образом, чтобы обеспечивать полную загруженность ленты, тем самым стабилизируя статическую нагрузку привода конвейерной установки.

Постановка задачи. В большинстве литературных источников, рассматриваются в отдельности или только электропривод или непосредственно сам конвейер, что не позволяет получить полную информацию об эффективности функционирования всей конвейерной установки. В этой связи представляет интерес и актуальность решение вопроса разработки универсальной имитационной модели конвейерной установки в целом на основе виртуальной составляющей. Такой подход, в отличие от наиболее распространенных структурных моделей, позволяет оценить динамику поведения системы, близкую к реальной, а также получить информацию о протекании энергетических процессов.

Материалы исследования. Предлагаемый материал является продолжением и дополнением работ [1,2]. Ленточный конвейер рассматривается как единый технологический комплекс совместно с перспективным энергосберегающим частотно-регулируемым электроприводом.

Целью работы является оценка динамических показателей и энергопотребления конвейерной установки на основе исследования технологических режимов работы ленточного конвейера на базе частотно-регулируемого электропривода с промежуточным звеном постоянного тока с помощью имитационной компьютерной модели, синтезированной в среде *MATLAB - Simulink - SimPowerSystems*.

При построении универсальной модели конвейерной установки учитывалась структура современного автоматизированного электропривода, состоящая из нескольких относительно независимых частей.

Силовой канал реализован в специализированном пакете *SimPowerSystems*, который фактически и дает возможность приблизить компьютерные исследования режимов работы электромеханических систем, близких к поведению реальных объектов [3].

Управляющий канал построен на основе блоков основного пакета *Simulink*, которые в последних версиях системы *MATLAB* являются универсальными и позволяют при моделировании сложных объектов решать практически любые задачи [4].

Для моделирования механической части ленточного конвейера необходимо иметь соответствующее математическое описание исследуемых процессов. Следующим этапом является использование специальных математических блоков из библиотек пакета *Simulink*, реализующих необходимые зависимости в требуемой последовательности их выполнения.

Визуализацию процесса моделирования обеспечивают виртуальные осциллографы временных зависимостей и графопостроители фазовых траекторий. Численные значения переменных позволяют получить цифровые дисплеи.

Имитационная модель ленточного конвейера приведена на рис. 1. Она выполнена комбинированной и содержит виртуальную, структурную и математическую составляющие.

© В.М. Чермалых, А.В. Чермалых, И.Я. Майданский, 2015

Виртуальная составляющая определяет силовой канал частотно-регулируемого асинхронного электропривода, структурная – систему управления преобразователем частоты, математическая – механическую часть ленточного конвейера.

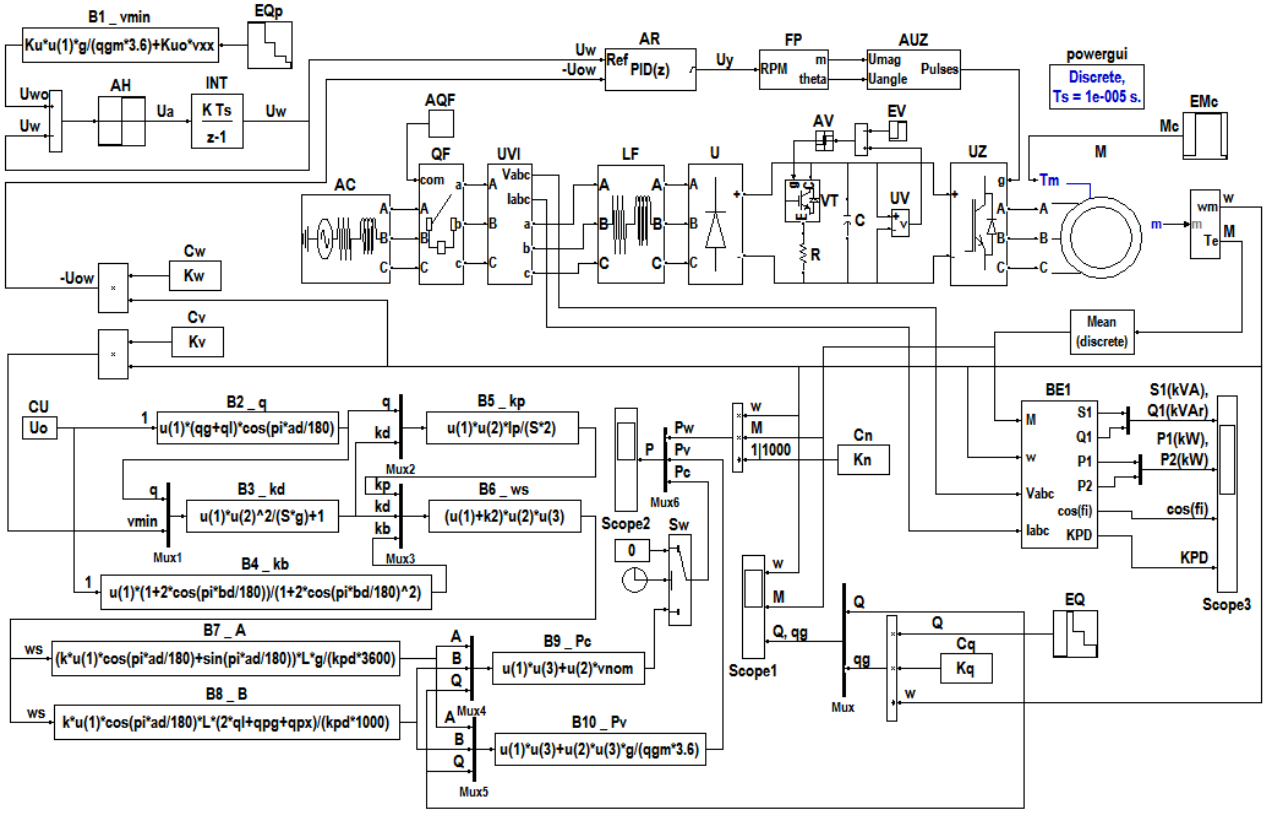


Рис. 1 Имитационная модель ленточного конвейера

Элементы силового канала электропривода с указанием в скобках основных параметров, вводимых в поля настроек соответствующих блоков:

AC – трехфазная сеть переменного тока (линейное напряжение, частота сети, сопротивление и индуктивность источника);

QF – силовой автоматический выключатель на входе (сопротивление в замкнутом состоянии);

AQF – блок управления автоматом (времена подачи сигналов на включение/отключение);

UVI – трехфазные датчики напряжений и токов (вид напряжений – линейные или фазные);

LF – фильтр электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью (сопротивление и индуктивность);

U – выпрямитель на диодах (сопротивление вентилей, падение напряжения на них);

VT – транзистор *IGBT* (сопротивление) для подключения тормозного резистора *R* (сопротивление);

C – конденсаторный фильтр в звене постоянного тока (емкость);

UV – датчик напряжения в звене постоянного тока (отсутствуют);

UZ – автономный инвертор напряжения преобразователя частоты на транзисторных *IGBT*-модулях (сопротивление в открытом состоянии, падение напряжения на транзисторах и обратных диодах);

M – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (мощность, напряжение, частота сети, сопротивление и индуктивность статора, приведенные к статору сопротивление и индуктивность ротора, взаимная индуктивность, момент инерции, коэффициент трения, число пар полюсов, начальное состояние машины).

Система управления выполнена по современной структуре с цифровым ПИД-регулятором скорости *AR*. Управление автономным инвертором в режиме ШИМ-модуляции с заданной частотой коммутации вентилей обеспечивает блок *AUZ*, а закон скалярного управления $U / f = const$ реализует функциональный преобразователь *FP*. Нелинейный элемент *AV* управляет блоком тормозного резистора относительно величины задаваемого блоком *EV* максимального напряжения в звене постоянного тока.

Блок *Cw* задает в виде константы требуемый коэффициент передачи K_w отрицательной обратной связи по скорости. Блоки *Cn*, *Cv* обеспечивают согласование между физическими величинами соответственно по активной мощности K_n и линейной скоростью K_v ленты конвейера.

На входе системы применено типовое устройство в виде задатчика интенсивности, реализованного на базе нелинейного элемента *AH* и цифрового интегратора *INT*.

Подсистема *BE*1 по сигналам от датчиков напряжений и токов определяет основные энергетические характеристики: полную *S*1, активную *P*1 и реактивную мощности *Q*1, потребляемых системой из сети, а также коэффициент мощности cosφ и коэффициент полезного действия η. Кроме того, вычисляется активная механическая мощность на валу электродвигателя *P*2.

Блоки *EQp*, *EQ* і *EMc* формируют амплитудно-временные диаграммы изменения величин соответственно поступающего на ленту грузопотока, производительности на выходе конвейера и статического момента электропривода.

Регулирование скорости конвейера производится в функции грузопотока, который поступает на конвейер, с учетом изменения коэффициента сопротивления движению ленты по роликам. При этом, поддерживается постоянным погонная нагрузка от транспортируемого материала.

Механическая часть конвейера моделируется с помощью вычислителей *B*1 ... *B*10, которые с помощью объединителей *Mux*, *Mux*1 ... *Mux*5 выбирают необходимые входные сигналы для реализации требуемой математической зависимости.

Согласно методике, приведенной в работе [5], для определения коэффициента сопротивления движению ленты конвейера, а также потребляемых активных мощностей для нерегулируемого и регулируемого электропривода необходимо последовательно реализовать соответствующие формулы с определением требуемых величин.

Минимальная скорость ленты $v_{\min}$, при которой сохраняется постоянной и максимальной погонная нагрузка $q_{g\max}$ от перемещаемого материала (вычислитель *B*1)

$$v_{\min} = \frac{Q \cdot g}{3{,}6 q_{g\max}},$$

где Q – производительность конвейера, т/ч; g - ускорение силы тяжести, м/с^2.

Погонная нагрузка q от груза q_g и ленты q_l с учетом угла наклона конвейера α (вычислитель *B*2)

$$q = \left(q_g + q_l\right) \cdot \cos б.$$

Коэффициенты, учитывающие влияние инерционной силы при прохождении ленты и груза через роликоопору K_d (вычислитель *B*3) и неравномерности распределения нагрузки между центральным и боковыми роликами K_β (вычислитель *B*4)

$$k_d = 1 + \frac{q}{g \cdot S} \cdot v^2, \qquad k_в = \frac{1 + 2a \cdot \cos в}{1 + 2a \cdot \cos^2 в},$$

где S - натяжение ленты, Н; v - скорость ленты, м/с; a - отношение длин среднего и бокового роликов; β - угол наклона боковых роликов, град.

Коэффициенты сопротивлений качению ролика по ленте k_p (вычислитель *B*5) и движению ленты по роликоопорам w_s (вычислитель *B*6)

$$k_p = \frac{q \cdot k_d \cdot l_p}{2S}, \qquad w_s = \left(k_p + k_s\right) \cdot k_d \cdot k_в,$$

где l_p - расстояние между роликоопорами, м; k_s = 0,004…0,005 – коэффициент сопротивления вращению роликов.

Коэффициенты мощности, затрачиваемой на транспортирование груза A (вычислитель *B*7) и идущей на преодоление механических сопротивлений в узлах конвейера B (вычислитель *B*8)

$$A = \frac{L \cdot g}{3600з} \cdot \left(k \cdot w_s \cdot \cos б + \sin б\right), \qquad B = \frac{L}{1000з} \cdot k \cdot w_s \cdot \left(q_{pg} + q_{px} + 2q_l\right) \cdot \cos б,$$

где L - длина конвейера, м; η - к.п.д. привода конвейера, о.е.; k = 1,1 - коэффициент, учитывающий местные сопротивления; q_{pg}, q_{px} - погонные нагрузки соответственно от вращающихся роликов груженой и холостой ветвей конвейера, Н/м.

Мощность при нерегулируемом электроприводе P_c (вычислитель *B*9) и при регулировании скорости конвейера P_v (вычислитель *B*10), а также механическая на валу двигателя P_w

$$P_c = A \cdot Q + B \cdot v_{nom}, \qquad P_v = A \cdot Q + B \cdot v_{\min}, \qquad P_w = M \cdot \omega,$$

где v_{nom} - номинальная скорость ленты конвейера, м/с.

В качестве объекта исследования рассмотрена конвейерная установка мощностью P = 152 кВт, производительностью Q = 300 т/ч, длиной L = 1000 м, шириной ленты B_0 = 1400 мм и скоростью ленты v = 1 м/с с приводным асинхронным двигателем мощностью P = 160 кВт, напряжением U = 380 В и скоростью n = 1000 об/мин.

Алгоритм функционирования модели учитывает следующий технологический режим работы ленточного конвейера:

$0 \le t \le 10$ с – запуск на холостом ходу до номинальной скорости;

$10 < t \le 15$ с – работа при номинальном грузопотоке;

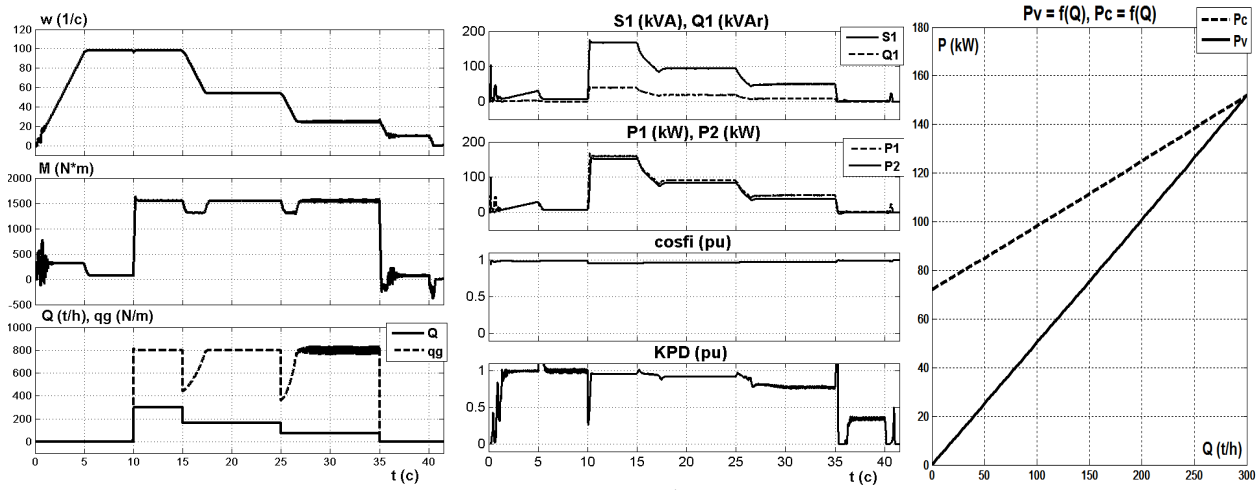
$15 < t \le 25$ с – уменьшение грузопотока в два раза;

$25 < t \le 35$ с – снижение производительности в четыре раза;

$35 < t \le 40$ с – работа порожнего конвейера с последующей его остановкой при $t > 40$ с.

Реализация приведенного алгоритма обеспечивается совместной работой блоков *EQp*, *EQ* і *EMc*. Задание численных значений соответствующих входных координат – грузопотока Q_p, производительности Q и статического момента M_c производится в необходимое время t.

На рис. 2 изображены полученные в результате моделирования диаграммы и фазовые траектории.



а б в

Рис. 2 Графики переходных процессов конвейерной установки:
а – динамика, б – энергетические характеристики, в – потребляемая активная мощность при изменении производительности

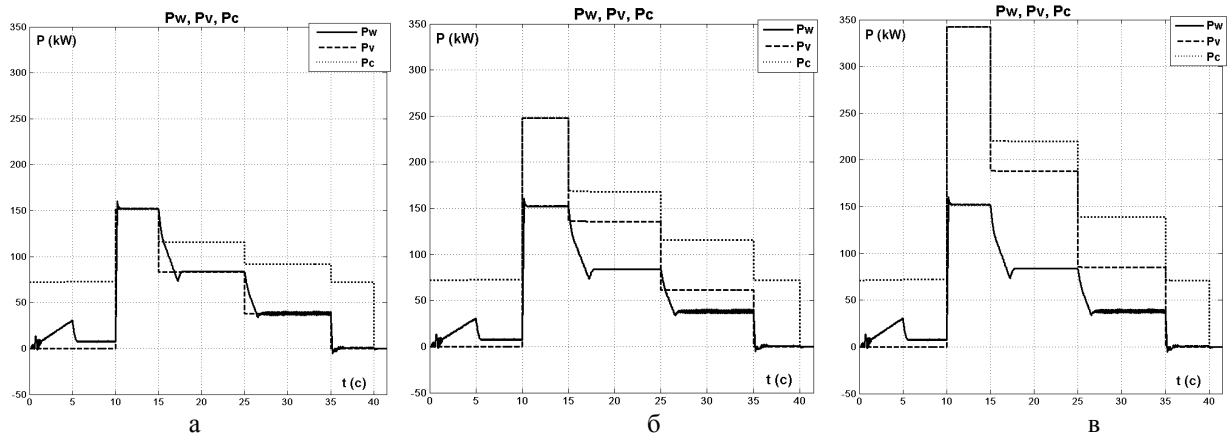
Скоростные и нагрузочные диаграммы (см. рис. 2, а) показывают достаточно высокое качество протекания переходных процессов в динамике и точность отработки заданных значений в статике как относительно угловой скорости, так и электромагнитного момента двигателя.

Нижняя диаграмма на рис. 2, а иллюстрирует возможность реализации идеи поддержания постоянной погонной нагрузки на ленте конвейера за счет регулирования скорости приводного двигателя в зависимости от величины грузопотока. Следует отметить, что обеспечить полную стабилизацию погонной нагрузки не удается, так как при резком изменении количества материала необходимо определенное время для соответствующего изменения скорости конвейера, что наглядно демонстрируют полученные графики.

Энергетические характеристики (см. рис. 2, б) относительно мощностей, высоких значений коэффициента мощности и коэффициента полезного действия показывают эффективность применения частотно-регулируемого электропривода для ленточного конвейера.

Полученные графики потребляемых активных мощностей (см. рис. 2, в) при изменении производительности для вариантов с нерегулируемым и регулируемым электроприводом показывают, что регулирование скорости конвейера в функции грузопотока с учетом изменения коэффициента сопротивления движению ленты позволяет существенно снизить энергопотребление. Так, при уменьшении производительности в 2 раза потребляемая мощность уменьшается на 36%.

Синтезированная модель позволяет провести исследования относительно влияния на энергопотребление угла наклона ленточного конвейера. На рис. 3 представлены графики изменения потребляемых активных мощностей в зависимости от угла наклона трассы конвейера.



а б в

Рис. 2 Графики изменения энергопотребления в зависимости от угла наклона конвейера:
а – $\alpha = 0^{\circ}$, б – $\alpha = 3^{\circ}$, в – $\alpha = 6^{\circ}$

Результаты подтверждают те положения, в которых акцентируется внимание на то, что применение регулируемого электропривода для ленточных конвейеров наиболее эффективно и целесообразно при горизонтальном расположении трассы. Даже при малых углах наклона резко возрастает энергопотребление за счет механической части, так как значительно увеличивается коэффициент сопротивления движению ленты конвейера.

Численные значения потребляемых активных мощностей для различных режимов работы ленточного конвейера в зависимости от угла наклона приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Количественные данные относительно потребляемой активной мощности

Угол наклона конвейера, град.	$\alpha = 0°$			$\alpha = 3°$			$\alpha = 6°$		
Активная мощность, *kW*	P_w	P_v	P_c	P_w	P_v	P_c	P_w	P_v	P_c
Разгон конвейера вхолостую	30	0	72	30	0	72	30	0	72
Работа конвейера на холостом ходу	8	0	72	8	0	72	8	0	72
Грузопоток 100 %	152	152	152	152	250	250	152	342	342
Грузопоток 50 %	85	85	115	85	135	170	85	190	220
Грузопоток 25 %	40	40	92	40	60	110	40	85	140
Замедление конвейера без груза	1	0	72	1	0	72	1	0	72
Остановка конвейера	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Анализ полученных результатов показывает, что для горизонтального конвейера потребляемые мощности приводом и установкой в целом практически равны во всех режимах работы, а уже даже при небольшом угле наклона $\alpha = 3°$ энергопотребление конвейера относительно привода возрастает примерно на 35 - 40% в зависимости от величины грузопотока.

Выводы. Полученные результаты показывают, что имеется возможность построения комбинированной имитационной модели конвейерной установки как единого технологического комплекса в составе электропривода и механической части самого конвейера. Наличие виртуальной составляющей для силового канала электропривода приближает функционирование модели к работе реального конвейера. При этом, имеется возможность получить информацию об энергетических характеристиках ленточного конвейера относительно потребляемых из сети полной, активной и реактивной мощностей, а также получить коэффициенты мощности и полезного действия всей системы и определить механическую мощность на валу двигателя. Исследование возможных технологических режимов работы конвейерной установки подтвердили эффективность и целесообразность применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода, позволяющего обеспечить высокие динамические показатели, а также стабилизировать погонную нагрузку на ленте при снижении энергопотребления в зависимости от грузопотока и текущей производительности. Разработанная модель является универсальной, что позволяет проводить исследования любых режимов работы любых типов ленточных конвейеров в зависимости от требований технологического процесса. Для этого необходимо просто ввести паспортные данные конвейера, электродвигателя и преобразователя.

Список литературы: 1. *Чермалых А. В.* Исследование технологических режимов работы конвейерной установки с частотно-регулируемым электроприводом / *А. В. Чермалых, В. Н. Пермяков, И. Я. Майданский* // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015(3). – С. 68-70. **2.** *Чермалых А. В.* Моделювання технологічних режимів роботи стрічкових конвеєрів / *А. В. Чермалых, В. Н. Пермяков, А. С. Иржавский* // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2015. – С. 116-122. **3.** *Герман-Галкин С. Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / *С. Г. Герман-Галкин*. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с. **4.** *Дьяконов В. П.* MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник / *В. П. Дьяконов, А. А. Пеньков*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с. **5.** *Монастырский В.Ф.* Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях / *В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко, Р. Ф. Кирия* // Геотехническая механика. Межведомственный сборник научных трудов. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 88. – С. 185-191.

Bibliography (transliterated): 1. Chermalyh, A. V., Permjakov, V. N. and Majdanskij, I. Y. *″Issledovanie tekhnologicheskih rezhymov raboty konvejenoj ustanovki s chastotno-reguliruemym elektroprivodom.″* Problemy energoresursozberezhennya v elektrotehnichnykh sistemah. Nauka, osvita i praktika. Naukove vydannja, Kremenchuk: KrNU, Vyp. 1/2015(3): 68–70. Print. **2.** Chermalyh, A. V., Permjakov, V. N. and Irzhavskij, A. S. *″Modeljuvannja tekhnologichnyh rezhymiv roboty strichkovyh konvejeriv.″* Energetika. Ekologija. Ljudyna. Naukovi pratsi NTUU ″KPI″, IEE. Kiev: NTUU ″KPI″, IEE, 2015: 116–122. Print. **3.** German-Galkin, S. G. *″Matlab i Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK.″* St. Petersburg: Korona–Vek, 2008. Print. **4.** Dyakonov, V. P. and Penkov, A. A. *″MATLAB i Simulink v electroenergetike.″* Moscow: Gorjachaja linija – Telecom, 2009. Print. **5.** Monastyrskiy, V. F., Maxjutenko, V. Y. and Kirija, R. F. *″Energoeffektivnost' rabotu lentochnyh konvejerov na gornyh predprijatijah.″* Geotehnicheskaja mehanika. Mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov. Dnepropetrovsk: IGTM NANU, Vyp. 88, 2010: 185–191. Print.

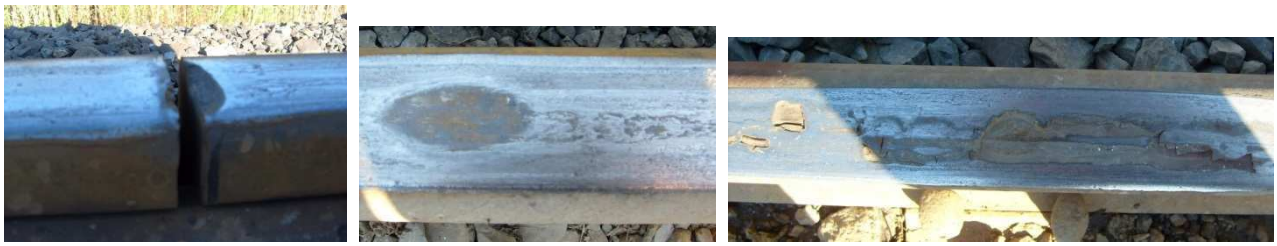
Поступила (received) 28.08.2015

УДК 621.313

А.П. ЧЕРНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Кременчуг
В.Н. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчуг
А.Н. АРТЕМЕНКО, ст. викл., КрНУ, Кременчуг

РЕЖИМЫ РАБОТЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Введение. Проблема повышения эффективности работы карьерных электровозов решается на протяжении десятилетий [1, 2, 3], но до сих пор окончательно не решена. Современные достижения и новейшие разработки ученых в области управления электромеханическими системами (ЭМС), и в частности, электроприводами промышленных электровозов [4, 5], не позволяют получить необходимые результаты, так как состояние рельсовых путей, механического оборудования и тяговых электродвигателей крайне неудовлетворительное. Необходимо учитывать, что перечисленные факторы непосредственно связаны между собой и решить проблему качественного ремонта электродвигателей без улучшения состояния путей и колесных пар невозможно. На рис. 1 показаны фрагменты рельсовых путей карьерных электровозов, обеспечивающих транспортирование горной массы.



а) б) в)

Рис. 1 – Фрагменты состояния рельсового полотна: а) – разрыв, б) – выемка, в) – выщербленность

Такие дефекты отражаются на состоянии поверхностей колесных пар (рис. 2). Снижение диаметра колеса в отдельных случаях составляет 10-12 мм (рис. 2, а), а появляющиеся выщербленности приводят к аналогичному повреждению поверхности рельса (рис. 2, б), и в отдельных случаях даже изменения геометрии головки рельса.

а) б)

Рис. 2 – Фрагменты состояния колесных пар: а) – изменение диаметра колеса, б) – выщербленность

Появление выемок, каверн, выщербленностей приводит к проскальзываниям, дополнительно повреждая рельсовое полотно и колеса в месте контакта. При уменьшении диаметра колеса появляется вращение колесных пар с разной скоростью приводящее к непрерывному проскальзыванию поверхности колеса по поверхности рельса [6]. При проскальзывании происходит неравномерное распределение нагрузки между тяговыми двигателями. Двигатели с большей нагрузкой перегреваются и быстро выходят из строя. Ремонт двигателей осуществляется на специализированных ремонтных предприятиях, обеспечивающих, согласно ГОСТ отклонения в выходных параметрах 10% по якорной обмотке и 2% по обмотке возбуждения [7, 8]. Неравномерность параметров приводит к неравномерной жесткости механических характеристик и к неравномерному распределению нагрузки между двигателями. Поэтому актуальной задачей является исследование режимов работы карьерного электровозного транспорта.

Цель работы. Исследование режимов работы карьерных электровозов с учетом состояния рельсовых путей и разброса параметров тяговых электродвигателей.

Материалы исследования. Основным типом карьерного электровоза на карьере АО «Полтавский горно-обогатительный комбинат» является электровоз ОПЭ-1А (ОПЭ-1АМ), который предназначен для работы на железных дорогах открытых горных разработок, электрифицированных на переменном токе напряжением 10000В, частотой 50Гц, с руководящими подъемами

© А.П. Черный, В.Н. Сидоренко, А.Н. Артеменко, 2015

(уклонами) до 60‰. Экипажная часть тягового агрегата состоит из шести двухосных тележек, по две на каждую секцию. На тележках подвешены по два колесно-моторных блока, состоящих из колесной пары и тягового двигателя. В качестве тяговых двигателей используются двигателя постоянного тока последовательного возбуждения ДТ9Н (НБ-511 для ОПЭ-1АМ), которые имеют в продолжительном режиме номинальную мощность 418 кВт, при номинальном напряжении и токе, соответственно 1500 В и 300 А, максимальная частота вращения 160 $с^{-1}$.

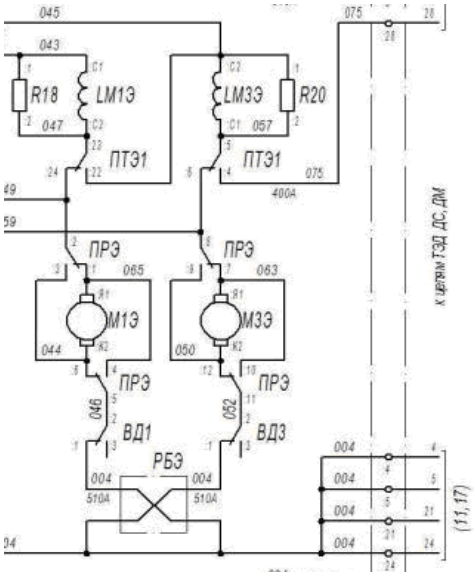


Рис. 3 – Фрагмент принципиальной схемы силовых цепей питания ТЭД электровоза

Электровоз выпускается в трехсекционном варианте и состоит из электровоза управления; дизельной секции; моторного думпкара. Иногда вместо дизельной секции устанавливается второй моторный думпкар. Всего на электровозе установлено 12 тяговых двигателей. В тяговом, автономном и тормозных режимах тяговые двигатели соединены параллельно в каждой тяговой единице (рис. 3).

Допустимые отклонения параметров якорной обмотки при ремонте тяговых двигателей в 10% установлены по условию нагрева [7, 8] и, при наличии принудительной вентиляции двигателей, допускает длительную эксплуатацию. Однако следует учесть, что на электровозе установлены 12 тяговых двигателей, и они не проходят дополнительный подбор по условию работы в системе многодвигательного электропривода, так как это двигатели одного типа. При этом может возникнуть ситуация когда на одном электровозном агрегате окажутся двигатели, отклонения параметров которых находятся в пределах допуска, но по величине противоположны. Рассмотрим вероятность возникновения такой ситуации.

Пусть в ремонтном фонде имеется N двигателей, который характеризуется вектором отклонений некоего параметра от нормы $\Delta = [\Delta_1 \quad \Delta_2 \quad ... \quad \Delta_i \quad ... \quad \Delta_N]^{\mathrm{T}}$. Значение Δ_i, характеризующее i-ый двигатель, может принимать как положительные, так и отрицательные значения и может повторяться m раз ($1 \le m \le N$).

Введем врехнетреугольную матрицу модулей первых конечных попарных разностей ∇, характеризующую попарное отличие двигателей между собой по заданному параметру:

$$\nabla = \begin{pmatrix} 0 & \nabla_{12} & \nabla_{13} & \cdots & \nabla_{1j} & \cdots & \nabla_{1N} \\ 0 & 0 & \nabla_{23} & \cdots & \nabla_{2j} & \cdots & \nabla_{2N} \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_{ij} & \cdots & \nabla_{iN} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_{(N-1)N} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

размерностью $N \times N$ (количество элементов $\frac{\left(N^2 - N\right)}{2}$), элементы которой вычисляются по следующему правилу:

$$\nabla_{ij} = \begin{cases} \left|\Delta_i - \Delta_j\right|, & \forall i < j \\ 0, & \forall i \ge j. \end{cases} \tag{2}$$

Если $\nabla_{ij} \approx 0$ или $\nabla_{ij} = 0$, то это говорит о том, что отличие между i-ым и j-ым двигателем по заданному параметру, соответственно, минимально или отсутствует вообще.

Нас интересует максимальное значение $\nabla_{\max} = \max\left(\nabla_{ij}\right)$. Естественно, что $\nabla_{\max}$ может повторяться $k_{\max}$ раз (теоретически $1 \le k_{\max} \le N-1$).

Оценим вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей для тепловозов попадется пара, соответствующая $\nabla_{\max}$: а) один раз; б) хотя бы один раз.

Исходя из гипергеометрического распределения вероятностей можно записать вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей из N среди отобранных окажется ровно k ($1 \le k \le k_{\max}$), соответствующим $\nabla_{\max}$:

$$p(\nabla_{\max}, k) = \frac{C_{k_{\max}}^{k} \cdot C_{N-k_{\max}}^{12-k}}{C_N^{12}}. \tag{3}$$

Тогда для вероятности извлечения одной такой пары можно записать (одна пара – $k=2$):

$$p(\nabla_{\max},2)=\frac{C_{k_{\max}}^{2}\cdot C_{N-k_{\max}}^{10}}{C_{N}^{12}}.$$

На практике $N=100..400$. Рассмотрим «наихудший» случай, когда ремонтный парк минимален, т.е., $N=100$ и, например, есть шанс отобрать $k_{\max}=12$ (6 пар) двигателей с максимальным отличием по параметру. Тогда

$$p(\nabla_{\max},2)=\frac{C_{12}^{2}\cdot C_{88}^{10}}{C_{100}^{12}}.$$

Учитывая, что $C_n^k=\frac{n!}{k!(n-k)!}$ и n велико, для вычисления факториалов используем формулу Стирлинга:

$$n!\approx\sqrt{2\pi n}\left(\frac{n}{e}\right)^{n}.$$

Тогда

$$p(\nabla_{\max},2)=\frac{C_{12}^{2}\cdot C_{88}^{10}}{C_{100}^{12}}=0{,}284\text{, то есть }28{,}4\%\text{.} \qquad (4)$$

Вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей попадется хотя бы одна пара с максимальным отличием в условиях:

$$p(\nabla_{\max},(k=2)\vee(k=4)\vee(k=6)\vee(k=8)\vee(k=10)\vee(k=12))=\sum_{m=2,4..12}\frac{C_{12}^{m}\cdot C_{88}^{12-m}}{C_{100}^{12}}=0{,}314\text{,} \qquad (5)$$

то есть $31{,}4\%$.

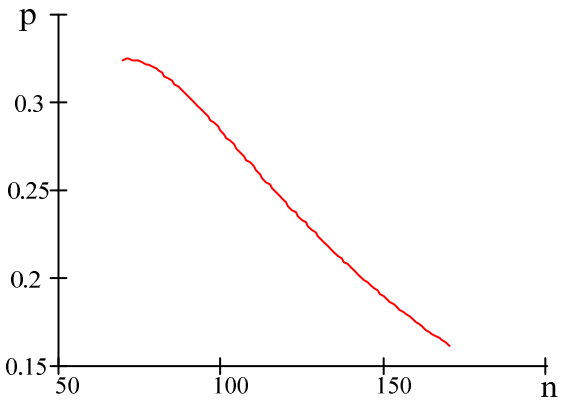


Рис. 4 – Вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей из n двигателей ремонтного парка попадется одна пара с максимальным отличием параметров

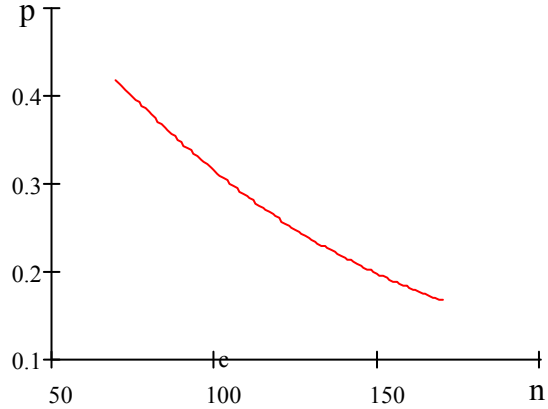


Рис. 5 – Вероятность того, что при отборе 12-ти двигателей из n двигателей ремонтного парка попадется хотя бы одна пара с максимальным отличием параметров

Оценка закона распределения величины Δ_i даст возможность более точной оценки параметра гипергеометрической модели $k_{\max}$ и, соответственно, оценки соответствующих вероятностей.

Получим аналитически распределение моментов двигателей при отклонении параметров. Из уравнения механической характеристики двигателя последовательного возбуждения $\omega=\frac{U_d}{\sqrt{k\alpha M}}-\frac{r}{k\alpha}$, где U_d – напряжение на якоре двигателя, r – активное сопротивление якоря, k, α – конструктивный коэффициент и тангенс угла наклона кривой намагничивания, получим выражение для момента в виде $M=k\alpha U_d^2\left(\omega+\frac{r}{k\alpha}\right)^{-2}$. Тогда

$\frac{M_1}{M_2}=\frac{\Delta_{\alpha1}(r\Delta_{r2}+\Delta_{\alpha2}k\alpha\omega)^2}{\Delta_{\alpha2}(r\Delta_{r1}+\Delta_{\alpha1}k\alpha\omega)^2}$, где $\Delta_{\alpha1}$, Δ_r – относительное отклонение активного сопротивления якоря и параметров кривой намагничивания.

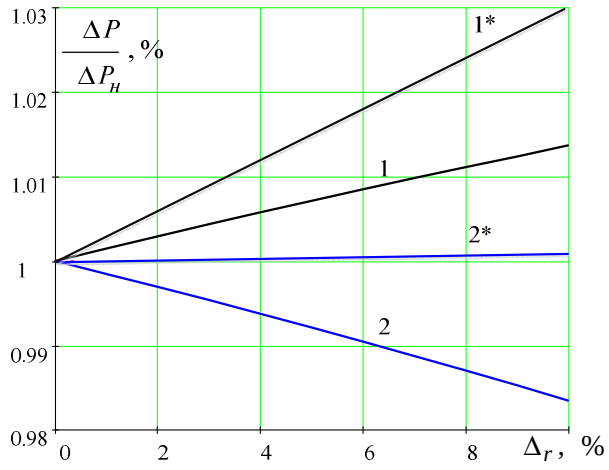


Рис. 6 – Зависимость неравномерность электрических потерь в обмотках якоря тяговых электродвигателей от несимметрии параметров двигателей

Проанализируем режим работы двухдвигательного электропривода тяговых электродвигателей электровоза методом математического моделирования. В качестве неравномерности параметров приняты предельно допустимые по ГОСТ 10%-ные отклонения активных сопротивлений якорных обмоток. Однако, учитывая вероятность (4), (5), примем, что первый двигатель имеет отклонение активного сопротивления +10%, а второй -10%.

Превышение переменных потерь над номинальными, в режиме работы с номинальной нагрузкой, составляет 1,6% (рис. 6, кривые 1,2). Полагая, что условия вентиляции, а значит коэффициент теплоотдачи остаются неизменными, найдем снижение срока службы тягового двигателя с учетом допустимой температуры 130^0C нагрева обмотки якоря с изоляцией класса В [9].

$$z = D2^{\frac{\theta_н - 1{,}013\theta}{8}}, \qquad (5)$$

Откуда продолжительность жизни изоляции $z = 0{,}864D$ лет, где D - срок службы для данного класса изоляции при номинальной температуре, лет. Кратность снижения срока службы составит $\gamma = \frac{1}{z} = 1{,}157$.

Рис. 7 – Реальная форма рельсовых путей на карьере

Как видно из изложенного выше, выполненные расчеты относятся к случаю абсолютной жесткости соединения валов. Между тем, как видно из рис. 1, б-в), имеют место пятна, образованные проскальзыванием колеса по рельсу. Вследствие различия деформаций колеса и рельса в зоне контакта (рис. 1, 2) путь, пройденный геометрическим центром колеса, меньше пути, подсчитанного по угловой скорости вращения колеса в предположении качения без скольжения, следовательно за один оборот колесо проходит расстояние, меньшее развернутой длины окружности катания. В соприкасающихся поверхностях колеса и рельса происходит непрерывное перемещение волокон навстречу друг другу, при этом волокна колеса «проползают» по волокнам рельса. Наблюдается крип или проскальзывание, которое еще называют упругим, псевдоскольжением [10]. При этом мы рассматриваем только продольный крип, хотя как видно из рис. 1-2 может иметь место и спин или поворотный крип. Кроме того необходимо принимать во внимание реальную форму рельсовых путей на карьерах (рис. 7). При входе колес в кривые участки пути и при выходе из них, коэффициент сцепления уменьшается на 5-10%, а в зависимости от состояния поверхности рельсов может изменяться с 0,13 до 0,07 [11].

Проанализируем режим работы двухдвигательного электропривода тяговых электродвигателей электровоза методом математического моделирования. В качестве неравномерности параметров приняты предельно допустимые по ГОСТ 10% отклонения активных сопротивлений якорных обмоток для первого двигателя -10%, а для второго +10%, при снижении коэффициента сцепления с 0,13 до 0,07. Превышение переменных потерь над номинальными, в режиме работы с номинальной нагрузкой, составляет 3% (рис. 6, кривые 1^*, 2^*). С учетом допустимой температуры 130^0C нагрева обмотки якоря с изоляцией класса В (5), продолжительность жизни изоляции составит $z = 0{,}708D$ лет. Кратность снижения срока службы изоляции $\gamma = 1{,}412$ возрастает практически на 25%.

Выводы. Выполненный анализ состояния механического, электромеханического оборудования карьерного электровозного транспорта, а также рельсовых путей показывает, что по причине отклонения параметров тяговых двигателей после ремонта, в многодвигательном электроприводе электровоза, происходит неравномер-

ное распределение нагрузки между двигателями, перегрев более нагруженных двигателей и выходу их из строя. Неравномерное распределение нагрузки приводит к проскальзываниям, в результате чего повреждаются также рельсовые пути и колеса электровоза. Рассчитанная вероятность комплектации электропривода двигателями с наибольшим разбросом параметров достигает 30% при существующем ремонтном парке тяговых двигателей. Для этого случая выполнен расчет механических характеристик двухдвигательного электропривода с учетом проскальзывания вызванного состоянием рельсовых путей. Рост потерь перегруженного двигателя приводит к сокращению срока службы его изоляции на 25%. Учитывая, что возможность управления отдельным тяговым двигателем на электровозах отсутствует, то высокая аварийность будет сохраняться в дальнейшем. Выравнивание нагрузки между двигателями по причине неравномерности параметров, так и снижением коэффициента сцепления вызванное состоянием путей возможно лишь дополнительного управления магнитным потоком двигателей. А синтез SMART-системы управления тяговым электроприводом с функциями самоконтроля и анализа, обеспечит повышение эффективности работы тяговых электродвигателей карьерных электровозов.

Список литературы: **1.** *Айзеншток Л. И.* Выбор тяговых характеристик локомотивов / *Л. И. Айзеншток, Ю. А. Иванов, Е. А. Чернов* // Шахтный карьерный транспорт. –1990. – Вып. 11. – С. 205–208. **2.** *Зиборов К. А.* Принципы построения системы согласования тягового усилия приводных колесных пар шахтного локомотива / *К. А. Зиборов, А. М. Твердохлеб, С. А. Воскобойник* // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2012. – № 88. – С. 115–120. **3.** *Вериго М. Ф.* Взаимодействие пути и подвижного состава / *М. Ф. Вериго, А. Я. Коган*. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с. **4.** *Синчук О. Н.* Структура и способ управления тяговым асинхронным электроприводом рудничного контактно-аккумуляторного электровоза / *О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, С. И. Выпанасенко* // Електротехніка і енергетика. Наукові праці Донецького національного технічного університета. – 2013. – Вип. № 2(15). – С. 223–226. **5.** *Синчук О. Н.* Рудничный гибридный электровоз с асинхронным приводом и автоматизированным управленим / *О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, М. А. [и др.]* // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – 2012. – Вип. 2(18). – С. 95–100. **6.** *Процив В. В.* Алгоритм работы системы регулирования тягового усилия шахтного локомотива / *В. В. Процив, А. М. Твердохлеб*. – Режим доступа : http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/1176. – Дата обращения : 10 июня 2015. **7.** *Котеленец Н. Ф.* Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / *Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов*. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с. **8.** Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / [под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с. **9.** Старение изоляции и срок службы машин. – Режим доступа : http://www.motorremont.ru/books/book004/book220p63.htm. – Дата обращения : 12 июня 2015. **10.** Движение колесной пары с учетом деформации бандажа и рельса. – Режим доступа : http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/eps/dineps/metod/up/webumk/frame/11.htm. – Дата обращения : 14 июня 2015. **11.** Коэффициент сцепления и коэффициент трения. – Режим доступа : http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/teplovoz/avtt_bezdv/umk_do/avtorm/l1_3.htm. – Дата обращения : 15 июня 2015.

Bibliography (transliterated): **1.** Ayzenshtok, L. I., Ivanov, Yu. A. and Chernov, E. A. "Vybor tyagovykh kharakteristik lokomotivov". *Shakhtnyy karernyy transport*. No. 11. 1990. 205–208. Print. **2.** Ziborov, K. A., Tverdokhleb, A. M. and Voskoboynik, S. A. "Printsipy postroeniya sistemy soglasovaniya tyagovogo usiliya privodnykh kolesnykh par shakhtnogo lokomotiva". *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. No. 88. 2012. 115–120. Print. **3.** Verigo, M. F. and Kogan, A. Ja. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava*. Moscow: Transport, 1986. Print. **4.** Sinchuk, O. N., Shokarev, D. A. and Vypanasenko, S. I. "Struktura i sposob upravleniya tyagovym asinkhronnym elektroprivodom rudnichnogo kontaktno-akkumulyatornogo elektrovoza". *Elektrotekhnika i energetyka. Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universyteta*. No. 2. 2013. 223–226. Print. **5.** Sinchuk, O. N., Guzov, E. S., Sinchuk, I. O. et al. "Rudnichnyy gibridnyy elektrovoz s asinkhronnym privodom i avtomatizirovannym upravleniyem". *Elektromekhanichni ta energozberigayuchi systemy. Shchokvartalnyy naukovo-vyrobnychyy zhurnal*. No. 2. 2012. 95–100. Print. **6.** Protsiv, V. V. and Tverdokhleb, A. M. "Algoritm raboty sistemy regulirovaniya tyagovogo usiliya shakhtnogo lokomotiva". Web. 10 June 2015 <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/1176>. **7.** Kotelenets, N. F., Akimova, N. A. and Antonov, M. V. *Ispytaniya, ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin*. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2003. Print. **8.** *Spravochnik po elektricheskim mashinam.* Vol. 1. Moscow: Energoatomizdat, 1988. Print. **9.** *Stareniye izolyatsii i srok sluzhby mashin*. Web. 12 June 2015 <http://www.motorremont.ru/books/book004/book220p63.htm>. **10.** *Dvizheniye kolesnoy pary s uchetom deformatsii bandazha i relsa*.. Web. 14 June 2015 <http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/eps/dineps/metod/up/webumk/frame/11.htm>. **11.** *Koeffitsiyent stsepleniya i koeffitsiyent treniya*. Web. 15 June 2015 <http://edu.dvgups.ru/metdoc/gdtran/nts/teplovoz/avtt_bezdv/umk_do/avtorm/l1_3.htm>.

Поступила (received) 14.07.2015

УДК 255:29.1

О. А. РЕБЕДАК, асп. кафедры каф. ЭСА ДГМА, Краматорск
Н. А. ЗАДОРОЖНИЙ, канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА, Краматорск;
В. П. ВЕРЕШКО, начальник конструкторско-производственного центра «НКМЗ-Автоматика», ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск;
С. А. БАКАН, главный конструктор конструкторско-производственного центра «НКМЗ-Автоматика», ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск;

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КРАНОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ

Введение. Создание новой продукции индивидуального машиностроения ПАО «НКМЗ» требует так же и создания надежных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с высокими показателями качества регулирования на базе современной цифровой техники мировых производителей. Непрерывно растущие требования к быстродействию, точности и надежности выпускаемой продукции стимулируют развитие нестандартных подходов к построению АСУ ТП и оригинальных алгоритмических решений управляющего контроллера. В данной статье рассматриваются особенности синхронизации многодвигательных электроприводов в штатных и аварийных режимах работы кранов металлургических электрических литейных (КМЭЛ) производства ПАО «НКМЗ» на примере КМЭЛ 470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т Алчевского металлургического комбината.

Анализ последних достижений и литературы. Вопросы синхронизации многодвигательных электроприводов достаточно широко освещены как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Наиболее подробную информацию о способах технической реализации подобных систем можно получить из технических руководств преобразователей частоты различных фирм-производителей [1, 2, 3]. Вопросы синхронизации с целью обеспечения различных требований технологических процессов так же рассматриваются в источниках [4, 5].

Во всех выше приведенных источниках авторами описывается классическая схема реализации синхронизации в многодвигательном электроприводе, что подразумевает под собой наличие ведущего электропривода (master) и ряда ведомых им электроприводов (slaves). При синхронизации по скорости задание скорости из АСУ поступает на ведущий электропривод, а его фактическая скорость передается в качестве задания ведомым электроприводам. Аналогичным образом выполняется синхронизация по моменту при необходимости их синхронизации. Данное техническое решение в той или иной вариации способа передачи задания от ведущего к ведомому приводу (аналоговый сигнал, RS-485, шина DRIVE-CLiQ, шина CAN и т.д.) присутствует практически у всех производителей современных частотных преобразователей [1, 2, 3]. Стоит отметить, что наиболее широкое распространение получил унифицированный токовый сигнал 4…20 mA.

Ряд работ посвящен системам синхронизации многодвигательных электроприводов без использования классической схемы «ведущий-ведомый». Например, в работе [6] описывается система подчиненного регулирования синхронизации скоростей двигателей толкателя слябов нагревательной печи. Способом реализации синхронизации является выравнивание токов якорных цепей двигателей при их одинаковой скорости. В работе [7] описан многодвигательный частотно-регулируемый электропривод, включающий n одинаковых по мощности локальных электроприводов, работающих на общую нагрузку. Каждый электропривод имеет импульсный датчик скорости. В многодвигательный электропривод также введен осреднитель скоростей локальных электроприводов. Выход импульсного датчика по скорости всех локальных электроприводов соединен с входом осреднителя скоростей локальных электроприводов, выход которого соединен со вторым входом регулятора скорости вращения многодвигательного электропривода. Данная система синхронизации обеспечивает создание на выходе каждого из n локальных электроприводов одинакового момента при различии в электромагнитных параметрах и механических характеристиках асинхронных электродвигателей. При этом используется один регулятор скорости вращения для регулирования скорости каждого из n электродвигателей локальных электроприводов.

Цель статьи. Целью данной статьи является описание альтернативного способа синхронизации многодвигательных электроприводов на примере четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т Алчевского металлургического комбината. Показаны преимущества альтернативного способа синхронизации и даются рекомендации по его практическому применению на базе оборудования фирмы Siemens.

Постановка проблемы. В настоящее время к металлургическому крановому оборудованию предъявляются очень жесткие требования в области надежности и безотказности. При эксплуатации в условиях кислородно-конвертерного цеха при завалке шихты и заливке чугуна в конвертор кран подвергается воздействиям высоких температур и открытого пламени. Данный фактор может привести к возгоранию крана и вынуждает использовать дополнительные технические решения по защите металлоконструкций и установленного электрооборудования. Рабочее пространство цеха характеризуется высоким содержанием в воздухе токопроводящей пыли и частиц металла, что выдвигает дополнитель-

© Ребедак О.А., Задорожний Н.А., Верешко В.П., Бакан С.А., 2015

ные требования по защите электрооборудования крана от воздействия окружающей среды.

Для непрерывной технологической цепочки конверторного производства характерной является высокая интенсивность эксплуатации оборудования в трехсменном режиме [8].

Суммарная мощность установленных на кране КМЭЛ 470+100+20т электродвигателей превышает 2 МВт, из которых 1.28 МВт приходится на четырехдвигательный механизм главного подъема. Схематично компоновка оборудования АСУ ТП на базе приводов шкафного исполнения Sinamics S120, относящегося к механизму главного подъема, показана на рис. 1.

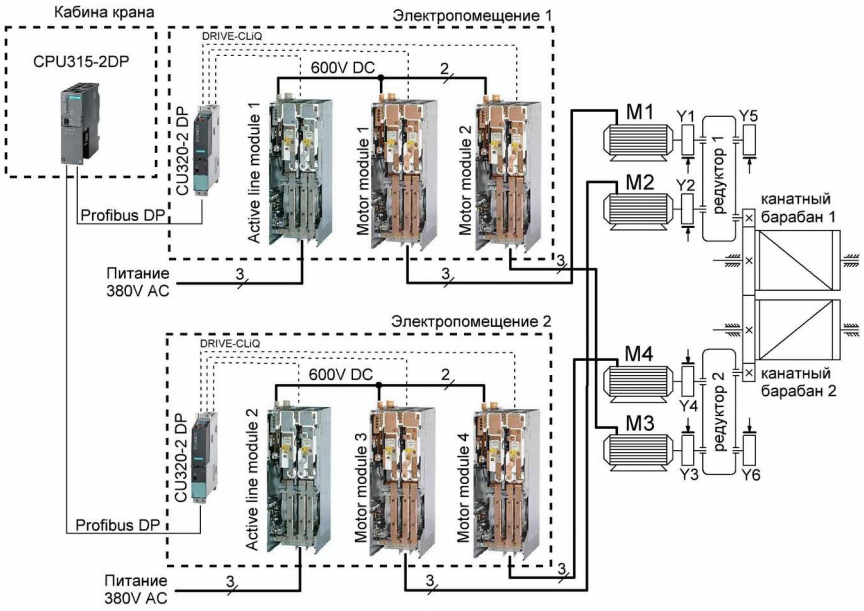


Рис. 1. Схематичная компоновка оборудования АСУ ТП четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т

При таких значениях мощностей электроприводов очень большое влияние на качество работы оборудования и уровень динамических нагрузок оказывает синхронизация в многодвигательных приводах. При отсутствии синхронизации корректная работа механизмов крана, имеющих многодвигательный привод, затруднена, а зачастую вообще невозможна. Без синхронизации разность моментов отдельных электродвигателей упруго деформирует металлоконструкции крана, обеспечивающие механическую связь между точками крепления двигателей. При этом, потребляемая из питающей сети электрическая энергия, пропорциональная разнице моментов отдельных электродвигателей, не совершает никакой полезной работы и полностью расходуется на упругую деформацию металлоконструкций крана. Это приводит к ухудшению характеристик энергопотребления оборудования, увеличению токовой нагрузки на питающую сеть, активные выпрямители, моторные модули и электродвигатели, более интенсивному износу металлоконструкций крана.

Материалы и результаты исследований. При всех преимуществах классической схемы синхронизации «ведущий-ведомый» (простота реализации, поддержка большинством производителей оборудования), она не лишена определенных недостатков, к которым можно отнести:

- аварийно опасный режим работы механизма с активным характером нагрузки в случае разрушения механической связи между валом ведущего электродвигателя и входным валом редуктора (износ муфт сцепления);
- чувствительность системы к выходу из строя ведущего электропривода, что в случае требования продолжения работы приводит к необходимости изменения конфигурации системы управления с назначением нового ведущего электропривода;
- если в процессе синхронизированной работы запас ведомого электропривода по напряжению или току окажется недостаточным для ускорения с целью синхронизации с ведущим электроприводом, то рассинхронизация может длиться сколь угодно долго;
- активное регулирование скорости или момента для синхронизации осуществляет только ведомый электропривод, что увеличивает время синхронизации относительно одновременного регулирования скорости сразу двумя приводами.

Для устранения вышеописанных недостатков классической системы синхронизации, улучшения качества переходных процессов и снижения динамических нагрузок на кранах КМЭЛ470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т была использована альтернативная система выравнивания моментов отдельных приводов многодвигательного электропривода. Функциональная схема данной системы приведена на рис. 2.

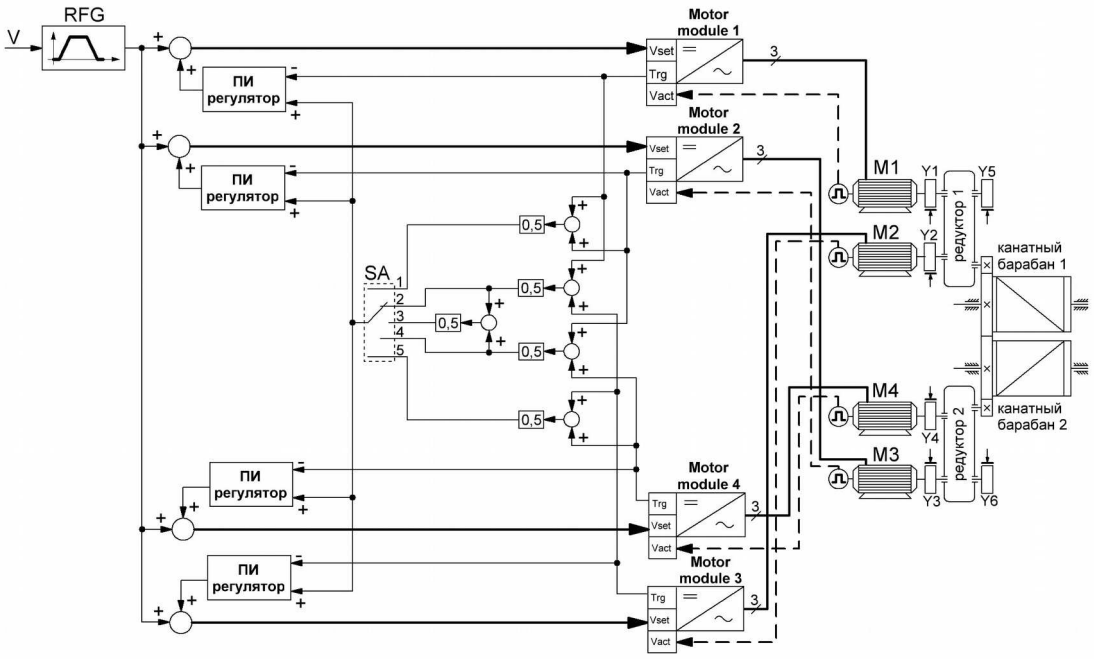


Рис. 2. Функциональная схема альтернативной системы выравнивания моментов четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т

Решение задачи выравнивания моментов четырехдвигательного механизма главного подъема достигается следующим образом: на вход генератора рампы RFG поступает задание скорости V от оператора крана. Выходное значение генератора рампы передается на сумматоры. Выход каждого из сумматоров является основным заданием на внутренний контур скорости соответствующего моторного модуля. На второй вход сумматора подключается ПИ-регулятор, который уже содержит в себе настраиваемые границы зоны насыщения выходного сигнала. На вход всех ПИ-регуляторов скорости через программный селектор SA поступает усредненное значение моментов всех работающих в данный момент электродвигателей. Селектор SA осуществляет выбор задания ПИ-регулятора в зависимости от режима работы механизма главного подъема. В качестве обратной отрицательной связи ПИ-регуляторов выступают текущие значения моментов электродвигателей, получаемые из электроприводов. Таким образом, каждый ПИ-регулятор в пределах разрешенных границ осуществляет корректировку задания скорости соответствующего ему электропривода на величину рассогласования между текущим средним моментом всех работающих электродвигателей и текущим моментом каждого конкретного электродвигателя.

Для повышения живучести крана КМЭЛ 470+100+20т механизм главного подъема имеет пять режимов работы (соответственно программный селектор SA на рис. 2 имеет 5 положений): один основной и четыре аварийных. В основном режиме в процессе подъема и опускания груза принимают участие все четыре электропривода (положение 3 программного селектора SA на рис. 2). К аварийным режимам главного подъема работы относятся

- невозможность работы одного или двух электродвигателей по электрическим или механическим причинам, питающихся от первого электропомещения, работа на двигателях М2, М4 (положение 5 программного селектора SA на рис. 2);

- невозможность работы одного или двух электродвигателей по электрическим или механическим причинам, питающихся от второго электропомещения, работа на двигателях М1, М3 (положение 1 программного селектора SA на рис. 2);

- невозможность работы двух электродвигателей главного подъема по электрическим или механическим причинам, относящихся к первому редуктору, работа на двигателях М3, М4 (положение 4 программного селектора SA на рис. 2);

- невозможность работы двух электродвигателей главного подъема по электрическим или механическим причинам, относящихся ко второму редуктору, работа на двигателях М1, М2 (положение 2 программного селектора SA на рис. 2).

Описанная выше альтернативная система выравнивания моментов четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т имеет следующие преимущества:

- в случае разрушения механической связи между валом одного из электродвигателей и входным валом редуктора максимальный развиваемый момент каждого электродвигателя остаётся неизменным;

- активное регулирование скорости для синхронизации моментов осуществляется одновременно всеми работающими приводами;

- если в процессе синхронизированной работы запас какого-либо электропривода по напряжению или току

окажется недостаточным для ускорения с целью синхронизации моментов, то рассинхронизация моментов будет устранена путем снижения скорости электроприводов, имеющих момент, превышающий среднее значение.

Реализация описанной выше альтернативной системы синхронизации на КМЭЛ470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т имеет ряд технических особенностей. Для повышения частоты дискретизации и, как следствие, улучшения качества переходных процессов данная система реализована в модулях управления CU320-2 DP первого и второго электропомещений на базе Drive Control Chart (DCC) в графической среде программирования Control For Continuous (CFC) с помощью стандартной библиотеки блоков для Sinamics V4.4. Модуль управления CU320-2 DP обеспечивает выполнение программы синхронизации моментов за 1 ms, чего невозможно добиться при реализации алгоритма в управляющем контроллере CPU315-2DP.

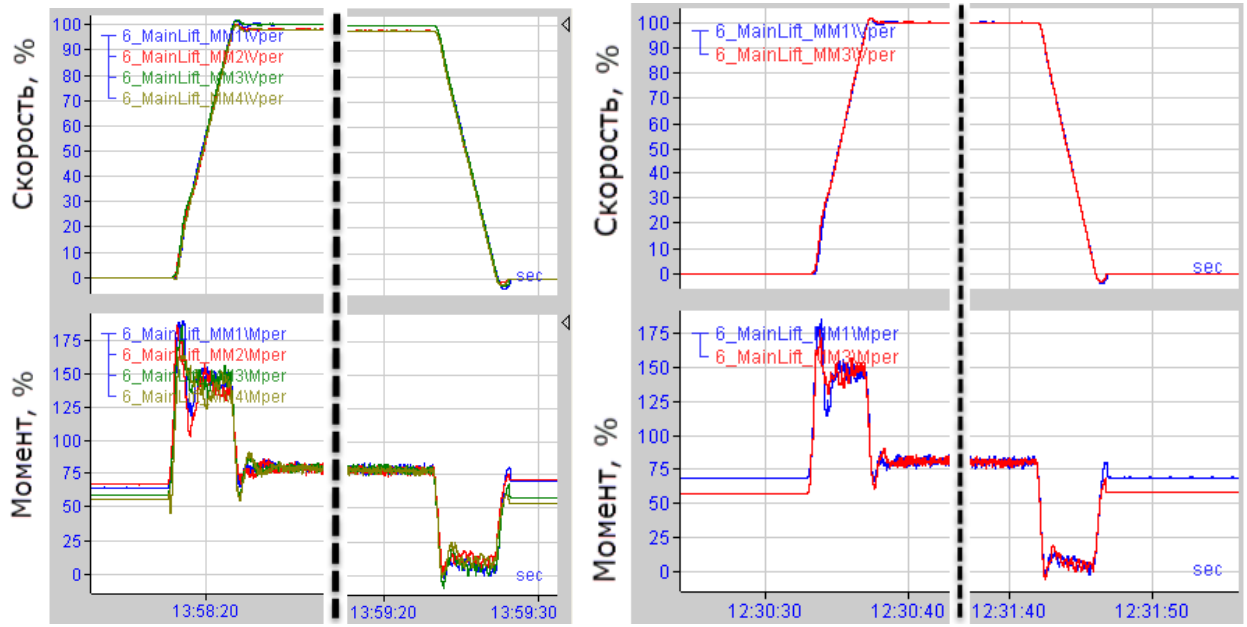
Таким образом, в каждом модуле управления CU320-2 DP содержатся генератор рампы RFG, два сумматора, два ПИ-регулятора, программный селектор SA и полная логика вычисления среднего момента всех работающих в настоящий момент электроприводов. В модуль управления CU320-2 DP, расположенный в первом электропомещении, информация о приводах (слова состояния, моменты) второго электропомещения передается через управляющий контроллер CPU315-2DP по сети Profibus DP в изохронном режиме через равные промежутки времени 5.228 мсек. Аналогичным образом информация о приводах первого электропомещения передается в модуль управления CU320-2 DP, расположенный во втором электропомещении. То есть в данной системе синхронизации моментов управляющий контроллер выполняет считывание информации приводов главного подъема одного электропомещения и обеспечивает ее передачу в другое электропомещение. При этом никаких алгоритмов, относящихся к синхронизации моментов, в контроллере не выполняется, что позволило упростить управляющую программу и уменьшить время цикла ее выполнения.

Для эффективной реализации альтернативной системы синхронизации рекомендуется снижать число абонентов сети Profibus DP имеющих статус «мастер» до минимально возможного с целью минимизации времени цикла изохронного режима работы контроллера. В настоящий момент на кране КМЭЛ 470+100+20т в сети Profibus DP имеется пять абонентов-мастеров: управляющий контроллер, три панели визуализации и программатор. Если выполнить связь между контроллером и панелями визуализации по сети Ethernet, то возможно снижение интервалов времени обмена данными через контроллер между приводами первого и второго электропомещений с 5.228 мсек до 3.673 мсек, что позволит улучшить показатели качества переходных процессов.

Последовательность настройки электроприводов главного подъема для обеспечения оптимальных динамических процессов так же имеет свои особенности. Предварительная настройка контуров тока и скорости электроприводов главного подъема в ходе проведения пусконаладочных работ была выполнена в режиме автоматической идентификации электроприводом статических и динамических параметров электродвигателей. После этого был создан самый тяжелый динамический режим для электроприводов главного подъема: электромеханическая система имела минимальную жесткость механической связи при минимальном соотношении инерционных масс механизма. То есть пустая траверса была опущена на максимально возможную высоту. В качестве источника обратной связи по скорости для всех приводов устанавливался импульсный датчик скорости на валу соответствующего двигателя. Система синхронизации моментов отключалась, и на привода подавалось ступенчатое задание в 10% от номинальной скорости. По полученным с помощью IbaPDA осциллограммам производилась оценка динамических характеристик каждого электропривода и их отличие между собой. Затем производилась настройка коэффициентов регуляторов контуров скоростей и контуров токов электроприводов с целью получения идентичных переходных процессов во всех электроприводах главного подъема. По завершении настройки коэффициентов регуляторов всех электроприводов для электропривода первого двигателя в качестве источника обратной связи по скорости устанавливалась внутренняя математическая модель двигателя. То есть привод переводился в бездатчиковый режим работы. При этом характер его переходных процессов начинал значительно отличаться от настроенных ранее трех остальных электроприводов. После этого производилась настройка коэффициентов регулятора скорости первого электропривода для бездатчикового режима работы с целью получения идентичных переходных процессов во всех электроприводах главного подъема. По завершении настройки коэффициентов регулятора скорости первого электропривода, производился перевод второго электропривода на бездатчиковый режим работы и производилась настройка его коэффициентов регулятора скорости. Затем аналогичные действия выполнялись для третьего и четвертого электроприводов.

Описанный выше алгоритм настройки позволяет получить идентичное поведение электроприводов в динамике вне зависимости от того, работают они с датчиком обратной связи или же обратная связь по скорости осуществляется от внутренней математической модели электродвигателя в приводе. При этом параметр p491 в каждом из электроприводов главного подъема устанавливается в 1, что обеспечивает автоматический переход привода в бездатчиковый режим работы в случае обнаружения неисправностей импульсного датчика скорости или обрыва сигнальных линий. Переход на бездатчиковый режим работы осуществляется без остановки электропривода и сопровождается выдачей предупредительного сообщения на панелях визуализации в кабине оператора и каждом электропомещении.

Наблюдение за переходными процессами четырехдвигательного механизма главного подъема осуществлялось с помощью программного продукта IbaPDA. На рис. 3 приведены осциллограммы скорости и моментов при работе в штатном (а) и аварийном (б) – работа на двигателях М1, М3 – режимах.



а б

Рис. 3. Осциллограммы скорости и моментов четырехдвигательного механизма главного подъема при работе в штатном (а) и аварийном (б) режимах

Как можно видеть из осциллограмм данный алгоритм синхронизации обеспечивает статическое рассогласование моментов не более 1% от номинального момента двигателя, что для условий практического применения является приемлемым результатом. Значительная зашумленность осциллограмм моментов объясняется тем, что производилась запись неотфильтрованного значения переменных.

Выводы. В статье рассмотрена система выравнивания моментов многодвигательных приводов кранов КМЭЛ 470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т Алчевского металлургического комбината на примере четырехдвигательного механизма главного подъема. Использование данной системы является альтернативой классическим системам «ведущий-ведомый». Показаны недостатки классических систем «ведущий-ведомый», а так же даны рекомендации для практического применения описанной альтернативной системы синхронизации. За счет технических особенностей реализации (программа синхронизации моментов выполняется в приводах) снижены нагрузка и время цикла управляющего контроллера.

Список литературы: 1. Sinamics S120. Drive Function. Functional manual 01/2015. **2.** Sinamics drives. Sinamics DCM DC Converter. Operating Instructions 06/2013. **3.** Load Sharing with the Altivar ATV71. Application Guide. **4.** *Перельмутер В. М.* Тиристорные электроприводы прокатных станов / *В. М. Перельмутер, Ю. Н. Брауде, Д. Я. Перчик, В. М. Книгин.* – М. : Металлургия, 1978. – 152 с. **5.** *Макурин А. В.* Практическая реализация системы синхронного вращения приводов перемещения мостового крана / *А. В. Макурин* // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 217-218. **6.** *Сайфутдинов, А. В.* Снижение динамических нагрузок системы электропривода толкателя слябов нагревательной печи : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.09.03 / Сайфутдинов Антон Валерьевич. – Липецк, 2005. – 20 с. **7.** Пат. 2326488 Российская Федерация, МПК H 02 P 5/48, H 02 P 21/00. Многодвигательный частотно-регулируемый электропривод / Сидоров П. Г. Александров Е. В., Лагун В. В.; заявитель и патентообладатель Сидоров П. Г. Александров Е. В. – № 2006137608/09; заявл. 24.10.06; опубл. 10.06.08, Бюл. № 16. **8.** *Рапутов М. Б.* Электрооборудование металлургических кранов / *М. Б. Рапутов.* – М. : Металлургия, 1977. – 248 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sinamics S120. Drive Function. Functional manual 01/2015. **2.** Sinamics drives. Sinamics DCM DC Converter. Operating Instructions 06/2013. **3.** Load Sharing with the Altivar ATV71.Application Guide. **4.** Perelmuter, V. M., Braunde, U. N., et al. *Tyristornie elektroprivoda prokatniyh stanov.* Moscow: Metallurgiya, 1978. Print. **5.** Makurin, A. V. "Practicheskaya realizatsiya sistemy sinchronnogo vrasheniya privodov peremesheniya mostovogo krana." *Vestnik Nats. tehn. un-ta "HPI": sb. naush. tr. Temat. vip.: Problemy avtomatizirovannogo electroprivoda.* No. 36.1009. 2013. 217-218. Print. **6.** Saifutdinov, A. V. *Snichenye dinamicheskih naruzok systemy electroprivoda tolkatelya slyabov narevatelnoy pechi.* abstract PhD dissertation, Lipetsk, 2005. (in Russian) **7.** Sidorov P. G., Aleksandrov E. V., Lagun V. V. Mnogodvigatilniy chastotno-reguliruemiy electroprivod. Patent RF, no. 2326488, 2006. **8.** Raputov, M. B. *Elektrooborudovanie metallurgicheskih cranov.* Moscow: Metallurgiya, 1977. Print.

Поступила (received)

УДК 621.331

В. Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн., наук. проф. НТУ «ХПИ»;
А. С. ГОНЧАР, преп. стаж. НТУ «ХПИ»;
А. В. СЕМИКОВ, асп. НТУ «ХПИ»;
А. Н. МОИСЕЕВ, канд. техн. наук., ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ»;
П. М. КАСТОРНЫЙ, маст. НТУ «ХПИ»;
А. В. ТИМОЩЕНКО, ст. преп. НТУ «ХПИ»;
Д. А. ПШЕНИЧНИКОВ, канд. техн. наук., доц. НТУ «ХПИ»;
В. В. КОВТУН, зав. лаб. НТУ «ХПИ»;
Е. Ф. БАНЕВ, канд. техн. наук., мл. научн. сотр. НТУ «ХПИ»;
А. В. ХОРЕВА, мл. научн. сотр. НТУ «ХПИ»

ИЗ ОПЫТА СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

По мнению мировых экспертов в перспективе альтернативы электромобилю нет [1]. Причинами этого является ограниченность нефтяных и газовых ресурсов, ухудшение экологического состояния в больших городах из-за выхлопных газов автомобилей, ряда технических преимуществ электропривода (ЭП) по сравнению с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Для Украины, импортирующей в докризисный период 75% газовых и 80% нефтяных энергоресурсов и затрачивающей на их закупку огромные валютные средства, переход от автомобилей к электромобилям (ЭМБ) особенно актуален.

Практически все ведущие зарубежные фирмы разрабатывают, изготавливают, а многие из них уже и серийно выпускают электромобили. Сведения, поступающие из средств массовой информации, говорят о непрерывном улучшении технико-экономических показателей ЭМБ по дальности проезда без подзарядки аккумуляторов, приемистости, максимальной скорости, эксплуатационным затратам [2–7].

Анализ рынка труда в промышленном производстве Украины и вышеуказанные факты привели нас к выводу о целесообразности использования в электромобилестроении богатого опыта специалистов электроприводчиков, накопленного при создании промышленных микропроцессорно-управляемых электромеханических систем, в том числе и электроприводов транспортных средств: электрокаров, рудничных электровозов, механизмов передвижения кранов и др. В этом нас также убедило участие кафедры в европейском проекте «TEMPUS-MPAM». Наши зарубежные коллеги из Франции, Германии, Чехословакии по заказам фирм активно участвуют в разработках различных мехатронных систем автомобилей.

В результате в 2011 году на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» была открыта новая специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и определены концептуальные положения её развития. Таковыми стали:

- сохранение традиционной основательной подготовки по теоретическим основам электротехники, механике, полупроводниковой преобразовательной технике, теории автоматического управления, теории систем управления электроприводом, электрическим машинам, микропроцессорной технике и программированию;

- обеспечение в учебном процессе приобретения практических навыков диагностики, программирования, наладки и обслуживания систем управления электропривода электромобилей. С этой целью считать необходимым самостоятельно разработать и создать систему управления тяговым электроприводом автомобиля взамен двигателя внутреннего сгорания.

Совершенно очевидно, что технические и финансовые возможности кафедры не сопоставимы с возможностями автомобильных фирм как, например, «Тоёта», «Мерседес», «Нисан», «Тесла» и другие, поэтому о конкуренции не могло быть и речи. Главной целью нашей разработки было создание образца для учебных и научных целей и приобретение при этом практического опыта для исключения начётничества при обучении студентов. В то же время предусматривалась возможность использования полученного опыта в случае массового желания автовладельцев Украины преобразовать автомобиль в электромобиль. Предпосылки для такого желания есть. Купить новый зарубежный электромобиль стоимостью более 25…35 тыс. долл. украинский автовладелец среднего достатка не в состоянии. Однако, учитывая всевозрастающую стоимость бензина, большие текущие расходы по эксплуатации (замена моторного масла, масляного и воздушного фильтров, свечей, поршневых колец, тормозных колодок и др.), а также расходы на ремонт, замена ДВС на электропривод в случае экономической целесообразности такой модернизации для многих может стать привлекательной.

С учётом вышеуказанного были определены следующие принципы разработки и создания электропривода ЭМБ:

© В.Б. Клепиков, А.С. Гончар, А.В. Семиков, А.Н. Моисеев, П.М. Касторный, А.В. Тимощенко, Д.А. Пшеничников, В.В. Ковтун, Е.Ф. Банев, А.В. Хорева, 2015

1. Схемотехнические решения в методическом отношении должны облегчать студентам уяснение физической сущности электромагнитных и электромеханических процессов в различных режимах движения ЭМБ;

2. Конструктивные и технические решения должны соответствовать технологии модернизации автомобилей путём замены ДВС на разрабатываемый ЭП;

3. Электропривод должен обеспечить повышение энергоэффективности за счёт рекуперации энергии в тормозных режимах с последующим её использованием;

4. В максимальной мере предусматривать использование комплектующих компонентов и материалов отечественного производителя.

С учётом вышеизложенного электромобиль создавали на базе широко распространённого серийно выпускаемого в Украине автомобиля «Ланос».

Цель статьи – обобщить опыт кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» по созданию на базе автомобиля «Ланос» первого в Украине электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии.

В качестве электродвигателя была выбрана машина постоянного тока с постоянными магнитами, что позволяет использовать полупроводниковый широтно-импульсный преобразователь (ШИП) с наиболее простой структурой и упрощает процесс работы ЭП и преобразования энергии в различных режимах движения ЭМБ. Такое решение также способствует минимизации материальных затрат и времени на создание первого образца. Особенностью создаваемого электропривода по сравнению с известными разработками в Украине является реализация в тормозных режимах (при снижении скорости, остановках, движении на спусках) возврата энергии движения накопителю, в качестве которого применена суперконденсаторная батарея. Современные суперконденсаторы по сравнению с аккумуляторами имеют ряд важных достоинств:

- ресурс более 10 лет и более 300000…1000000 циклов «заряд-разряд»;
- высокая удельная мощность до 4…10кВт/кг при КПД 95%;
- меньшая, по сравнению с аккумуляторами, зависимость характеристик от температуры.
- ток заряда суперконденсатора может достигать сотен ампер, а в тормозных режимах ЭМБ имеют место подобные значения токов. В то же время известно, что ток заряда свинцово-кислотного аккумулятора не может превышать нескольких десятков ампер.

Ёмкость одного суперконденсаторного элемента (ионистора) при напряжении около 2,5 В в сотни тысяч раз превосходит электрическую ёмкость Земли, но даже при их последовательном соединении до напряжения, требуемого электродвигателю в созданном образце сохраняется достаточно большой, чтобы принять энергию при протяжённости спуска в 1 км с уклоном в 3 градуса.

Применение суперконденсаторной батареи позволило реализовать рекуперативные режимы, использовав для источника электропитания ЭП ЭМБ свинцово-кислотные аккумуляторы отечественного производства.

Как показывают расчёты, использование рекуперации энергии при торможении электромобиля позволяет сэкономить в различных режимах городского цикла 12…21% энергоресурса аккумуляторной батареи [9].

В свете вышеизложенных соображений и принципов был разработан и запатентован электропривод ЭМБ, принцип действия которого может быть уяснён из принципиальной схемы, представленной на рисунке 1. [8]

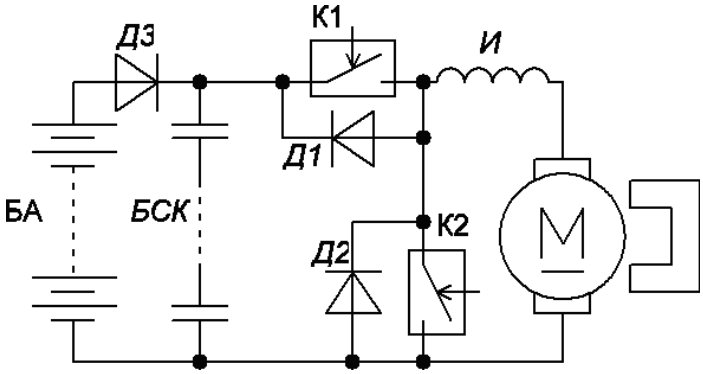


Рисунок 1 – Структурная схема ЭП

В данной схеме БА – аккумуляторная батарея, выполняющая роль источника электроэнергии. В двигательном режиме периодическое замыкание-размыкание ключа К1 по принципу ШИМ (широтно-импульсной модуляции) производит регулирование величины среднего напряжения, прикладываемого к электродвигателю М. При разомкнутом К1 ток двигателя, благодаря индуктивности якорной цепи И, поддерживается через диод Д2.

Переход к тормозному режиму осуществляется переводом ключа К1 в разомкнутое состояние, а ключа К2 в режим периодической коммутации. При этом на первом этапе под действием встречно направленной ЭДС электродвигателя ток якоря изменяет направление на противоположное, создавая тормозной момент. При замкнутом положении К2, ток стремиться нарастать и в это время часть кинетической энергии движения ЭМБ

преобразовывается в электромагнитную и накапливается в индуктивности якорной цепи. Размыкание К2 приводит к протеканию тормозного тока через диод Д1 и супер-конденсаторную батарею БСК, заряжая её электрической энергией. При этом диод Д3 предотвращает протекание зарядного тока, достигающего 300 А, через батарею БА. Процесс заряда сопровождается уменьшением электромагнитной энергии в индуктивности, однако последующее замыкание К2, вновь приводит к нарастанию тока якоря. Таким образом значение тормозного тока периодически изменяется относительно некоторого среднего значения, определяющего тормозное усилие электромобиля.

После окончания тормозного режима и перехода к двигательному электрическая энергия для движения ЭМБ вначале отдаётся суперконденсаторной батареей до тех пор, пока её напряжение сравняется с напряжением аккумуляторной батареи, после чего она вступает в действие.

Значения двигательного и тормозного моментов электропривода задаются микропроцессором, управляющим состоянием ключей К1 и К2, и определяются положением педали акселератора.

В качестве аккумуляторной батареи были использованы 6 последовательно соединённых гелиевых свинцово-кислотных аккумуляторов Харьковского аккумуляторного завода «Владар» типа LS12120G с одночасовой ёмкостью 60 А·ч при номинальном напряжении 72 В. Электродвигатель типа ME1003 имеет номинальные данные: напряжение 72 В, ток 150 А. Батарея суперконденсаторов состоит из 48 последовательных элементов SCSCA1C120 и обеспечивает ёмкость 25 Ф при максимальном напряжении 125 В. Ключ К1 выполнен в виде 6 параллельно соединённых полевых транзисторов с изолированным затвором, и каждый из них шунтирован диодом Шоттки 80CTQ150. На аналогичных транзисторах и диодах в виде 6 параллельных ветвей выполнена и цепочка К2 Д2. В качестве блокирующего заряд БА диода Д3 выбран вентиль типа В-200.

Дискретная система управления с быстродействующим контуром регулирования тока построена на базе микроконтроллера Cortex-M4 с написанной для него программой на языке «Си». Обратные связи по току и задание от педали момента электродвигателя осуществляются с помощью АЦП микроконтроллера.

Проверка схемотехнических решений выполнялась на лабораторном стенде и подтвердила требуемое функционирование предложенной схемы. Масса автомобиля имитировалась маховиком, напрямую соединённым с валом электродвигателя.

При компоновке электрооборудования в автомобиле использовался метод 3D моделирования. В моторном блоке размещён широтно-импульсный преобразователь, суперконденсаторная батарея, микропроцессорная плата управления, силовая коммутирующая аппаратура, источники низковольтного питания. Сигнал задания на движение и торможение задаётся педалью акселератора. Тормозная педаль используется в случаях экстренного торможения. Батарея аккумуляторов установлена в багажном отделении. Вольтметр напряжения суперконденсаторной батареи, установленный на передней панели, показывает режим работы СКБ: нарастание напряжения в период рекуперации, снижение – при движении за счёт энергии СКБ. Сцепление было устранено и электродвигатель напрямую соединён с валом коробки передач. Коробка передач сохранена, так как она включает неотделимый от неё дифференциал и её замена на более простую с меньшим числом передач потребовала бы проведения больших монтажных работ. При этом полный отказ от коробки передач невозможен, так как двигатель использует постоянные магниты и, следовательно, не имеет второй зоны регулирования, обеспечивающей постоянство мощности в широком диапазоне скоростей.

Испытания электромобиля подтвердили требуемое функционирование системы управления электропривода, мягкое бесшумное трогание, надёжное торможение с рекуперацией энергии в СКБ. Они также показали, что вследствие больших усилий, передаваемых при торможении от статора ЭД корпусу коробки передач, следует обеспечить бóльшую жесткость кронштейна, фиксирующего электродвигатель в пространстве, причём крепление должно выдерживать моменты противоположного направления при торможении, которые отсутствуют при использовании ДВС. Большой вес аккумуляторной батареи (270 кг) требует повышения жесткости задних пружин.

Создание электромобиля в условиях нынешнего существования ВУЗов оказалось очень непростой задачей. И эта задача была бы неразрешима, если бы не искренняя помощь и поддержка небезразличных к нашей работе многих людей и организаций. Авторы считают своими долгом выразить особую благодарность А.И. Терещенко, директору харьковского филиала «Приватбанка», представившего автомобиль «Ланос», на базе которого создавался электромобиль, Ю.В. Радионову, директору Харьковского аккумуляторного завода «Владар», передавшего 6 гелевых аккумуляторов для источника питания, фирме «Юнаско-Украина», предоставившей несколько элементов суперконденсаторов на стадии лабораторных исследований, В.Б. Павлову, главному научному сотруднику института электродинамики НАН Украины, за полезные советы, основанные на опыте создания электромобилей в данном институте, Л.Л. Товажнянскому, Почётному ректору НТУ «ХПИ», помогавшему в решении многих организационно-технических вопросов.

В заключение позволим высказать некоторые соображения о возможном социальном значении модернизации автомобилей. Массовая модернизация, находящихся в эксплуатации автомобилей путём замены двигателя внутреннего сгорания на энергоэффективный электропривод потребует создания большого числа предприятий малого и среднего бизнеса по производству такой модернизации. В свою очередь, это дало бы импульс для отечественных предприятий по производству электродвигателей, аккумуляторов, полупроводниковых преоб-

разователей, суперконденсаторов, электрических аппаратов и т.д. Кроме того потребовались бы станции диагностики, обслуживания, ремонта, зарядки батарей. Следствием вышесказанного станет большое увеличение числа рабочих мест.

С государственной точки зрения также существенно бы сократилось закупка нефтепродуктов, на которую затрачиваются большие валютные средства. Улучшилась бы экологическая обстановка больших городов.

И очень существенно то, что основное финансирование модернизации взяли бы на себя владельцы автомобилей, готовые избавиться от бремени непомерно растущих расходов на бензин и текущие расходы по эксплуатации импортных автомобилей.

Выводы:

Предложена схема, разработан и создан электропривод электромобиля с суперконденсаторной батареей, обеспечивающий возврат энергии движения в тормозных режимах.

Применение суперконденсаторного накопителя позволяет использовать в качестве источника электроэнергии ЭМБ свинцово-кислотные аккумуляторы отечественного производства.

Массовая модернизация автомобилей путём замены ДВС на ЭП может дать большой социальный эффект: активацию малого и среднего бизнеса, расширение производства отечественными предприятиями комплектующего оборудования, увеличение числа рабочих мест, улучшение экологической обстановки больших городов и сокращение валютных расходов на импорт нефтепродуктов.

Список литературы: 1. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47. **2.** Сравнение электромобилей BMW i3 и Mercedes-Benz B-class Electric Drive [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.caranddriver.com/comparisons/2014-bmw-i3-vs-2014-mercedes-benz-b-class-electric-drive-comparison-test. **3.** Описание электромобиля Tesla Model S [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.teslamotors.com/models **4.** Описание электромобиля Honda Fit EV [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://automobiles.honda.com/fit-ev/ **5.** Описание электромобиля Ford Focus Electric [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.ford.com/cars/focus/trim/electric/ **6.** Описание электромобиля Nissan Leaf [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/ **7.** Описание электромобиля Toyota IQ EV[Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html **8.** Патент Украины №85585 «Електропривод електромобіля», НТУ «ХПИ» **9.** Семиков А.В., Гончар А.С. Расчет энергоэффективности электропривода электромобиля с применением ионисторов// Зб. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2013. – С. 25–26.

Поступила (received) 25.08.2015

УДК 621.3.072.85

В. Н. ШАМАРДИНА, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
С. М. ЛЕМЕШКО, ст. научн. сотр. ГП завод «Электротяжмаш», г. Харьков;
Г. И. ЯРОВОЙ, зав. отделом ГП завод «Электротяжмаш», г. Харьков

СИСТЕМА ВЫРАВНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЯГИ ПО ОСЯМ ТЕПЛОВОЗА

Введение. Одним из самых массовых локомотивов из ныне производимых на территории стран СНГ является магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ116У и его модификации. Таких локомотивов с 2008 года по настоящее время Луганским тепловозостроительным заводом построено более 400 единиц. Электропередача тепловоза оснащена микропроцессорной системой управления типа МСУ-ТП с поосным регулированием касательной силы тяги [1]. МСУ-ТП контролирует скорость вращения и ускорение каждой колесной пары и при обнаружении превышения их по отношению к минимальной скорости или уставке по ускорению обеспечивает снижение напряжения на соответствующем тяговом электродвигателе (ТЭД). При проскальзывании 2-х и более колесных пар система производит плавное снижение мощности тягового генератора с заданным темпом, реализуя принцип индивидуального и группового воздействия на электропередачу.

На большинстве украинских и зарубежных локомотивов [2,3] обнаружение боксования фиксируется по факту появления избыточной разницы между токами, напряжениями или частотами вращения ТЭД боксующих и небоксующих колесных пар.

Повышение тяговых и противобоксовочных свойств еще более актуально для маневровых тепловозов, что определяется особыми условиями их эксплуатации. При маневровых передвижениях локомотивы работают в специфических режимах: для трогания состава с места и разгона требуются большая сцепная масса и значительные тяговые усилия при ограниченном перемещении; подъездные и станционные пути имеют криволинейный характер, что увеличивает сопротивление движению локомотива и провоцирует срывы в боксование.

Постановка задачи. Известно, что при движении грузового состава вертикальная нагрузка от экипажа на оси колесных пар передается неравномерно, поэтому колесные пары тепловоза находятся в неодинаковых потенциальных сцепных условиях [4]. Так как схема (рис. 1) позволяет индивидуально управлять мощностью, подводимой к каждому ТЭД, предлагается перераспределить электрические нагрузки между двигателями в зависимости от реальных вертикальных нагрузок на оси колесных пар. Подвод мощности к ТЭД в соответствии с нагрузками на оси позволит реализовать равные коэффициенты тяги для всех колесных пар.

Предлагается систему индивидуального воздействия на ТЭД, реализованную на тепловозах 2ТЭ116У, дополнить функцией выравнивания коэффициентов тяги в штатном поездном режиме работы и в нестационарных режимах. Замкнутая система автоматического регулирования (САР) каждого ТЭД является системой стабилизации определенного параметра с двумя каналами: 1) косвенной оценки разности частот вращения ТЭД и формирования жестких характеристик ТЭД при боксовании; 2) выравнивания коэффициентов тяги по осям тепловоза. В статье рассмотрен синтез второго канала для перспективного маневрового тепловоза ТЭМ23 с электропередачей переменно-постоянного тока (технические характеристики в табл. 1).

Материалы и результаты исследования. В режиме тяги питание ТЭД осуществляется от тягового генератора (ТГ) через две выпрямительные установки (рис. 1). Для реализации поосного регулирования силы тяги каждая выпрямительная установка состоит из двух несимметричных управляемых трёхфазных мостов якорных преобразователей с общими по плюсу катодными (КГ) и раздельными анодными группами (АГ). К каждой АГ подключён один ТЭД. При управлении тиристорами АГ осуществляется поосное регулирование. В расчётах характеристик электропередачи использованы каталожные данные тягового электродвигателя ЭД133 при мощности на клеммах $P_{\text{КЛ}} = 333$ кВт. На рис.2 получены расчетные рабочие характеристики электропередачи $U_G, x, F_{\text{Т}} = \varphi(I_{\text{М}})$ при подводимой мощности к ТЭД $P_{\text{КЛ}} = 190$ кВт. Штриховой линией показан длительный режим при токе ТЭД $I_{\text{М}} = 890$ А.

При решении задачи выравнивания коэффициентов тяги по осям система поосного регулирования обеспечивает искусственную неравномерность токораспределения ТЭД с учетом заданной неравномерности осевых нагрузок, обусловленной явлениями разгрузки-догрузки осей (до примерно ±10%), возникающими при тяговой нагрузке тепловоза.

Таблица 1 – Технические данные тепловоза ТЭМ23

Мощность тепловоза по дизелю, кВт	800
Сила тяги, кН	
– при трогании с места, максимальная	294,2
– длительного режима при скорости 10,4 км/ч	215,7
Конструкционная скорость, км/ч	100
Служебный вес тепловоза $П_{\text{Т}}$, кН, не более	900 ± 3%
Осевая формула	$2_0 - 2_0$

© В.Н. Шамардина, С.М. Лемешко, Г.И. Яровой, 2015

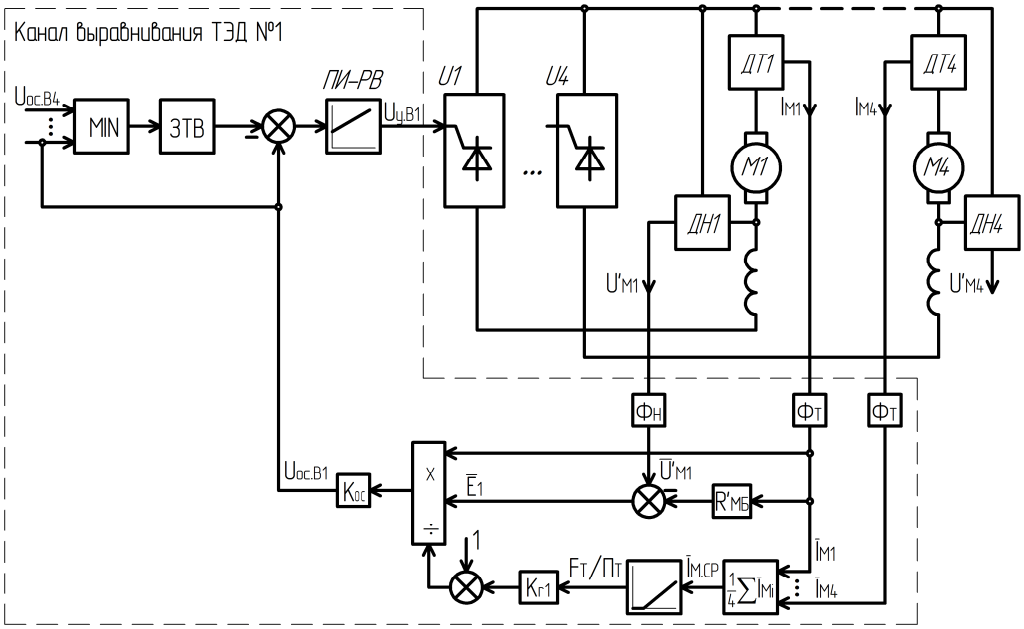


Рис. 1 Функциональная схема канала выравнивания системы регулирования ТЭД

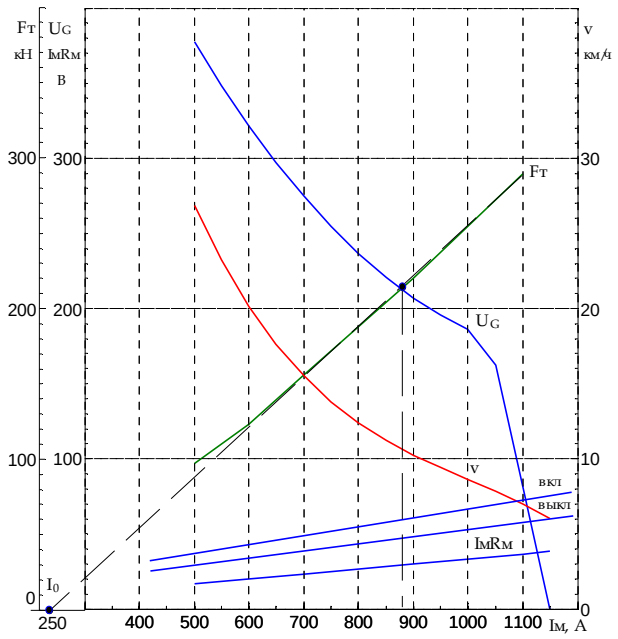


Рис.2 Характеристики электропередачи

Основные уравнения алгоритма регулирования ТЭД

Из условия получения коэффициента тяги K_F одинаковым для всех осей в рассматриваемом режиме движения имеем

$$K_F = F_i/\Pi_i = F_\text{Т}/\Pi_\text{Т}\ , \qquad (1)$$

где Π_i – нагрузка на ось колёсной пары в тяговом режиме с составом,

$F_\text{Т}, F_i$ – соответственно, касательная сила тяги тепловоза и одной оси,

i=1÷4 – порядковый номер оси колёсной пары и соответствующего ей ТЭД.

Имеем также

$$\Pi_i = \Pi_\text{Т}/4 + \Delta\Pi_i = \Pi_\text{Т}/4\left(1 + K_{\text{р}i}\, F_\text{Т}/\Pi_\text{Т}\right), \qquad (2)$$

где $\Delta\Pi_i = K_{\text{р}i}\, F_\text{Т}/4$ – величина изменения нагрузки на ось, обусловленная режимом тяги,

$$\sum_{i=1\div4} \Delta\Pi_i = 0\ .$$

Таблица 2

$K_{\text{р}1}$	$K_{\text{р}2}$	$K_{\text{р}3}$	$K_{\text{р}4}$
1-я ось	2-я ось	3-я ось	4-я ось
– 0,12	– 0,362	0,362	0,12

$K_{\text{р}i}$ – коэффициенты разгрузки/догрузки расчетных суммарных изменений нагрузок колесных пар на рельсы в долях от силы тяги, приходящейся на колесную пару. Характер перераспределения сцепного веса при тяге такой, что половина осей догружается, другая половина разгружается при сохранении неизменной общей величины сцепного веса. Отрицательные значения определяют разгрузку колесной пары, положительные – догрузку. При изменении направления движения перераспределение осевых нагрузок меняется на обратное.

Из (1) и (2) получаем

$$F_i = = F_\text{Т}/4\left(1 + K_{\text{р}i}\, F_\text{Т}/\Pi_\text{Т}\right). \qquad (3)$$

Производя замену

$$F_i = \eta_\text{ММ}\eta_\text{Р}\, P_{\text{ЭЛ}i}/v\ , \qquad (4)$$

$$F_{\text{Т}}/4 = \eta_{\text{ММ}}\eta_{\text{Р}}\left(P_{\text{ЭЛ.Т}}/v\right)/4\,, \tag{5}$$

где v – скорость тепловоза,

$\eta_{\text{ММ}}$ – к.п.д., учитывающий магнитные и механические потери тягового электродвигателя,

$\eta_{\text{Р}}$ – к.п.д. тягового редуктора,

$$P_{\text{ЭЛ.Т}} = \sum_{i=1\div4} P_{\text{ЭЛ}i}\,, \tag{6}$$

где $P_{\text{ЭЛ}}$ – электромагнитная мощность тяговых электродвигателей тепловоза,

получаем закон регулирования

$$P_{\text{ЭЛ}i}\big/\left(1+K_{\text{р}i}\,F_{\text{Т}}/\Pi_{\text{Т}}\right) = P_{\text{ЭЛ.Т}}/4\,, \tag{7}$$

обеспечивающий примерное равенство коэффициентов тяги по осям тепловоза.

На основе выражения (7) реализуется взаимосвязанная САР ТЭД. В качестве обратной связи по сигналам датчиков напряжения и тока ТЭД формируется сигнал по электромагнитной мощности (произведение тока на ЭДС), скорректированный с учетом разгрузки-догрузки осей тепловоза. Сигналом задания служит наименьший в рассматриваемый момент времени из скорректированных сигналов ТЭД.

Реализация в САР закона (7) для канала регулирования i-го якорного преобразователя осуществляется по рассогласованию сигналов задания и обратной связи:

$$U_{\text{ос}i} = K_{\text{ос}}P_{\text{ЭЛ}i}\big/\left(1+K_{\text{р}i}\,F_{\text{Т}}/\Pi_{\text{Т}}\right), \tag{8}$$

$$U_{\text{з}} = \left(1+\delta_1\right)\min U_{\text{ос}i} + \delta_2\,. \tag{9}$$

Для ТЭД с минимальным значением $U_{\text{ос}i}$ канал регулирования закрыт, так как для него $U_{\text{з}} > U_{\text{ос}i}$ согласно (9), и его сигнал $U_{\text{ос}i}$ определяет сигнал $U_{\text{з}}$ для остальных (ведомых) ТЭД, то есть данный ТЭД выполняет функцию ведущего регулирование. При этом напряжение на ведущем ТЭД определяется напряжением тягового генератора.

Определяем величину $F_{\text{Т}}$ в формуле (7) в соответствии с графиком на рис. 2:

$$F_{\text{Т}} = K_{F\text{Т}}\left(\sum_{i=1\div4} I_{\text{М}i}/4 - I_0\right). \tag{10}$$

Принимая далее

$$K_{F\Pi} = K_{F\text{Т}}/\Pi\,,$$

получаем выражение знаменателя в формуле (7) в функции тока $I_{\text{М}}$

$$1+K_{\text{р}i}\,F_{\text{Т}}/\Pi_{\text{Т}} = 1+K_{\text{р}i}K_{F\Pi}\left(I_{\text{М}} - I_0\right). \tag{11}$$

Определяем величину $P_{\text{ЭЛ}i}$ в формуле (7)

$$P_{\text{ЭЛ}i} = E_i I_{\text{М}i}\cdot10^{-3} = \left(U_{\text{М}i} - I_{\text{М}i}R_{\text{М}i}\right)I_{\text{М}i}\cdot10^{-3} \approx \left(U_{\text{М}i} - I_{\text{М}i}R_{\text{М}}\right)I_{\text{М}i}\cdot10^{-3}\,, \tag{12}$$

где $I_{\text{М}}, U_{\text{М}}, E$ – соответственно, ток, напряжение, ЭДС тягового электродвигателя,

$R_{\text{М}i} \approx R_{\text{М}}$ – полное сопротивление цепи тягового двигателя в нагретом его состоянии при 115°С.

Диапазон регулирования величины $U_{\text{М}}$ при отсутствии боксования

По формулам (7) – (12) осуществлен синтез САР канала выравнивания и представлен на рис.1.

Рассмотрим по внешней характеристике (рис. 2) режим работы при отсутствии боксования при учете перераспределения сцепного веса по осям тепловоза, обусловленного тяговым режимом. Важно отметить, что дополнительные положительные и отрицательные осевые нагрузки пропорциональны величине тягового усилия, в нашем случае – величине тока двигателей.

Введём следующие понятия:

сильный ТЭД / слабый ТЭД – потребляющий, соответственно, наибольший или наименьший ток якоря при равных напряжениях питания и частотах вращения ТЭД

тяжелая ось / легкая ось – имеющая, соответственно, наибольшую или наименьшую осевую нагрузку в результате перераспределения сцепного веса тепловоза между осями при тяговом режиме

Наибольший диапазон изменения угла управления α якорного преобразователя достигается в случае комбинации «слабый» ТЭД на «тяжёлой» оси $\left(\alpha = 0\right)$ и «сильный» ТЭД на «лёгкой» оси $\left(\alpha = \alpha_{\max}\right)$, при этом в результате регулирования поддерживается приблизительное равенство коэффициентов тяги по осям тепловоза. Полученный в дальнейшем результат (значение параметра $U_{\text{М2}}/U_{\text{М3}}$) относится к данному случаю.

С использованием пакета MATLAB выполнено моделирование режима работы на максимальной тяговой позиции контроллера машиниста в точке на внешней характеристике ТГ $I_{\text{М}} = 1030$ А, $U_G = 186$ В, соответствующей точке включения канала регулирования мощности САР ТГ.

В соответствии с табл. 2 считаем 2-ю и 3-ю оси в качестве «лёгкой» и «тяжёлой» осей. В ходе моделирования исследованы два взаимосвязанных канала выравнивания с ТЭД №3 и ТЭД №2 с общим сигналом задания $U_з$ и ПИ-регулятором выравнивания коэффициентов тяги.

В случае рассогласования, сформулированного по (11), было получено уменьшение электромагнитной мощности $P_{ЭЛ2}$ относительно $P_{ЭЛ3}$ на 20 %, при этом отклонение ЭДС ТЭД №2 составило 6,7%, что соответствует точке 2 на рис. 3-6.

Далее с учетом уменьшения $P_{ЭЛ2}$ ТЭД №2, находящегося на «лёгкой» оси, введено расхождение характеристик намагничивания $E = \varphi(I_{\text{М}})$ рассматриваемых ТЭД. Для рассматриваемого режима при насыщенных ТЭД принято допустимое расхождение на уровне $\delta E = 0{,}07$. При сохранении мощности $P_{ЭЛ2}$ это приводит к дополнительному уменьшению ЭДС ТЭД №2 до значения E_2 по гиперболической характеристике в режиме, соответствующем точке 3 на рис. 3 по сравнению с режимом в точке 2.

По полученным данным (рис.4) находим величину наибольшего снижения напряжения ТЭД №2. В результате имеем искомое значение

$$U_{\text{М}}/U_{\text{М0}} = U_{\text{М2}}/U_{\text{М3}} = 164/186 = 0{,}88,$$

где $U_{\text{М0}}$ – выходное напряжение при $\alpha = 0$, равное выпрямленному напряжению ТГ U_G.

Принимаем в тяговом режиме работы граничный угол регулирования канала выравнивания (рис.7):

$$\alpha = \cos^{-1}(2 \cdot 0{,}88 - 1) \approx 40°.$$

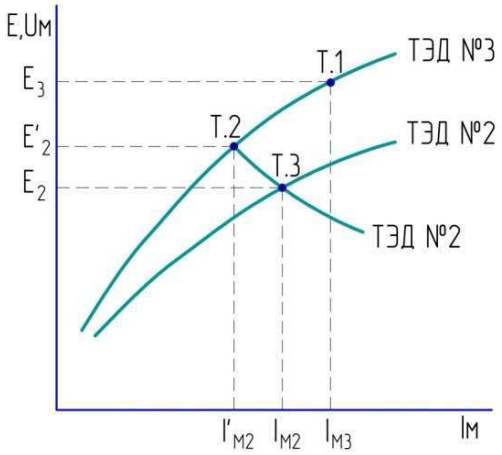


Рис. 3 Характеристики намагничивания ТЭД №2 и №3 и гиперболическая ТЭД №2

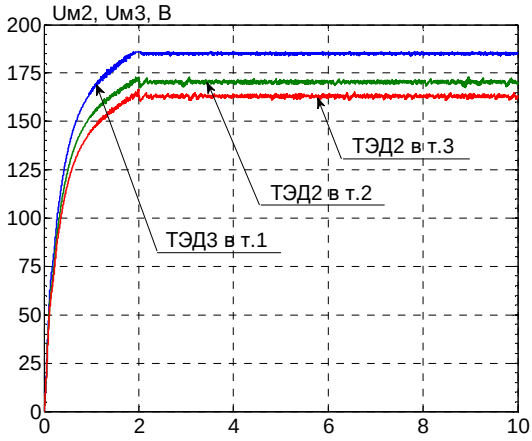


Рис. 4 Напряжения ТЭД №2 и ТЭД №3

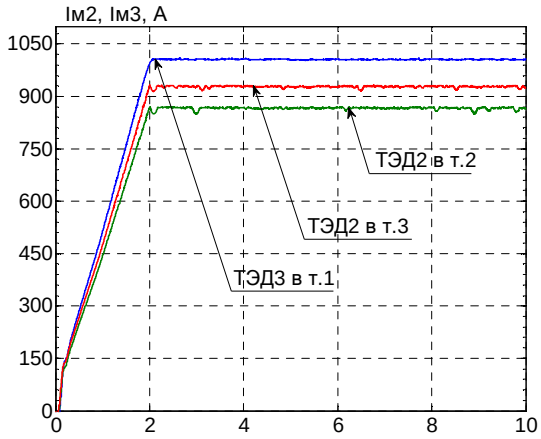


Рис. 5 Токи ТЭД №2 и ТЭД №3

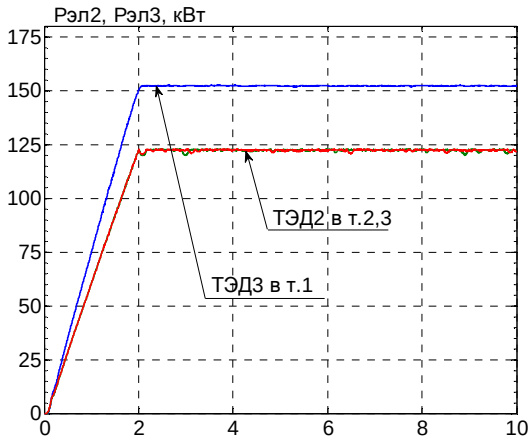


Рис. 6 Электромагнитная мощность ТЭД №2 и ТЭД №3

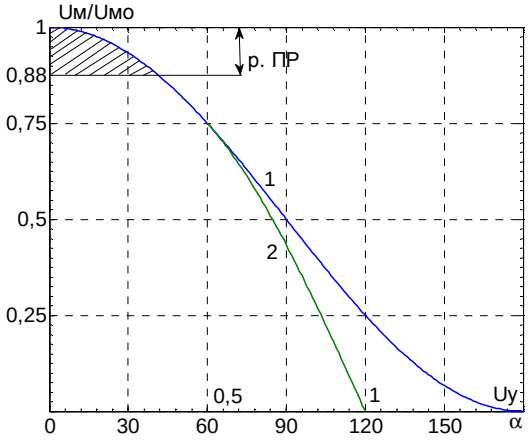


Рис. 7 Регулировочная характеристика с шунтирующим диодом на выходе выпрямителя (ШД) (1) и без ШД (2)

Выводы. Для системы регулирования ТЭД:

– предложен алгоритм выравнивания коэффициентов тяги в системах поосного регулирования без внесения изменений в электрическую схему силовой части существующих магистральных тепловозов 2ТЭ116У и 2ТЭ25К с управляемыми выпрямительными установками;

– учтено влияние расхождения электромагнитных характеристик ТЭД и неравномерности осевых нагрузок;

– выполнено моделирование работы САР с каналом выравнивания при работе в штатных и в нестационарных режимах, при наличии боксования и включения в работу соответствующего канала индивидуального воздействия на мощность ТЭД боксующей оси тепловоза действие канала выравнивания стабилизирует свой управляющий сигнал;

– при работе канала определен диапазон регулирования тяговых выпрямителей $\alpha = 0 \div 40°$, при котором шунтирующий диод в схеме выпрямителя все время заперт, и надобность в нем отпадает;

– внедрение каналов выравнивания совместно с работой САР ТГ позволило увеличить коэффициент тяги, что актуально для особых условий эксплуатации маневровых тепловозов.

Список литературы: 1. Электрическая схема тепловоза 2ТЭ116У / *С.В. Сергеев, А.В. Пархонин* [и др.] // Локомотив. – 2009. – N 6. – С. 22-25. – ISSN 0869-8147. **2.** Электропередачи тепловозов на переменно-постоянном токе / *И.К. Колесник, Т.Ф. Кузнецов, В.И. Липовка*. – М.: Транспорт, 1978. – 149 с. **3.** *Барский В. А.* О модернизации системы противоюксовочной защиты эксплуатируемых тепловозов / *В.А. Барский, А. Е. Фришман, Р. В. Афенченко* // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 36 (1009). – С.175-176. **4.** Теория и конструкция локомотивов: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / *Г.С. Михальченко, В.Н. Кашников, В.С. Коссов* [и др.]; под ред. *Г.С. Михальченко*. – М.: Маршрут, 2006. – 584 с. **5.** *Федяева Г.А.* Моделирование нестационарных режимов перспективного магистрального тепловоза / Г.*А. Федяева, В. Н. Федяев* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – С. 178-181. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vdnuzt_2007_17_40.pdf. **6.** *Костюкевич А.И., Кравченко Е.А., Гундарь В.П.* [и др.] // Целевая функция для оценки резерва реализации силы тяги локомотива. Вісник СНУ ім. В. Даля – № 4 (158) – Частина 2 – 2011. **7.** *Шамардина В.Н.* Исследование работы контура динамического регулирования напряжения тягового генератора электропередачи тепловоза 2М62УК при имитации нестационарных режимов работы / *В.Н. Шамардина, С.М. Лемешко* // Електромех. і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 3. – С. 313-315.

Bibliography (transliterated): 1. Sergeev, S.V., et al. «Jelektricheskaja shema teplovoza 2TJe116U.» *Lokomotiv* 6 (2009): 22-25. Print. **2.** Kolesnik, I.K., T.F. Kuznecov and V.I. Lipovka. *Jelektroperedachi teplovozov na peremenno-postojannom toke*. Moscow: Transport, 1978. Print. **3.** Barskij, V. A., A. E. Frishman and R. V. Afenchenko «O modernizacii sistemy protivoboksovochnoj zashhity jekspluatiruemyh teplovozov.» *Vestnik Nac. tehn. un-ta «HPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda*. No. 36 (1009). Kharkiv: NTU «HPI», 2013. 175-176. Print. **4.** Mihal'chenko, G.S., et al. *Teorija i konstrukcija lokomotivov: Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta*. Moscow: Marshrut, 2006. Print. **5.** Fedjaeva, G.A., and V. N. Fedjaev. «Modelirovanie nestacionarnyh rezhimov perspektivnogo magistral'nogo teplovoza.» *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazarjana*. No. 17. 2007. 178-181. Web. 29 July 2015 < http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vdnuzt_2007_17_40.pdf >. **6.** Kostjukevich, A.I., et al. «Celevaja funkcija dlja ocenki rezerva realizacii sily tjagi lokomotiva. « *Visnik SNU im. V. Dalja*. No. 4 (158). 2011. 20-26. Print. **7.** Shamardina, V.N., and Lemeshko S.M. «Issledovanie raboty kontura dinamicheskogo regulirovanija naprjazhenija tjagovogo generatora jelektroperedachi teplovoza 2M62UK pri imitacii nestacionarnyh rezhimov raboty». *Elektromeh. i energozberigajuchi sistemi* 3 (2012): 313-315. Print.

Поступила (received) 19.08.2015

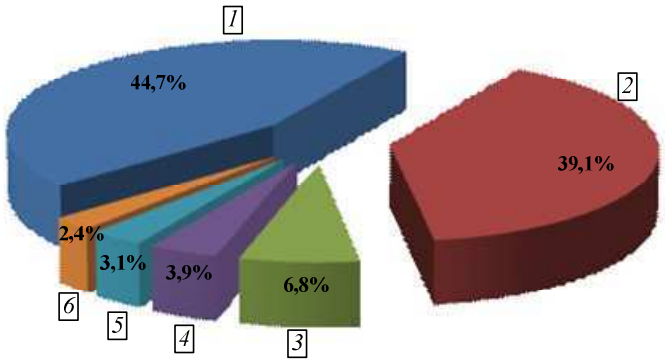
УДК 629.423.31

Е. С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «Криворізький національний університет»;
І. О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «Криворізький національний університет»;
В. О. ЧОРНА, асист. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського;
Л. М. СМЕНОВА, здобувач, Українська державна академія залізничного транспорту

РОЗРОБКА БЕЗСЕНСОРНОГО СПОСОБУ ЗАХИСТУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ РУДНИЧНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ВІД ПЕРЕГРІВУ

Вступ. Більше третини в загальній собівартості видобутку руди підземним способом складають енергетичні затрати [1]. При цьому, на відміну від інших способів видобутку корисних копалин, електроенергетичні витрати складають близько 90 %, в т.ч. до 16 % – це витрати на внутрішньошахтний транспорт. Між тим, наразі в експлуатації в умовах шахт України перебуває близько чотирьох тисяч електровозів двадцяти видів із застарілим обладнанням, яке потребує сучасної модернізації з урахуванням новітніх розробок. Крім цього, вітчизняні підприємства гірничо-металургійного комплексу з технологією підземного ведення робіт відносять до числа найнебезпечніших з огляду на можливість ураження електричним струмом та статистику виробничого травматизму (внаслідок дії цього чинника), яка в останні роки невпинно зростає [2]. Зниження фактору неефективності функціонування електротехнічного транспорту, підвищення його експлуатаційної безпеки та надійності можливі за умови побудови й застосування сучасних систем управління поточними електричними та технологічними параметрами електровозоскладу під час руху з використанням бездатчикових систем контролю.

Постановка задачі. Вітчизняні рудничні (шахтні) електровози оснащені тяговими електроприводами (ТЕП) на базі електричних двигунів постійного струму послідовного збудження. Нажаль, як свідчить статистика несправностей електромеханічного обладнання тягового рухомого складу українських шахт, надійність даних двигунів в комплексі ТЕП електровозів досить низька. Так, міжремонтні терміни їх експлуатації складають від чотирьох до восьми місяців. При цьому, як показують численні дослідження [3], перевищення температурних показників над конструкційними є основною причиною більшості пошкоджень, особливо це стосується пошкоджень якірної обмотки та обмотки полюсів, що в цілому складають близько 80 % від усіх несправностей (рис. 1).



1 – головні та додаткові полюси, 2 – якір, 3 – щіткотримач, 4 – вивідні кабелі, 5 – підшипники, 6 – інші вузли
Рис. 1 – Дані про пошкодження елементів тягових двигунів типу ДТН45/27 при експлуатації на електровозах у залізорудних шахтах «Криворіжзалізрудком»

Тому актуальним в комплексі тягових електромеханічних систем є застосування системи контролю та захисту від перегріву тягових електричних двигунів (ТЕД) з метою підвищення їх надійності та ефективності функціонування рухомого складу в цілому.

Матеріали дослідження. Багаточисельні лабораторні та промислові дослідження процесу нагрівання показали, що в тепловому відношенні ТЕД являє собою складний об’єкт, температурне поле якого навіть при всіх спрощених передумовах класичної теорії нагрівання визначається складно і не завжди забезпечує співпадіння з розрахунковими значеннями [4]. Найскладнішим випадком теплового процесу ТЕД вважається такий, при якому час роботи двигуна не настільки великий, щоб температуру в кінці процесу можна було вважати близькою до сталої, і одночасно не настільки малий, щоб температуру можна було вважати такою, що змінюється за прямолінійним законом (через короткочасність теплового процесу можна вважати, що теплообмін не відбувається). Такий режим роботи характерний для роботи ТЕД.

При експлуатації тягового рухомого складу в умовах залізорудних шахт характерною рисою переважної більшості рейсів є чередування періодів навантаження і пауз (рис. 2), причому співпадіння навантажувальних діаграм не спостерігається, що обумовлено впливом багатьох факторів. До числа таких можна віднести: зміну опору руху електровоза при забрудненні рейок рудою, зміну коефіцієнта зчеплення коліс з рейками на окремих ділянках шляху, різке падіння напруги в тяговому ланцюзі під час завантаження вагонеток в ортах, зростання тягових зусиль в залежності від рівня завантаженості електровозоскладу, зміну рівня споживаного струму та тривалості окремих операцій.

Такі умови функціонування ТЕД негативно відображаються на його температурних характеристиках. Так, найбільше перевищення температури ТЕД спостерігається при розвантажувально-завантажувальних операціях, що пояснюється реалізацією електричної потужності в тяжких умовах з точки зору нагріву ТЕД.

© О.М. Сінчук, Е.С. Гузов, І.О. Сінчук, В.О. Чорна, Л.М. Сменова, 2015

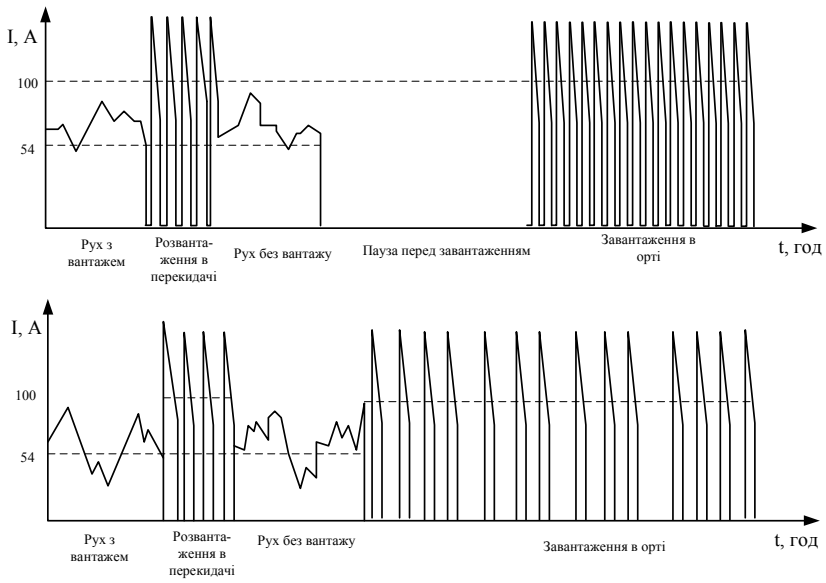
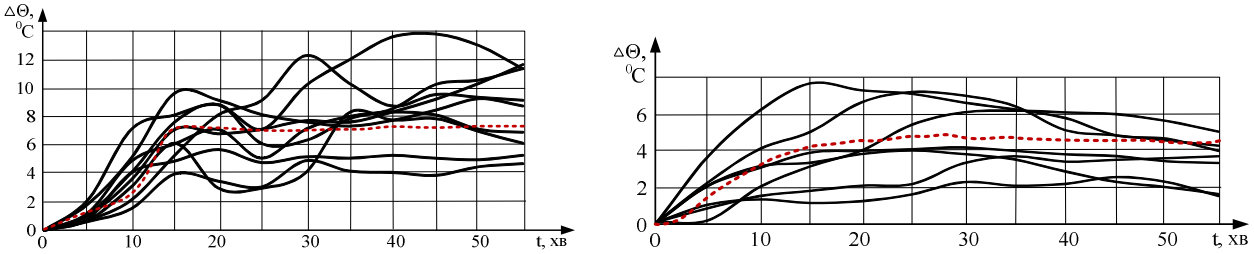


Рис. 2 – Діаграми навантажень тягових електричних двигунів шахтних контактних електровозів за циклами руху підземними горизонтами ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат»

Результати експериментальних рейсів свідчать про те, що температура ТЕД протягом рейсу змінюється не прямолінійно, а має нерегулярний випадковий (коливальний) характер, як і навантаження, яке є джерелом таких коливань (рис. 3). Для підтвердження цього нижче наведені криві можливих реалізацій двох випадкових функцій перевищення температури для однієї величини відносного навантаження (I), але різної відносної тривалості дії навантаження (τ).



а) б)

Рис. 3 – Графіки реалізації випадкової функції перевищення температури тягового двигуна ДТН-45 за час рейсу електровоза К14: а) I=1,7 для τ=0,55;б) I=1,7 для τ=0,3.

Слід відзначити, що через інерцію теплових процесів, зміна температури складових ТЕД в часі відбувається приблизно однорідно і має вигляд безперервних випадкових коливань навколо деякого середнього значення, причому ні середня амплітуда, ні характер цих коливань не виявляють суттєвих змін протягом часу роботи двигуна.

Тим не менш, перевищення температурних показників ТЕД сприяє швидкому виходу з ладу останніх та погіршенню показників надійності функціонування усього комплексу рудничної відкатки. У зв'язку з чим як для існуючих, так і для нових ТЕД, що розробляються, необхідним є контроль температурних показників обмоток, так як й інших параметрів ТЕД.

Як було зазначено раніше, підвищення надійності роботи ТЕД неможливе без поточного контролю температури його складових під час функціонування у комплексі шахтного електрорухомого складу [4]. Як свідчить досвід експлуатації магістральних електровозів, застосування лише системи безперервного температурного контролю режимів функціонування ТЕД дозволяє знизити відмови останніх на 30…35%, виходи з ладу колекторів – у 2,6…3,3 рази, кругових вогнів – у 3,1…3,7 рази [5]. Експлуатація ТЕД без систем контролю теплових режимів збільшує кількість їх відмов в 1,5…3,5 рази.

Серед численних способів контролю температури ТЕД можна виділити найбільш розповсюджені та широко застосовувані у промисловості, до яких належать:

– контроль температури за допомогою датчиків температури, закладених у двигун;
– контроль рівня нагріву за допомогою теплових реле;
– розрахункові методи;
– непряма оцінка, яка базується на вимірюванні опорів обмоток двигуна.

Найбільш точним та найбільш застосовуваним є метод безпосередньої оцінки температури обмоток закла-

деними в двигун датчиками температури, оскільки він дає безпосередню оцінку нагріву досліджуваного об'єкта. Разом з тим, даний метод має суттєвий недолік, що полягає у необхідності конструктивного закладення в обмотки двигуна датчиків, що потребує розбирання ТЕД, а технологічна необхідність виведення з двигуна додаткових проводів в умовах жорсткої вібрації ТЕД може стати причиною їх ушкодження та призвести до відмов системи контролю та некоректної роботи системи захисту.

Теплові реле раціонально застосовувати при захисті ТЕД з постійним або малозмінним навантаженням. Але як відомо, тягові навантаження – це навантаження, що безперервно змінюються в широкому діапазоні протягом технологічної зміни відкатки рудничним транспортом. Ефективний захист за умови подібних навантажень можливий лише у випадках рівності постійних часу нагріву та охолодження двигуна та реле. Для забезпечення надійного захисту ТЕД від перегріву теплові реле обираються за величиною струму тривалого режиму. Для тягових двигунів типу ДТН, які складають значну частину ТЕП шахтних електровозів, співвідношення струмів часового та тривалого режимів складає 1.7, при цьому час спрацювання реле складає 5 хв, хоча двигун в цьому режимі може працювати протягом години з допустимим навантаженням. Отже, за умови перевищення струмів тривалого режиму теплові реле спрацьовують занадто швидко, що може спричинити «перегони автоматів», а відтак непридатні для захисту ТЕД від перегріву.

Відомий розрахунковий метод визначення нагріву в функції часу для випадку довільного навантаження, що відповідає режиму роботи ТЕД [6]. Однак, розрахунок ступеню нагріву ТЕД за даним методом передбачає введення деяких спрощень класичної теорії нагрівання та може застосовуватись лише для найпростішого випадку, при якому весь період часу може бути розділений на проміжки часу, протягом яких функцію втрат можна вважати лінійною. Звісно, це спрощення віддаляє поставлену задачу від реальних фізичних процесів.

В рамках досліджень теплових режимів ТЕД існує немало розрахункових теплових моделей. Як правило, ці моделі базуються на представленні досліджуваних процесів в окремих елементах конструкції ТЕД, що завжди пов'язано зі значним обсягом розрахунків та робить нераціональним їх використання у складі комплексної моделі шахтного електровоза з її непередбачуваними та несталими режимами функціонування.

Один з поширених розрахункових методів визначення температури ТЕД передбачає визначення величини середньоквадратичного струму згідно виразу:

$$I_C = \sqrt{\frac{I^2_1 t_1 + I^2_2 t_2 + I^2_3 t_3 + ... + I^2_n t_n}{\sum_1^n t_i}}, \qquad (1)$$

де $I_1, I_2, I_3 \ldots I_n$ – струми навантаження відповідно в проміжки часу $t_1, t_2, t_3 \ldots t_n$.

Разом з тим, за результатами багаточисленних експериментальних досліджень [7] та подальшої оцінки режимів функціонування ТЕД рудничних електровозів було встановлено, що розрахунки, які проводяться за вищевказаним виразом, далекі від реальних значень оскільки величина визначеної температури якоря та полюсів нижче дійсної. Обумовлено це тим, що вказаним методом не враховується погіршення умов охолодження ТЕД при зниженні швидкості руху електровоза в ортах.

Так, на рис. 4 наведені залежності величини перевищення температури ТЕД типу ДТН-45 від часу його роботи під навантаженням, з яких видно, що протягом 20 хв роботи ТЕД його температура збільшилась на 7,2 °С (крива 2), а за час охолодження, який становить 21 хв, зменшилась на 7,4 °С. Т.ч. наприкінці рейсу температура стала нижчою за початкову. Насправді ж перевищення температури протягом наведеного в якості прикладу рейсу складає 5,8 °С (крива 1). За результатами розрахунків встановлено, що температура двигуна збільшилась в середньому на 2,8 °С (крива 3).

Отже, середньоквадратичний струм при несталих режимах роботи ТЕД з випадковим чергуванням періодів пауз та навантажень не відображає дійсної зміни температури нагріву двигуна протягом рейсу чи зміни.

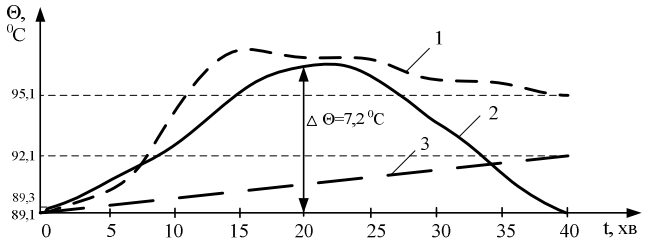


Рис. 4 – Порівняння дійсного нагріву з еквівалентним, отриманих за результатами розрахунків
1 – еквівалентна температура нагріву за час рейсу; 2 – результати експерименту; 3 – результат розрахунків

Крім того, як доведено багатьма дослідниками цієї проблеми [7-9], усі без виключення відомі теоретичні теплові моделі ТЕД в умовах їх функціонування в комплексі тягових електротехнічних систем рудничних контактних електровозів в тій чи іншій мірі далекі від реальних та не можуть бути рекомендовані до практичних розрахунків [7].

Таким чином, не зважаючи на достатню кількість способів контролю температурних режимів ТЕД, їх застосування для ТЕП рудничних електровозів не може забезпечити якісного вирішення головного завдання.

Як свідчать дослідження температурних режимів ТЕД рудничних електровозів, найбільш небезпечне нагрівання відбувається у обмотці якоря, але контроль її температури супроводжується певними труднощами, пов'язаними зі щітковими контактами, оскільки їх опір нестабільний та може змінюватися в десятки разів залежно від марки щіток, їх приробітки, стану поверхні колектора та його температури, швидкості обертання. До того ж щітки перекривають декілька колекторних пластин, шунтуючи секції обмотки якоря. Тому достатньо точне визначення температури якірної обмотки за її опором неможливе.

Однак існує інший шлях – контролювати температуру за опором обмотки збудження [10]. Це можливо виходячи з того, що обмотка збудження ТЕД рудничних електровозів підключена послідовно з обмоткою якоря, тому по ним протікає однаковий струм. Це дозволяє говорити про те, що нагрівання та охолодження обмоток взаємопов'язані, і дозволяє за температурою обмотки збудження точно визначити температуру обмотки якоря.

Дослідження розподілу температур ТЕД типу ДТН 45/27, проведені колективом авторів на лабораторному стенді, показали, що при максимально допустимій температурі обмотки якоря вона нагрівається на 25 ^{0}C вище, ніж обмотка збудження як в тривалому, так і в годинному режимі. Враховуючи, що допустима температура обмотки якоря для ізоляції класу F складає 155 ^{0}C, максимально допустима за нагріванням якоря температура обмотки збудження (клас ізоляції H) складає 130 ^{0}C. Отже, незважаючи на те, що обмотка збудження допускає й більш високу температуру (180 ^{0}C), захист від перегрівання ТЕД повинен спрацьовувати при досягненні температури обмотки збудження 130 ^{0}C, що відповідає опору:

$$R_{130} = R_x \frac{365}{235 + \tau_x}. \qquad (2)$$

Отже, логічним є висновок, що для контролю опору обмотки збудження в процесі роботи ТЕД зручно використовувати метод амперметра-вольтметра, при опорі обмотки, що дорівнює співвідношенню *U/I*. З метою реалізації функції визначення опору запропонована схема, представлена на рис. 5.

В схемі передбачено вимірювання середніх значень струму та напруги, які не залежать від частоти комутації робочого вентиля перетворювача та постійної часу обмотки збудження. При цьому середнє значення напруги *U* знімають з обмотки збудження ОЗ через коло, що складається з опорів *R1-R3* та конденсатора *C*, яке обмежує імпульси напруги при комутаціях в силовому колі пристрою, що захищається. Середнє значення струму *I*, який протікає через обмотку збудження, визначають за допомогою шунта *RS*. Настроювання захисту на визначений опір та відповідну температуру здійснюють резистором *R3*.

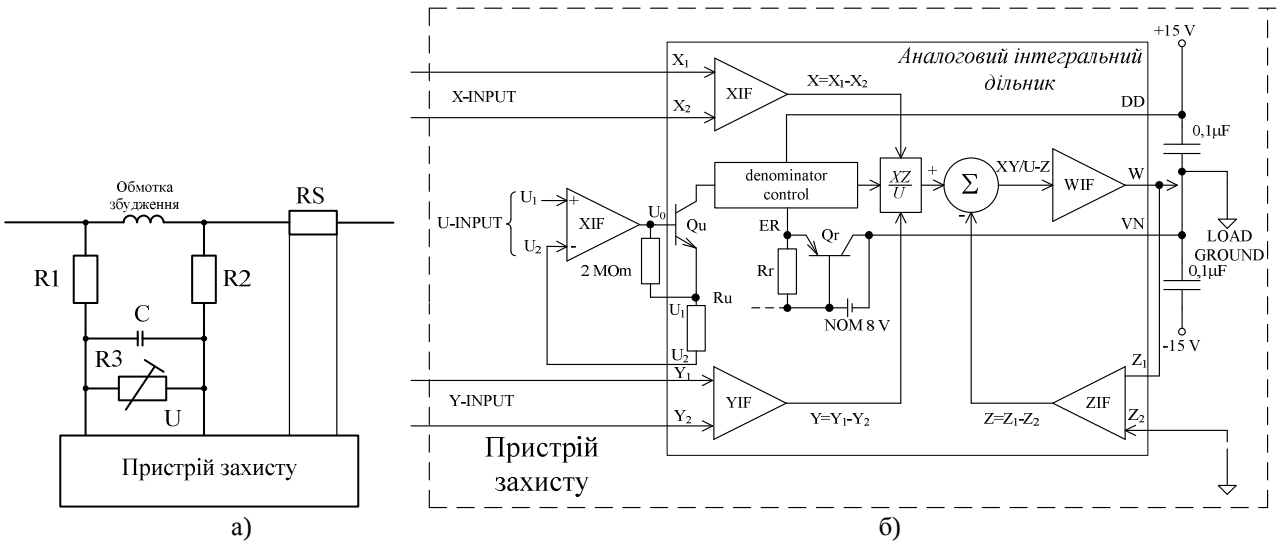


Рис. 5 – Структурна схема захисту тягового двигуна шахтного електровоза від перегрівання (а) та захисного пристрою на базі мікросхеми AD734 (б)

Блок пристрою захисту містить аналоговий інтегральний дільник, який виконує функцію ділення $U_{сер}/I_{сер}$ – тобто безперервно визначає величину опору обмоток. Пристрій функціонує наступним чином. При досягненні значення опору, що відповідає температурі обмотки збудження 130 ^{0}C, захист спрацьовує, температура обмотки якоря при цьому сягає температури 155 ^{0}C. Схема не потребує встановлення в ТЕД датчиків температури, – безпосередньо обмотка збудження двигуна є датчиком, що, безумовно, відображається на простоті та надійності захисту.

В даній структурі як реальний варіант дільника для практичної реалізації може слугувати мікросхема 4-Quadrant Multiplier/Divider AD734 © Analog Devices, Inc. Схема підтримує два режими аналогового ділення. Її рекомендовано використовувати як аналоговий дільник, який працює в режимі безпосереднього регулювання напруги. Цей режим є більш точним, гнучким та дозволяє підвищити частоту роботи мікросхеми, оскільки всі входи є доступними. Типовий дільник забезпечує виконання функції:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{(U_1 - U_2)} + Z_2 \qquad (3)$$

де *X, Y, Z* – вхідні сигнали.

При цьому різниця сигналів *U=U1–U2* повинна бути додатньою величиною та знаходитись у межах 10 мВ÷10 В.

Розроблений та запропонований спосіб контролю температурних режимів ТЕД в процесі їх роботи дозволить підвищити надійність функціонування всього комплексу рудничної відкатки, оскільки дасть змогу контролювати температуру окремих складових ТЕД під час роботи та не допускати перевищення температурних режимів вище допустимих меж.

Висновки. Отже, проведений аналіз та оцінювання якісних показників функціонування пристроїв контролю температурних режимів, які застосовують в тягових електромеханічних системах з тяговими двигунами постійного струму послідовного збудження сучасних рудничних електровозів, дозволили виявити головні причини їх низької надійності. За результатами проведених досліджень розроблено структурну схему пристрою контролю, рекомендовану до практичної реалізації. Запропонований спосіб контролю та захисту ТЕД від перевищення температури нагріву їх елементів не передбачає встановлення датчиків температури, оскільки обмотка збудження двигуна є датчиком. Це робить захист простим та надійним, що особливо актуально для тягових електротехнічних комплексів промислових видів електровозів.

Список літератури: 1. *Бабец Е. К.* Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой коньюктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг./ *Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик* и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011. – 329 с. **2.** *Сінчук І. О.* Електротравматизм і шляхи його зменшення при експлуатації електрифікованих видів транспорту на підземних гірничорудних підприємствах / *І. О. Сінчук, Є. І. Скапа* // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : Зб. наук. праць наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. – Кременчук. – 2011. – С. 338–339. **3.** *Черная В. О.* К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов / *В. О. Черная* // Молодь : наука та інновації. Перша Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. – Дніпропетровськ : ВНЗ «НГУ». – 2013. – С. 421–422. **4.** *Синчук И. О.* Исследование тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных контактных электровозов / И. О. Синчук, В. О. Черная // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика : наукове видання. – Кременчук, 2014. – № 1/2014 (2). – С. 98–100. **5.** *Банников Е.В.* Анализ причин повреждаемости тяговых двигателей рудничных электровозов на шахте «Ленинградская» / *Е. В. Банников, В. Н. Кордаков* // Горючие сланцы. – 1977. – № 5. – С. 18–23. **6.** *Сінчук О. М.* Побудова математичної теплової моделі тягового електричного двигуна постійного струму / *О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко* // Вісн. Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Техн. науки. Серія Транспорт. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля. – 2005. – № 8(90). – Ч. 2. – С. 50–54. **7 .** *Оат Г.П.* Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов горнорудных шахт: автореф. дис. на соискание ученой степени к.т.н. – Кривой Рог, 1962. – 19 с. **8.** *Сінчук О. М.* Нештатні режими і структура системи захисту від них при функціонуванні двоосних електровозів / *О. М. Сінчук, В. О. Чорна* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2/2012. – С. 100–104. **9.** *Щербатов В.В.* Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия Томского политехнического университета. Технические науки. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 156–159. **10.** *Богаенко И. Н.* Контроль температуры электрических машин / *И. Н. Богаенко*. – К. : Техника, 1975. – 176 с.

Bibliography (transliterated): 1. Babec, E. K., Shtanko, L. A., Salganik, V. A. *Sbornik techniko-ekonomitcheskih pokazateley gornodobyvajuschih predpriyatiy Ukrainy v 2009-2010 gg. Analys mirovoy konyuktury rynka ZRS 2004-2011*. Krivoy Rog: Vydavnytchiy dim, 2011. Print. **2.** Sinchuk, I. O., Skapa, E. I. Elektrotravmatyzm i shlyahy yogo zmenchennya pri ekspluatacii elektryfikovanyh vydiv transport na pidzemnyh girnyzhorudnyh pidpryemstvah. *Electromechanichni ta energetychni systemy, metody modelyuvannya nta optymizacii : Zb. nauk. prac nauk.-tehn. konf. molodyh uchenyh i specialistiv*. (2011): 338-339. Print. **3**. Chernaya, V. O. K voprosu analiza povrezhdeniy tyagovyh dvigateley shahtnyh electrovozov. Molod : nauka ta innovacii. *Persha Vseukr. nauk.-tehn. konf. studentiv, aspirantiv i molodyh uchenyh. Dnipropetrovsk : VNZ "NGU"*. (2013): 421-422. Print. **4.** Sinchuk, I. O., Chernaya, V. O. Issledovanie teplovyh rezhymov tyagovyh elektricheskih dvigateley rudnichnyh kontaktnyh electrovozov. *Problemy energeresursozberezhennya v electrotehnichnyh systemah. Nauka, osvita i practyka : naukove vydannya*. Kremenchuk. 1/2014(2). (2014): 98-100. Print. **5.** Bannikov, E.V., Kordakov V.N. Analiz prichin povrezhdaemosti tyagovyh dvigateley rudnichnyh electrovozov na shahte "Leningradskaya". *Goryuchie slancy*. 5 (1977): 18–23. Print. **6.** Sinchuk, O. M., Sushko D.L. Pobudova matematychnoi teplovoi modeli tyagovogo elektrychnogo dvyguna postiynogo strumu. *Visn. Shidnoukrainskoi nacionalnogo universytetu im. V. Dalya. Tehn. nauky. Seriya Transport*. Lugansk. 8(90).2 (2005): 50–54. Print. **7.** Oat, G.P. Issledovanie nagruzok tyagovyh dvigateley electrovozov gornorudnyh shaht. Avtoref. dis. na soiskaniye utchenoy stepeni k.t.n. Krivoy Rog. 1962. Print. **8.** Sinchuk, O. M., Cherna, V. O. Neshtatni rezhymy i struktura systemy zahystu vid nyh pry funkcionuvanni dvoosnyh electrovoziv. *Visnyk Vinnyckogo politehnichnogo institutu*. 2/2012. 100–104. Print. **9**. Scherbatov, V.V., Rapoport O.L., Zukublin A.B. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa. *Izvestiya Tomskogo Vinnyckogo politehnicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 308.7 (2005): 156–159. Print. **10**. Bogaenko I.N. Kontrol temperatury elektricheskih mashin. K. : Tehnika, 1976. Print.

Надійшла (received) 05.08.2015

УДК 621.313.33

Б. Г. ЛЮБАРСКИЙ, докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
С. Г. БУРЯКОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. УкрГУЖТ;
АР. С. МАСЛИЙ, канд. техн. наук, стар. преп. УкрГУЖТ;
АН. С. МАСЛИЙ, инженер ООО «Укртранссигна», Харьков.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение. Основной тенденцией в развитии конструкций электроприводов (ЭП) стрелочных переводов является создание мехатронных систем с минимумом ступеней преобразования энергии. В таких приводах электродвигатель непосредственно преобразует электрическую энергию в линейную силу без промежуточного редуктора, что обеспечивает снижение энергопотребления, повышение надежности и безопасности, а также к снижению затрат времени на укладку стрелочного перевода (СП), как для обычного, так и высокоскоростного движения, за счет отказа от предварительного монтажа на вспомогательной площадке.

Постановка задачи. Стрелочные переводы работают под открытым небом при различных условиях под влиянием погодных факторов (упавшие сухие листья, дождь, снег и т.д.). Имеют место случаи, когда остряк контактирует не со всеми переводными подушками. Кроме того, переводные поверхности могут быть смазаны (штатное состояние) либо смазаны частично, либо не смазаны вообще (нештатное состояние). Существует проблема загрязнения переводных поверхностей в результате попадания частичек перевозимых грузов (угольная пыль, рудная пыль, цемент, мазут, т.д.). Поэтому коэффициент трения не одинаков по всему пути движения остряка, что создает условия для возникновения фрикционных автоколебаний[1,2,3]. Кроме того, присутствие зазоров в стрелочном переводе не только в соединениях тяг, но и в редукторе негативно сказывается на качестве процесса перевода [1,2], поэтому сведение их к минимуму даст положительный результат. Так как значительная часть энергии тратится в редукторе [1,2], то его упрощение также является одной из основных задач. Все эти рекомендации должны быть учтены при разработке ЭП СП нового типа.

Материалы исследования. Приведение в движение исполнительного механизма и управление этим движением для выполнения технологических операций являются основными задачами автоматизированного электропривода. При этом необходимо знать общие особенности электромеханической системы (ЭМС), важнейшие её элементы, связи и параметры. Поэтому на основе кинематической схемы механизма составляются расчетные схемы, описывающие движение электропривода дифференциальными уравнениями.

Электропривод СП выполнен на основе линейного двигателя (ЛД) [4]. Такой привод позволяет создать большие электромагнитной силы. Обеспечение же точности перемещения осуществляется за счет его системы управления. Ввиду выше сказанного, предлагаемый привод СП с расположением оборудования в нем представлен на рис. 1.

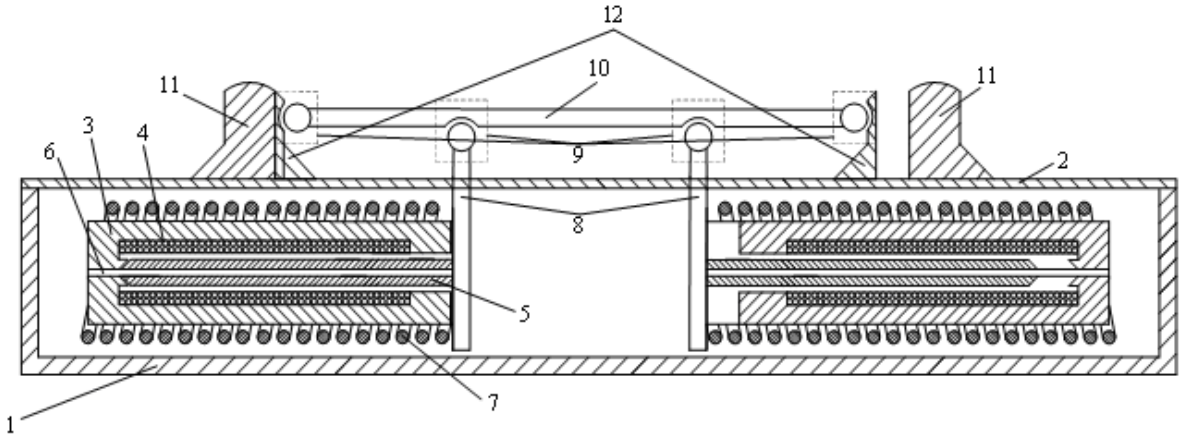


Рис. 1 – Кинематическая схема стрелочного перевода

Весь перевод помещён в корпусе (1) с крышкой (2) (имеет вид шпалы), на котором закреплен рамный рельс (11). ЛД состоит из четырёх основных частей: статора (3), электромагнитной катушки (4), якоря (5) и направляющего стержня (6). ЛД осуществляет преобразование электрической энергии в механическую, приводя в движение якорь двигателя, который через вертикальные тяги (8), шарниры (9) и продольную тягу (10) передают усилие острякам (12), которые осуществляют свое перемещение между рамным рельсом (11).

© Б.Г. Любарский, С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, 2015

В начале перевода расстояние между якорем и статором соответствует расстоянию между остряком и рамным рельсом и равно 152 мм. Создаваемая ЛД электромагнитная сила перемещает якорь по направляющему стержню. Применение пружин (7) обусловлено недостаточным значением электромагнитной силы в начале перевода, а также обеспечением необходимого усилия в случае примерзания остряка к рамному рельсу. Весь привод стрелочного перевода состоит из двух представленных частей для осуществления реверсивной работы.

Ввиду того, что усилие к продольной тяге от якорей передается через две вертикальные тяги (усилие к продольной тяге прикладывается в двух точках), а также пренебрегая зазорами в шарнирных соединениях (поскольку эти зазоры малы), предлагаемую кинематическую схему (рис. 1) можно представить, как абсолютно жесткую систему, а, следовательно, многомассовую модель ЭМС существующего СП можно заменить одномассовой (рис. 2):

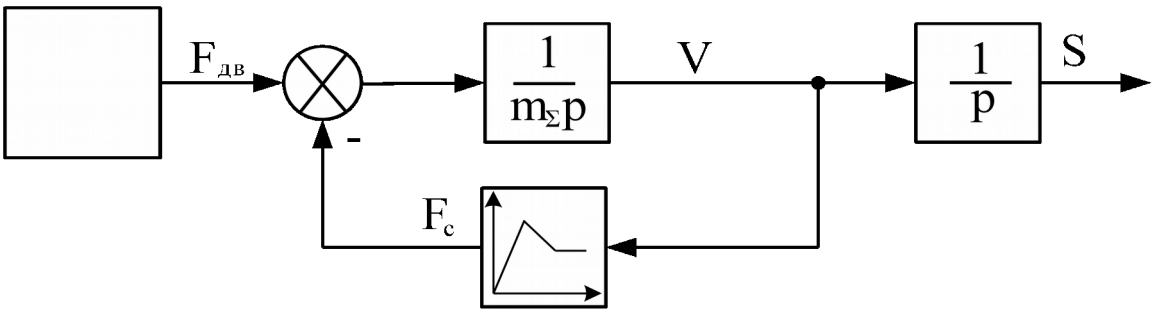


Рис. 2 – Структурная схема стрелочного перевода

В предыдущих работах [4, 5, 6] на основе уравнения Лагранжа [7] была получена система дифференциальных уравнений (1).

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{1}{\dfrac{\partial \Psi(i,x)}{\partial i}} \left[E - \dfrac{\partial \Psi(i,x)}{\partial x} V - ir \right]; \\ \partial \dfrac{\left(\int_0^i \Psi(i,x)\,di \right)}{\partial x} - \alpha V - F_C + 2F_{ПР} = m\dfrac{dV}{dt}; \\ \dfrac{dx}{dt} = V. \end{cases} \quad (1)$$

где i – ток в обмотке статора;

$\Psi(i,x)$ – потокосцепление статора;

E – напряжение источника питания;

r – сопротивление обмотки статора;

V – скорость движения якоря;

α – коэффициент трения между направляющей и якорем;

F_c – сила сопротивления;

$F_{пр}$ – сила пружины;

x – перемещение якоря.

Для идентификации параметров машины необходимо установить зависимости между потокосцеплением $\Psi(i,x)$, с одной стороны, обобщенными координатами и их производными с другой. Для этого был проведен комплекс цифровых экспериментов и определены эти зависимости. Для определения значения потокосцеплений был проведен расчет магнитного поля ЛД в двумерной постановке с использованием метода конечных элементов для плоскопараллельной задачи. По результатам анализа магнитного поля можно определить значения потокосцепления $\Psi(i,x)$ ЛД и значение электромагнитной силы.

Расчет осуществлялся с помощью подпрограммы, написанной в текстовом файле на языке Lua. Граничными областями такого расчета было положения якоря – от 152 до 0 мм. Распределения электромагнитной силы и потокосцепления в виде поверхностей представлены на рис. 3.

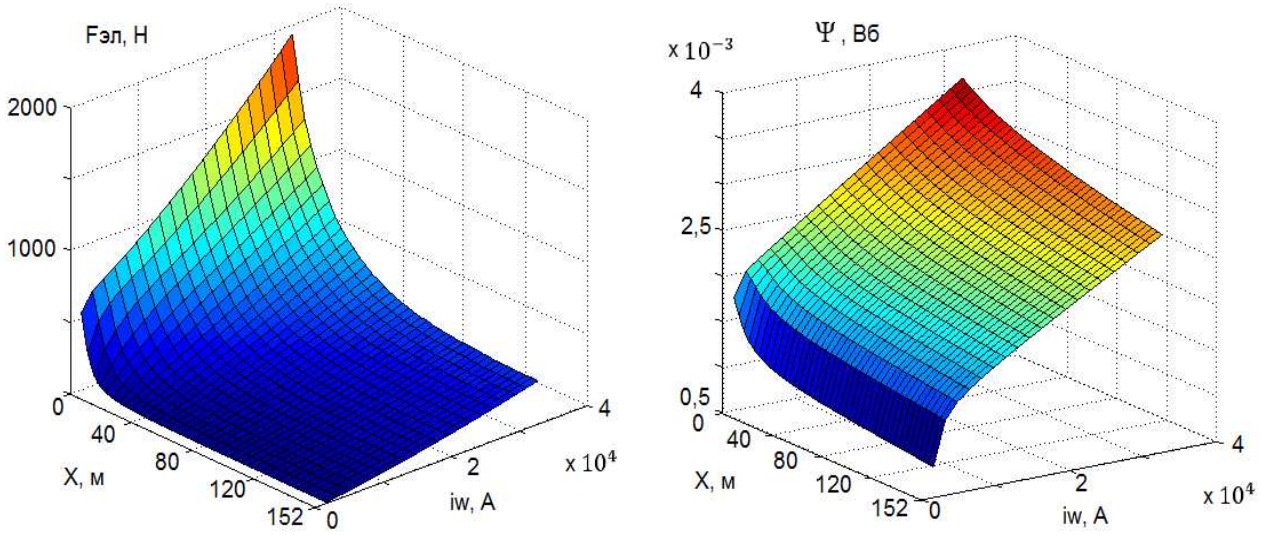


Рис. 3 Результаты цифрового моделирования а – электромагнитная сила, б – потокосцепление

На основании дифференциальных уравнений (1) и полученных в результате аппроксимации непрерывных зависимостей потокосцепления и электромагнитной силы (рис. 3) была построена структурная схема электропривода с ЛД, представленная на рис. 4.

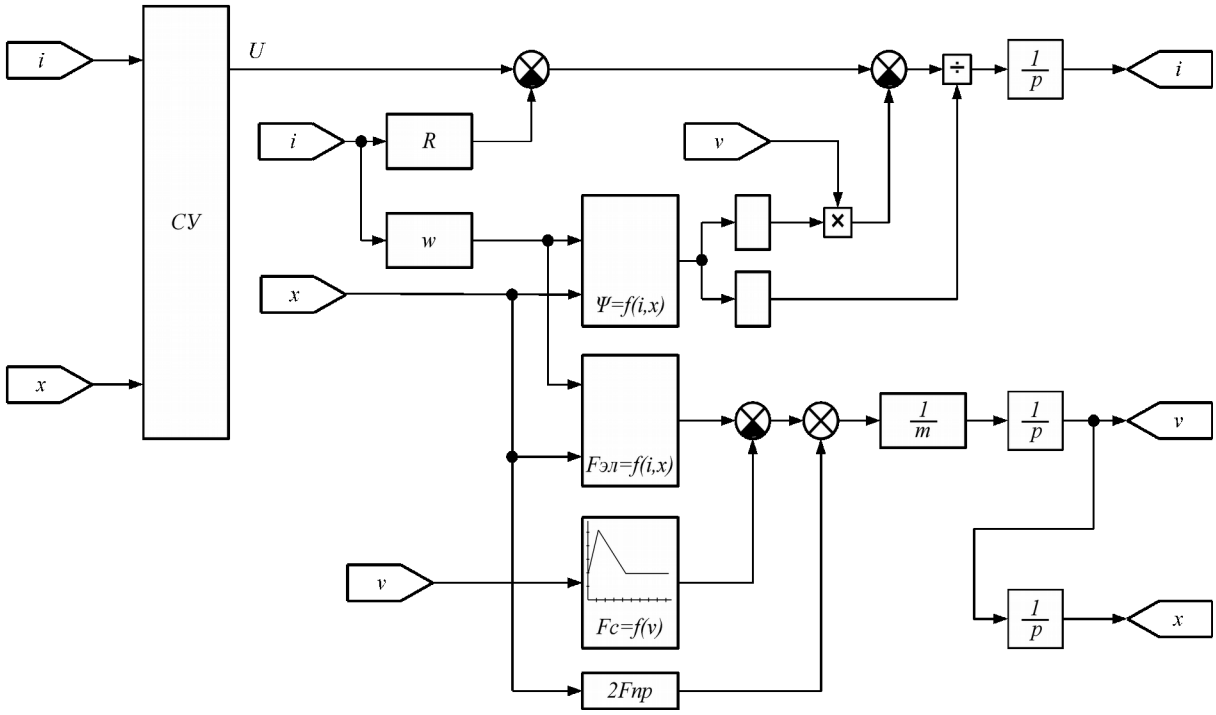


Рис. 4 – Структурная схема электропривода с ЛД

Усилие перевода стрелки зависит от веса перемещаемых частей стрелки, типа рельсов, места закрепления переводных тяг и коэффициента трения остряков о подушки. Все указанные величины, за исключением последней известны и для распространенных видов стрелок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные данные переводных масс

Тип рельса	Марка перевода	Длина остряка, м	Вес остряка, Н	Количество подушек
Р75	1/11	8,3	4150	16
Р65	1/9	7	3000	12
Р65	1/11	8,3	3600	16
Р65	1/18	15,5	6700	28
Р65	1/22	18,5	8000	34

Величина коэффициента трения может находиться в пределах от 0,05 до 0,8 и зависит от состояния стрелки - качества смазки стрелочных подушек, чистоты обработки их поверхностей, а также подошв остряков и других факторов. Средняя величина коэффициента трения по поверхности сталь-сталь приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициент трения

Трущиеся материалы	Коэффициент трения			
	покоя		скольжения	
	без смазки	со смазкой	без смазки	со смазкой
Сталь — сталь	0,8	0,5-0,4	0,15-0,3	0,05-0,18

На основе [1,2,3] при моделировании принята на рассмотрение характеристика трения, которая представлена на рис. 5.

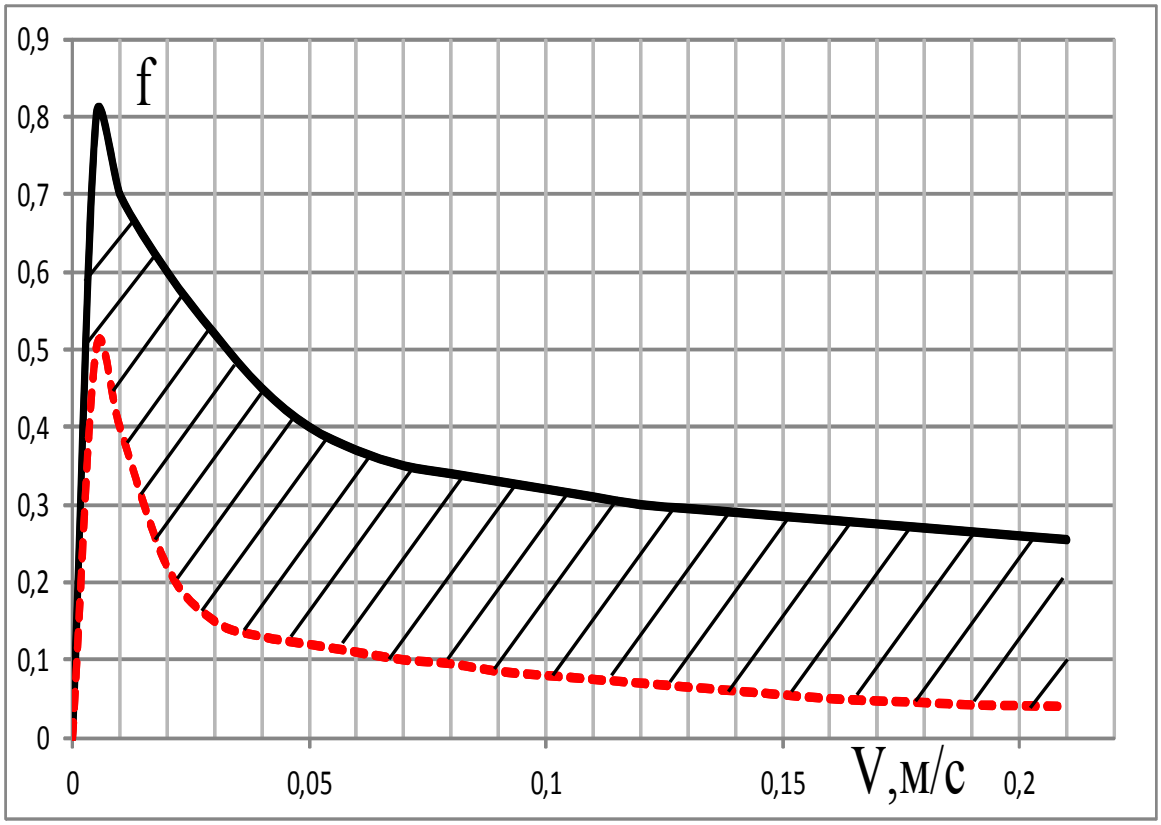


Рис. 5 – Область изменения коэффициента трения

При работе СП коэффициент трения контактирующих поверхностей может находится в заштрихованной области, ограниченной двумя кривыми.

На основании разработанной структурной схемы электропривода и с учетом рекомендаций приведенных в [2, 3], был проведен комплекс имитационных экспериментов по моделированию работы СП при минимальных, средних и максимальных значениях коэффициента трения. Исследования показали, что при определенных сочетаниях значений характеристики нагрузки в кинематической линии СП могут возникать колебания в интервале времени от 0,6 до 0,8 с от начала движения, что соответствует середине хода ЛД, величиной до 250 Н. С увеличением жесткости характеристики трения этот эффект снижается по времени его протекания с 0,22с при $\beta = 5$ Нс/м до 0,09с при $\beta = 7$ Нс/м. При максимальном значение жесткости (10 Нс/м) он вообще не наблюдается. Процессы показаны на рис. 6, 7, 8.

Выводы. Исследования показали, что при определенных сочетаниях значений характеристики нагрузки в кинематической линии СП могут возникать колебания электромагнитной силы ЛД в интервале времени от 0,7 до 0,8 с от начала движения, что соответствует середине хода ЛД, величиной до 250 Н. Кроме того, жёсткость характеристики трения влияет на время перевода стрелки. Полученные результаты показывают целесообразность применения системы управления, что позволит осуществлять регулировку скорости движения остряков и плавный их довод к рамному рельсу.

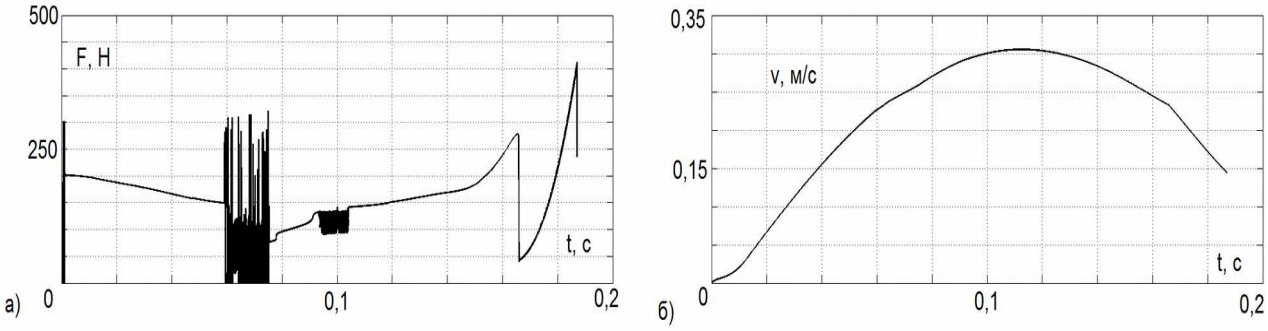


Рис. 6 – Графики изменения тяговой силы (а) и скорости (б) при жёсткости характеристики трения β = 5 Нс/м.

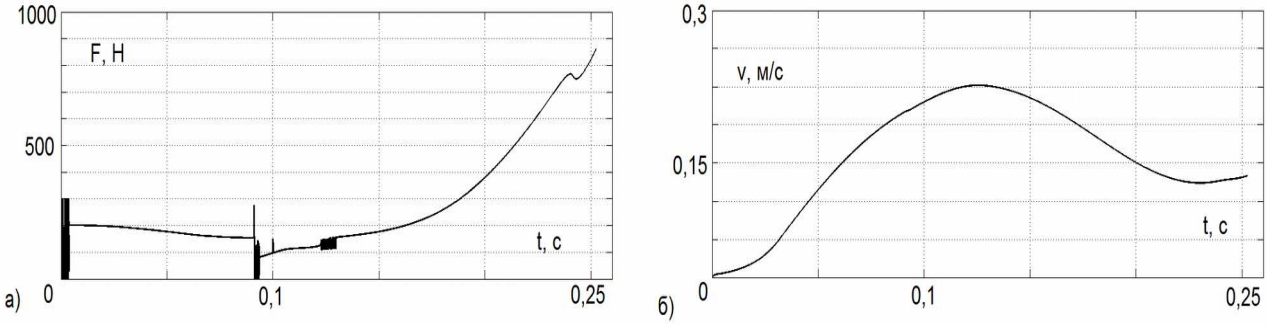


Рис. 7 – Графики изменения тяговой силы (а) и скорости (б) при жёсткости характеристики трения β = 7 Нс/м.

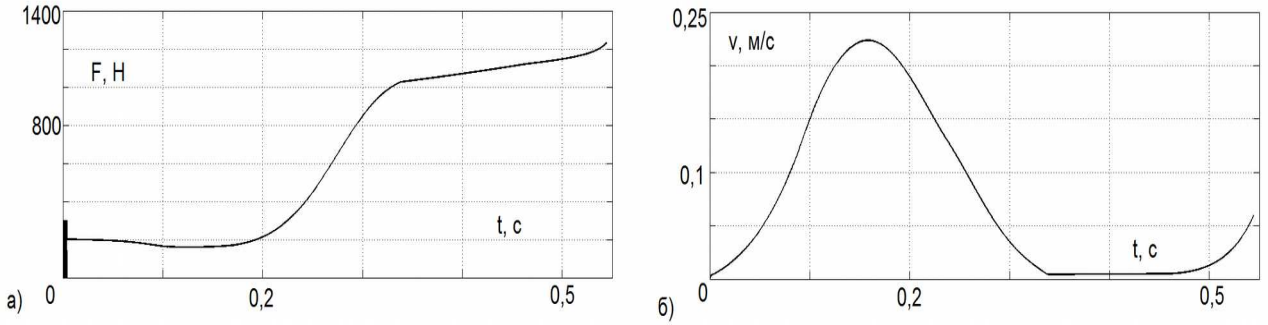


Рис. 8 – Графики изменения тяговой силы (а) и скорости (б) при жёсткости характеристики трения β = 10 Нс/м.

Список литературы: 1. Маслий А.С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Маслий Артем Сергеевич. Харьков, 2014. – 192 с. **2.** Смирнов В.В. Синтез системы управления регулированного электропривода стрелочного перевода как многомассовой электромеханической системы: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Смирнов Василий Васильевич. Харьков, 2012. – 219 с. **3.** Резников Ю.М. Стрелочные электроприводы электрической и горочной централизации / Резников Ю.М. Москва: Транспорт, 1975. - 152 с. **4.** Буряковский С.Г. Расчет тяговой характеристики линейного двигателя для стрелочного перевода / Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский, С.Г. Буряковский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: УкрДАЗТ. – 2015. – №1(110). – С.83-87. **5.** Buryakovskiy S. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor / Ar. Masliy, An. Masliy, B. Lyubarskiy, S. Buryakovskiy // Electrotechnic and computer systems. - O: Science and Technical. – 2015. – №19(95). – P.75-78. **6.** Буряковский С. Г. Математическое описание работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий, Б. Г. Любарский, // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ. – 2015. – № 3 (122). – С. 61 – 68. **7.** Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон – Москва: Издательство «Энергия», 1964. – с.528.

Bibliography: 1. Masliy A. Microprocessor switched-inductor sleeper type electric drive: dissertation: 05.09.03 / Masliy A. Kharkov, 2014. – 192 p. **2.** Smirnov V. Synthesis of control regulated electric turnouts like multimass electromechanical system: dissertation: 05.09.03 / Smirnov V. Kharkov, 2012. – 219 p. **3.** Reznikov Y. Electric drive switches of electric and hump centralization / Reznikov Y. Moscow: Transport, 1975. - 152 p. **4.** Buryakovskiy S. Calculation of the traction characteristics of the linear motor for turnouts / Ar. Masliy, An. Masliy, B. Lyubarskiy, S. Buryakovskiy // Information management systems for rail transport. – Kharkov. – 2015. – №1(110). – C.83-87. **5.** Buryakovskiy S. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor / Ar. Masliy, An. Masliy, B. Lyubarskiy, S. Buryakovskiy // Electrotechnic and computer systems. - O: Science and Technical. – 2015. – №19(95). – P.75-78. **6.** Buryakovskiy S. The mathematical model of the work of the electric drive turnouts based on a linear motor / Ar. Masliy, An. Masliy, B. Lyubarskiy, S. Buryakovskiy // Information management systems for rail transport. – Kharkov. – 2015. – № 3 (122). – p.61 – 68. **7.** David C. White. Electromechanical energy conversion. – New York, USA, – 1959 – 528 p.

Поступила (received) 24.08.2015

УДК 621.311.6

Ю. В. ЗАЧЕПА, канд. техн. наук, доц. КрНУ

УСЛОВИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ФОРМИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА

Введение. Известно, что для стабильной работы асинхронного генератора (АГ) в составе формируемого источника автономного электропитания (ФИАЭ) необходимо обеспечить два условия – наличие регулируемых источников реактивной и механической энергии. Первое осуществляется с помощью установки конденсаторных батарей, второе – посредством механического соединения АГ с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) или другим источников механической энергии (ветро-, гидротурбина и т.д.) [1]. Основной особенностью возбуждения АГ является то, что оно осуществляется по цепи нагрузки и каналу передачи реактивной энергии. Поэтому при определении перегрузочной способности генератора основное внимание уделяется выбору регулятора емкостного тока возбуждения и количества ступеней конденсаторных батарей [2]. В тоже время с целью минимизации массогабаритных показателей и повышения мобильности дизель-генераторные установки (ДГУ) характеризуются соизмеримостью мощностей ДВС и АГ, что также накладывает определенные условия на границы безаварийной работы таких систем генерации энергии.

Цель работы. Определение условий гарантированного возбуждения асинхронного генератора в зависимости от параметров дизельного двигателя внутреннего сгорания.

Материалы исследования. Относительное значение частоты вращения ротора АГ (частоты вращения ДВС), соответствующее данной частоте возбуждения определяется по выражению [3]:

$$\nu = \alpha(1+|s_г|), \tag{1}$$

где $\nu = \omega_д / \omega_{0д} = 1-\delta$ – относительное значение частоты вращения ротора АГ, выраженное через частоту вращения ДВС (при условии жесткой связи валов АГ и ДВС; $\omega_д$ – текущее значение частоты вращения ДВС; $\omega_{0д}$ – заданное значение частоты вращения ДВС; $\delta = \Delta\omega_д / \omega_{0д}$ – статизм ДВС.

Для стабилизации частоты вращения ДГУ оснащаются автоматическими регуляторами частоты вращения двигателя внутреннего сгорания (РЧД) непрямого действия, работающие по принципу Ползунова–Уатта [4]. Регуляторы такого типа имеют структуру изодромного регулятора с гибкой обратной связью и содержат следующие элементы: чувствительный, усилительный и вспомогательные элементы.

– *Сервомотор*. Уравнение движения поршня сервомотора устанавливает связь между перемещениями управляющего золотника ξ и поршня сервомотора λ:

$$T_c d\lambda / dt = \xi, \tag{2}$$

где T_c – постоянная времени сервомотора, характеризующая его инерционность.

Как видно из уравнения (2) сервомотор не может обеспечить устойчивую работу регулятора, т.к. при малейшем смещении золотника из среднего положения поршень перемещается в одно из своих крайних положений до упора. Поэтому сервомоторы в РЧД дополняются стабилизирующими обратными связями.

– *Механическая связь: муфта и золотник*. Связь между перемещениями муфты η и золотника ξ:

$$\xi = i_1 \eta, \tag{3}$$

где i_1 – передаточное отношение рычажного механизма от муфты к золотнику.

– *Механическая связь: сервомотор и рейка*. Связь между перемещениями штока сервомотора λ и рейкой топливного насоса χ:

$$\lambda = -i_2 \chi, \tag{4}$$

где i_2 – передаточное отношение между перемещениями рейки и штоком сервомотора.

Знак “–“ означает, что при положительном смещении поршня сервомотора (это соответствует увеличению частоты вращения при сбросе нагрузки) рейка переместится в сторону уменьшения подачи топлива.

– *Изодром*. Связь между перемещением золотника ξ и перемещением буксы ψ:

$$T_{из} d\psi / dt + \psi = T_{из} k_{из} d\lambda / dt, \tag{5}$$

где $T_{из}$ – постоянная времени изодрома; $k_{из}$ – коэффициент связи между перемещением поршня сервомотора и поршня изодрома.

© Ю.В. Зачепа, 2015

– *Чувствительный элемент*. В операторной форме уравнение движения элемента имеет вид:

$$T_p^2 p^2 \eta + T_k\ p\eta + \delta_z \eta = \theta_\omega \varphi - \theta_p \alpha_p, \tag{6}$$

где T_p – постоянная времени чувствительного элемента; T_k – постоянная времени катаракта, характеризующая силы гидравлического трения регулятора; δ_z – местная степень неравномерности; η – перемещение муфты чувствительного элемента; φ – скорость коленчатого вала дизеля; α_p – перемещение рейки рычага управления; θ_p – коэффициент усиления по настройке скоростного режима; θ_ω – коэффициент связи между перемещением муфты и частотой вращения.

Подобные РЧД обеспечивают стабилизацию частоты вращения ДВС на заданном уровне. Однако, как известно, ДВС характеризуются относительно небольшим диапазоном регулирования, что в свою очередь, накладывает определенные ограничения на границы самовозбуждения АГ.

Для АГ с конденсаторным возбуждением характерными являются нижняя и верхняя критические частоты вращения ротора. Так, для нижней границы скорости выражение (1) примет вид

$$\nu_{к.н.} = \alpha_{к.н.}(1 + |s_{к.н.}|), \tag{7}$$

где $\nu_{к.н.} = 1 - \delta_{крит}$; $\alpha_{к.н.} = \sqrt{X_c(2\sigma X_1)^{-1}(1 + \sigma - R_1^2 / X_1 X_c - (1 + \sigma - R_1^2 / X_1 X_c)^2 - 4\sigma)}$ – нижняя критическая частота самовозбуждения АГ; $\sigma = 1 - X_\mu^2 / X_1 X_2^{/}$ – коэффициент рассеяния АГ; $R_1 = C_1 R_1$ и $R_2 = C_1^2 R_2'$ – активные сопротивления обмоток статора и ротора; X_1, $X_2^{/}$, X_μ – реактивные сопротивления статорной, роторной цепей и цепи намагничивания АГ соответственно; X_c – реактивное сопротивление конденсаторов возбуждения; $R_н$ и $X_н$ – активное и реактивное сопротивления нагрузки на зажимах АГ; $|s_{к.н.}| = R_2^{/} g_1$ – скольжение АГ для $\alpha_{к.н}$ согласно [3]; $g_1 = qd/(q^2 + p^2)$ – активная проводимость цепи статора:

$$d = \alpha^2 R_н^2 + (\alpha^2 X_н - X_c)^2; \qquad q = R_н X_c^2 + R_1 d; \qquad p = \alpha(X_c(R_н^2 + X_н(\alpha^2 X_н - X_c) - X_1 d)).$$

Подставив соответствующие выражения в (7), получим

$$(1 - \delta_{крит})(R_н X_c^2 (1 + \delta_{крит})^2 + R_1 R_н^2) - R_н X_c^2 \sqrt{X_c / X_н}(1 + \delta_{крит})^2 - R_н^2 \sqrt{X_c / X_н}(R_1 - R_2^{/}) = 0. \tag{8}$$

или

$$a_3 \delta_{крит}^3 + a_2 \delta_{крит}^2 + a_1 \delta_{крит} + a_0 = 0, \tag{9}$$

где $a_0 = R_1 X_c^{-2} + R_н X_c^{-2}(R_1 - R_2)\sqrt{X_c / X_н} + \sqrt{X_c / X_н} - 1$; $a_1 = 2R_1 R_н X_c^{-2} + 2\sqrt{X_c / X_н} - 1$; $a_2 = 1 + \sqrt{X_c / X_н}$; $a_3 = 1$ – постоянные коэффициенты, определяемые через параметры АГ, емкостной системы возбуждения и нагрузки.

Аналитическое выражение для определения критического значения статизма дизельного двигателя может быть получено, например, с применением формулы Кардано. Для этого преобразуем исходное уравнение (9) к каноническому виду используя замену переменной $\delta_{крит} = y - \frac{a_2}{3a_3}$:

$$y^3 + py^2 + q = 0, \tag{10}$$

где $p = \frac{3a_1 - a_2^2}{3}$; $q = \frac{2a_2^3 - 9a_2 a_1 + 27a_0}{27}$.

Решение уравнения (10) определяется знаком выражения по определению дискриминанта:

$$D = [4(3a_1 - a_2)^3 + (2a_2^2 - 9a_1 a_2 + 27a_0)^2] / 2916. \tag{11}$$

В результате имеем: при $D \rangle 0$ – один вещественный корень; при $D = 0$ – два вещественных корня; при $D \langle 0$ – три вещественных корня.

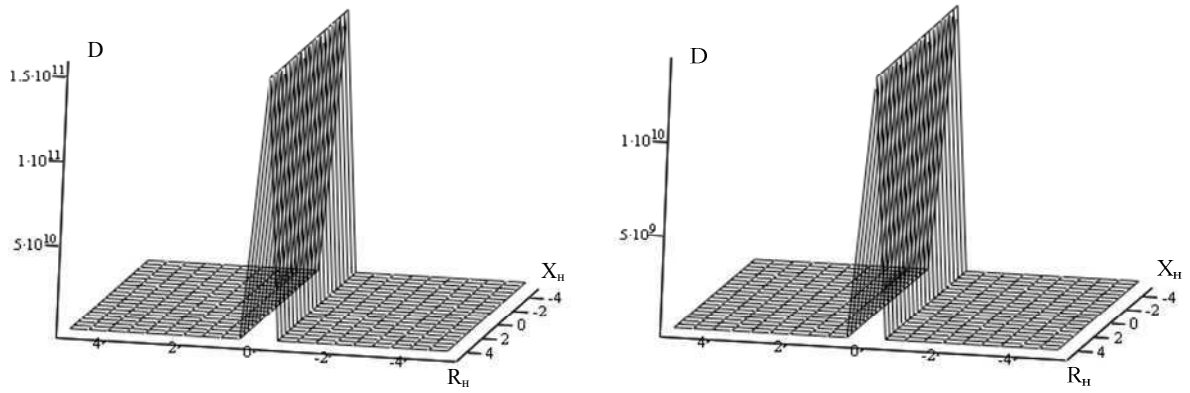
На рис. 1 представлены зависимости дискриминанта $D = f(R_н, X_н, X_c)$ в функции параметров нагрузки и емкости возбуждения. Ввиду того, что параметры X_c емкостной системы возбуждения определяются параметрами нагрузки, зависимость дискриминанта $D_{X_c = const} = f(R_н, X_н)$ выполним в функции нагрузки при опреде-

ленных значениях емкости возбуждения. Параметры последней принимались в диапазоне $[C_{\min};10C_{\min}]$, где $C_{\min}$ – минимально-допустимое значение емкости для возбуждения АГ на холостом ходу.

Как видно из рис. 1, значение дискриминанта D при любых параметрах нагрузки всегда больше нуля. Поэтому критическое значение статизма дизельного двигателя определяется как:

$$\delta_{крит} = \sqrt[3]{[-2a_2^3 + 9a_2a_1 - 27a_0 + \sqrt{(2a_2^3 - 9a_2a_1 + 27a_0)^2 + 4(3a_1 - a_2^2)^3}]/54} - a_2/3. \quad (12)$$

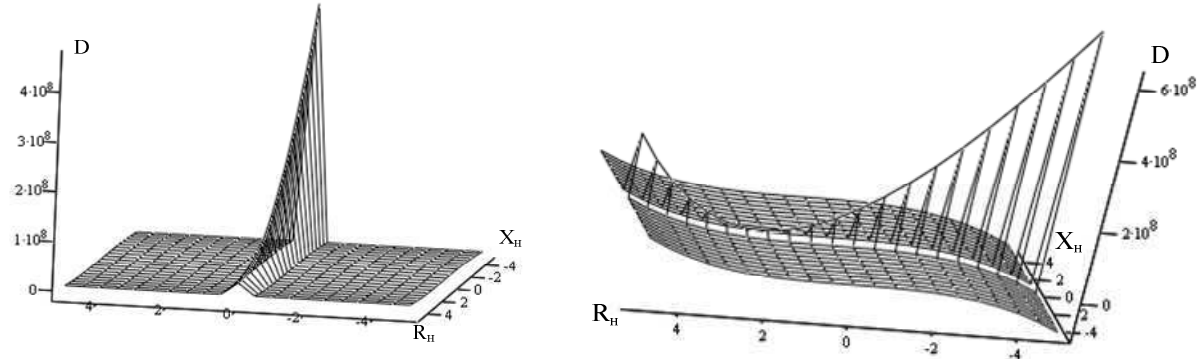
Адекватность определения перегрузочной способности АГ в зависимости от параметров дизельного двигателя устанавливалась путем сравнения расчетов значения относительного значения скорости $\nu_{к.н.}$ вращения генератора для нижней границы по предлагаемому методу и экспериментальным данным, приведенным в [3]. Ошибка расчетов составила 7,5 %.



а) б)

Рис. 1 Зависимость дискриминанта $D_{X_c=const} = f(R_н, X_н)$: а) при $C_{\min}$; б) при $10C_{\min}$.

Для более конкретного определения количества вещественных корней $\delta_{крит}$ и их расчетных формул были выполнены исследования зависимости дискриминанта $D = f(R_н, X_н, X_c)$ в функции параметров нагрузки и емкости возбуждения. В результате, дискриминант может принимать значение равное нулю $D = 0$ при параметрах емкостной системы возбуждения $C_\Sigma \geq 30C_{\min}$ (рис. 2, а), а значения дискриминанта меньше нуля $D\langle 0$ возможно при $C_\Sigma \geq 150C_{\min}$ (рис. 2, б) и отрицательного значении $R_н$, что не соответствует реальным параметрам ДГУ и условиям ее работы.



а) б)

Рис. 2 Зависимость дискриминанта $D_{X_c=const} = f(R_н, X_н)$: а) при $30C_{\min}$; б) при $150C_{\min}$.

На рис. 3 представлены характеристики ДГУ с РЧД, параметры которого рассчитаны на основе предлагаемого метода. Исследования проводились на математической модели, приведенной в [2]. При моделировании режимов работы использовался ДВС, применяемый в дизель-генераторных электростанциях типа DALGAKIRAN DJ4000 с параметрами, приведенными в табл. 1. В качестве источника электрической энергии использовался асинхронный двигатель типа АИР120А4, работающий в генераторном режиме с емкостным са-

Таблица 1 – Технические характеристики ДГУ

Модель	DJ 4000 DG-ECS
Тип	одноцилиндровый с воздушным охлаждении
Фирма	Genpower
Максимальная мощность	7.0 кВА
Частота вращения	3000 об/мин
Объем	418 см^3
Запас хода – емкость бака	240 г/кВт – 16 л

мовозбуждением $C = 30$ мкФ. На шестой секунде после запуска ДВС производилось подключение АГ к выходному валу посредством соединительной муфты. В момент времени $t_{on} = 7$ с симулировался режим подключения к зажимам генератора RLC-нагрузки, а в момент времени $t_{off} = 12$ с – нагрузка отключалась. Характеристики на рис. 3 представлены в следующих масштабах: $\omega_z = \omega_{rms} = 1/8$; $M_{kr} = 1/2$; $M_G = 1/1$, $U_g = 1/30$, $f_z = f_{rms} = 1/10$. Анализ полученных характеристик показал, что РЧД полностью компенсирует статическую ошибку регулирование по частоте вращения ДВС и стабилизирует частоту f_{rms} генерированного напряжения на заданном уровне. Характеристики АГ приведены без подключения дополнительной емкости, необходимой для стабилизации амплитуды генерируемого напряжения, с целью наглядной демонстрации соблюдения условия гарантированного возбуждения АГ согласно предлагаемого метода.

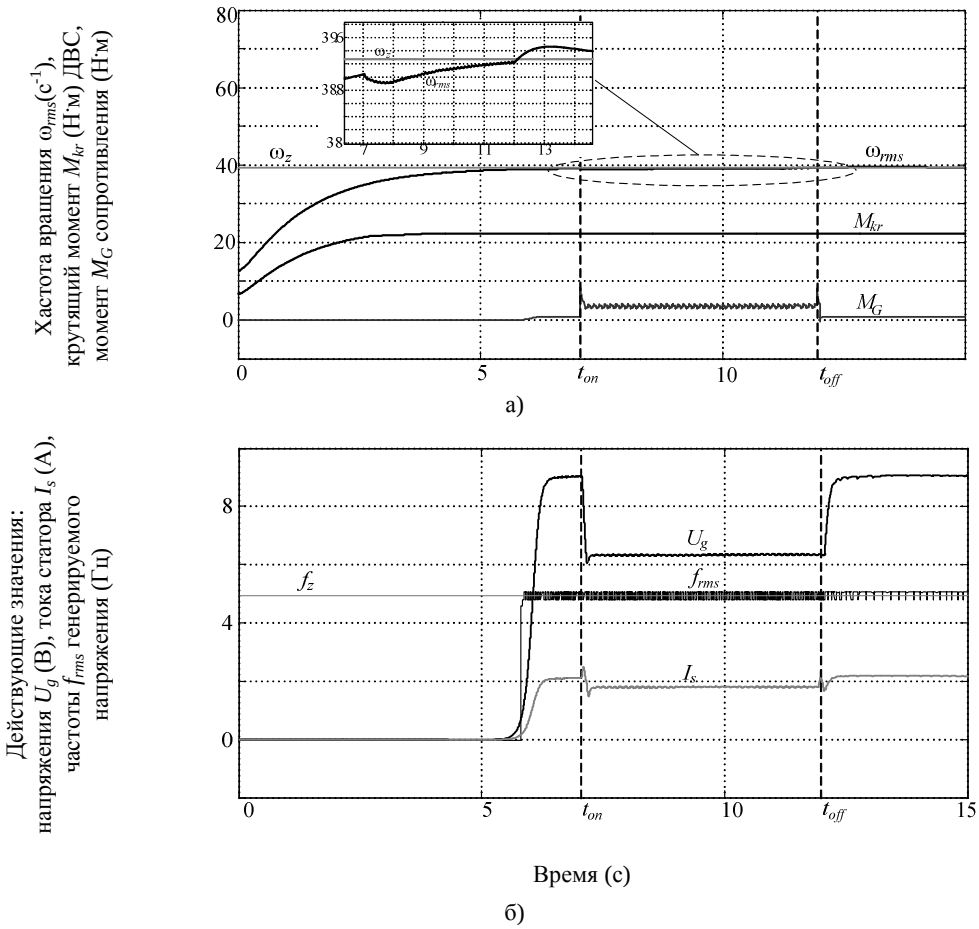


Рис. 3 Динамические характеристики ДГУ: а) характеристики ДВС; б) характеристики АГ с RLC-нагрузкой.

Выводы. Полученное в работе аналитическое выражение по определению статической ошибки регулирования частоты вращения дизельного двигателя в функции параметров асинхронного генератора и его емкостной системы возбуждения позволяет определить минимально-допустимое значение частоты вращения дизеля, которое должен обеспечить соответствующий регулятор, для предотвращения срыва генерации при подключении нагрузки.

Список литературы:. **1.** *Zobaa A. F.* Handbook of Renewable Energy Technology / *A. F. Zobaa, R. C. Bansal.* – Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd, 2011. – 851 p. **2.** *Zagirnyak M.* Estimation of induction generator overload capacity under connected direct current consumers / *M. Zagirnyak, Iu. Zachepa, V. Chenchevoy* // Acta Technica. – Praga: Institute of Thermomechanics AS CR. – Vol. 59(2014), № 2. – PP 149–169. **3.** *Кашкалов В. И.* Конденсаторное торможение асинхронных двигателей / *В. И. Кашкалов* – М.: Энергия, 1977. – 121 с. **4.** *Грунауэр А. А.* Применение ЭВМ для изучения динамики САР ДВС: учеб. пособие / *А. А. Грунауэр, И. Д. Долгих.* – К: УМКВО, 1989. – 285 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zobaa, A. F. and R. C. Bansal. *Handbook of Renewable Energy Technology*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd, 2011. Print. **2.** Zagirnyak, M., Iu. Zachepa and V. Chenchevoy. "Estimation of induction generator overload capacity under connected direct current consumers." *Acta Technica. – Praga: Institute of Thermomechanics AS CR.:* Vol. 59(2014), № 2. 149–169. Print. **3.** Kashkalov, V. I. *Kondensatornoe tormogenie asinhronnyh dvigateley.* Moskow: Jenergija, 1977. Print. **4.** Granujer, A. A. and I. D. Dolgih. *Primenenie EVM dlja izuchenija dinamiki SAR DVS: ucheb. posobie.* Kyiv: UMKVO, 1989. Print.

Поступила (received) 14.07.2015

УДК 621.313.3.072

В. Ю. НОЖЕНКО, асп. КрНУ, Кременчуг;
Д. И. РОДЬКИН, д-р техн. наук, проф. КрНУ, Кременчуг;
В. В. ЧЕНЧЕВОЙ, ассист. КрНУ, Кременчуг

ОСОБЕННОСТИ ПУСКА ЗАРЕЗОНАНСНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН С ДЕБАЛАНСНЫМИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯМИ

Введение. Начиная с 60-х годов XX столетия и до настоящего времени зарезонансные вибрационные машины (ВМ) с дебалансными вибровозбудителями широко применяются во многих производственных процессах по сравнению с другими виброустановками, благодаря простоте конструкции, низкой стоимости и высокой стабильности работы в установившемся режиме при изменении нагрузки [1, 2].

Однако, несмотря на наличие преимуществ по сравнению с другими виброустановками и огромной практики использования, ВМ, работающие в зарезонансном режиме характеризуются рядом недостатков, связанных с прохождением резонансной зоны. Как известно из [1], в процессе пуска при совпадении частоты вынуждающих колебаний с собственной частотой рабочего органа ВМ, т.е. при прохождении через резонансную зону, возникают интенсивные колебания, амплитуда которых во много раз превышает амплитуду в рабочем режиме. Данное явление приводит к значительным динамическим нагрузкам на элементы конструкции ВМ, возможному «застреванию» двигателей на числе оборотов вблизи резонансной частоты, увеличению тока в обмотках статора, возрастанию амплитуды колебаний без заметного изменения частоты при увеличении мощности и быстрый переход резонансной частоты, сопровождающийся резким уменьшением амплитуды, т.е. эффектом Зоммерфельда [3, 4].

Анализ последних достижений и литературы. Решением данной проблемы занимались многие ученые, что привело к формированию методов уменьшения колебаний ВМ зарезонансного типа таких, как использование двигателей с повышенным пусковым моментом [1]; применение управляемых динамических гасителей колебаний [5]; использование вибровозбудителей с автоматически или вручную регулируемым статическим моментом дебалансов [1]; использование форсированного пуска с помощью последовательно включаемых с обмотками статора двигателя конденсаторов [6] и др. Однако вышеперечисленные методы имеют ряд недостатков и не нашли широкого применения, поэтому возникает необходимость поиска возможных способов снижения уровня амплитуды резонансных колебаний и ее негативного влияния на вибрационную систему с помощью современных систем электропривода (ЭП).

Целью статьи является исследование пуска и прохождения резонансной зоны электропривода зарезонансных вибрационных машин с двухвальными дебалансными вибровозбудителями.

Материалы и результаты исследований. В качестве ВМ рассмотрена вибрационная площадка вертикально направленного действия с двухвальными дебалансными вибровозбудителями, которая предназначена для уплотнения жестких бетонных смесей в форме [2].

Исследования пуска и прохождения резонансной зоны проводились с помощью математической модели ВМ, состоящей из двух частей: электроприводной и механической. Электроприводная часть, включающая две асинхронных машины с короткозамкнутым ротором, описана в трехфазной системе координат согласно [7, 8]. Модель механической части ВМ выполнялся на основании рис.1.

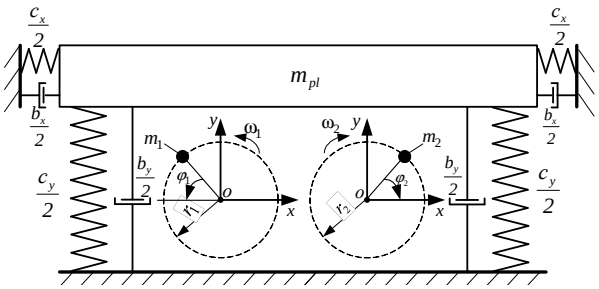


Рис. 1 – Схема механической части вибромашины

Перемещение ВМ направленного действия и равновесия моментов на валу двигателей можно представить следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
m_{pl}x'' + b_x x' + c_x x &= m_1 r_1\left(\varphi_1'' \sin\varphi_1 + \varphi_1'^2 \cos\varphi_1\right) - m_2 r_2\left(\varphi_2'' \sin\varphi_2 + \varphi_2'^2 \cos\varphi_2\right);\\
m_{pl}y'' + b_y y' + c_y y &= m_1 r_1\left(\varphi_1'' \cos\varphi_1 - \varphi_1'^2 \sin\varphi_1\right) + m_2 r_2\left(\varphi_2'' \cos\varphi_2 - \varphi_2'^2 \sin\varphi_2\right);\\
J_{\Sigma 1}\frac{d\omega_1}{dt} &= M_{em1} - M_{mex1} + M_{vibr1};\\
J_{\Sigma 2}\frac{d\omega_2}{dt} &= M_{em2} - M_{mex2} + M_{vibr2},
\end{aligned} \qquad (1)$$

где x, y – перемещение рабочего органа ВМ вдоль оси X и Y (виброперемещение), соответственно; x', y' – скорость ВМ по оси X и Y (виброскорость), соответственно; x'', y'' – ускорение ВМ по оси X и Y (виброускорение), соответственно; m_{pl} – масса ВМ с формой и бетонной смесью; $c_x = c_y = c_0$ – коэффициенты

© В. Ю. Ноженко, Д. И. Родькин, В. В. Ченчевой 2015

горизонтальной и вертикальной жесткости опор ВМ, соответственно; $b_x = b_y = b_0$ – коэффициенты горизонтального и вертикального демпфирования, соответственно; $m_1 = m_2 = m_0$ – массы первого и второго дебалансов, соответственно; $r_1 = r_2 = r$ – расстояние первого и второго дебаланса от оси вращения, соответственно; $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ – угловые скорости вращения первого и второго дебалансов, соответственно; φ_1, φ_2 – углы поворота дебалансных масс; $J_{\Sigma 1}$, $J_{\Sigma 2}$ – приведенный момент инерции первого и второго двигателя, соответственно; M_{em1}, M_{em2} – электромагнитный момент на валу первого и второго двигателя, соответственно; M_{mex1}, M_{mex2} – момент сил сопротивления вращению; M_{vibr1}, M_{vibr2} – вибрационный момент на валу первого и второго двигателя, соответственно.

Момент сил сопротивления вращению двигателей обусловленный преимущественно сопротивлением в подшипниках вибровозбудителей и определяется согласно выражения [4]:

$$M_{mex1} = M_{mex2} = 0{,}5\, f_{tr} m r \omega^2 d\,, \tag{2}$$

где f_{tr} – приведенный коэффициент трения в подшипниках; d – диаметр внутреннего кольца подшипника.

Вибрационный момент на валу первого и второго двигателя:

$$M_{vibr1} = m_1 r_1 \left(x'' \sin\varphi_1 + y'' \cos\varphi_1 + g\cos\varphi_1\right); \tag{3}$$

$$M_{vibr2} = m_2 r_2 \left(x'' \sin\varphi_2 + y'' \cos\varphi_2 + g\cos\varphi_2\right), \tag{4}$$

где $g = 9{,}8$ м/с^2 – ускорение свободного падения.

Первое и второе уравнения системы (1) представляют собой уравнения сил при горизонтальном и вертикальном перемещении вибросистемы. В левой части уравнений приведены инерционная, вязкая и упругая силы сопротивления перемещению ВМ, а в правой – вертикальные вынуждающие силы, создаваемые при вращении первого и второго дебалансов.

Третье и четвертое уравнения системы (1) описывают равновесие моментов на валу первого и второго двигателя соответственно.

С целью детализации и уяснения отдельных положений построения математической модели механической части ВМ на рис. 2 представлена ее блок–схема, полученная на основании выражений (1)–(4).

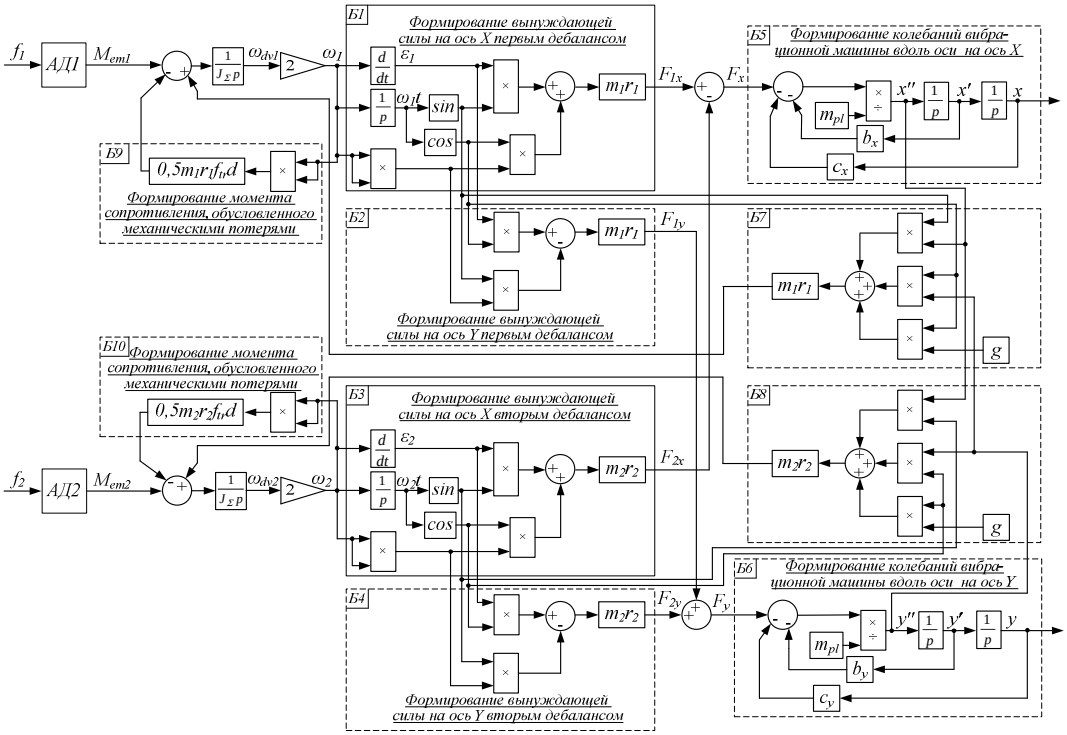


Рис. 2 – Блок-схема математической модели механической части вибрационной машины

В блоках Б1–Б4 (рис. 2) осуществляется формирование вынуждающей силы первым и вторым дебалансами на оси X и Y в соответствии с правыми частями первого и второго уравнения системы (1). Блоки Б5–Б6 реализуют формирование колебаний ВМ вдоль оси X и Y в соответствии с левыми частями первого и второго уравнения системы (1). В блоках Б7–Б8 осуществляется формирование вибрационного момента на валу первого и второго двигателей в соответствии с выражениями (3), (4). Блоки Б9–Б10 реализуют моменты сил сопротивления вращению двигателей, обусловленные преимущественно сопротивлением в подшипниках вибровозбудителей согласно с выражением (2).

Исходными данными для математической модели колебательной системы были параметры промышленной ВМ: $m_{pl} = 9000$ кг; $c_0 = 1{,}268 \cdot 10^8$ Н/м; $b_0 = 30600$ Нс/м; $r_1 = r_2 = 0{,}1$ м; $m_1 = m_2 = 18$ кг; $t_{tr} = 0{,}005$; $d = 0{,}04$ м. Паспортные данные АД с короткозамкнутым ротором серии 4А180М4УЗ: $P_n = 30$ кВт; $n_0 = 1500$ об/мин; $U_n = 220$ В; $R_1 = 0{,}16$ Ом; $R_2 = 0{,}078$ Ом; $X_1 = 0{,}362$ Ом; $X_2 = 0{,}513$ Ом; $X_\mu = 15{,}34$ Ом; $I_n = 56{,}12$ А; $\lambda_p = 1{,}4$; $\lambda_m = 1$; $\lambda_k = 2{,}3$; $S_n = 1{,}9$ %; $S_k = 14$ %; $\eta = 91$ %; $J_d = 0{,}2245$ кг·м^2 [8].

Как известно из [1–3], на процесс пуска зарезонансных ВМ значительное влияние оказывает выбор мощности приводных двигателей, поскольку изменение угловой скорости дебалансных валов ВМ взаимно связано с изменением амплитуды колебаний и подводимой мощности. Для анализа этого влияния в работе проведены исследования при использовании АД мощностью выше и ниже исходной, а именно: АД серии 4А200L4 мощностью 45 кВт, 4А180S4 – 22 кВт, 4А132М4 – 11 кВт.

В результате моделирования получены кривые (рис. 3–6), где на рис. 3, 4 изображены перемещение ВМ и вибрационный момент двигателей мощностью 30 кВт, а на рис. 5, 6 – момент и угловая скорость вращения двигателей разных мощностей.

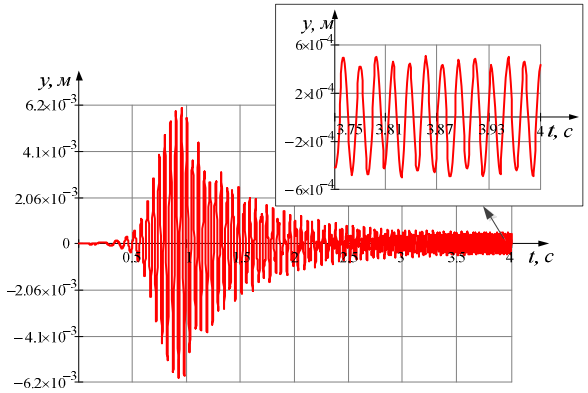


Рис. 3 – Кривая перемещения ВМ при использовании двигателей мощностью 30 кВт

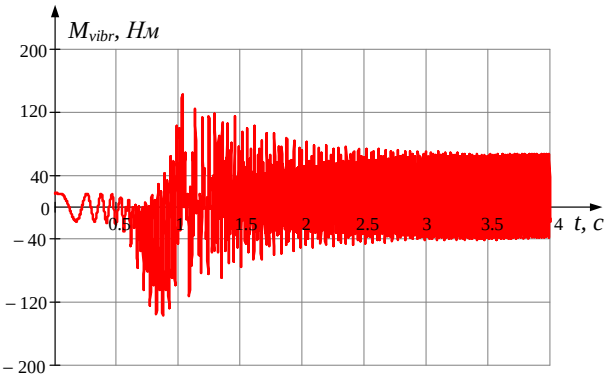


Рис. 4 – Кривая вибрационного момента при использовании двигателей мощностью 30 кВт

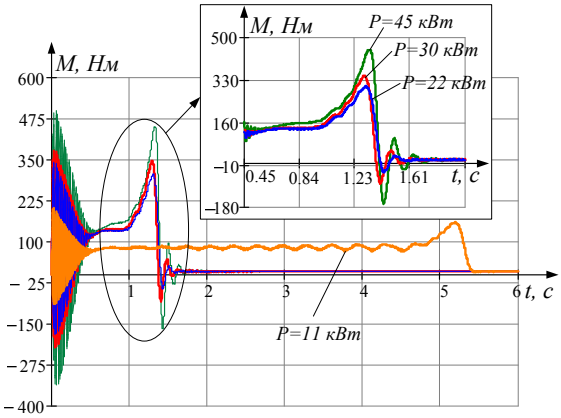


Рис. 5 – Кривые моментов двигателей разной мощности

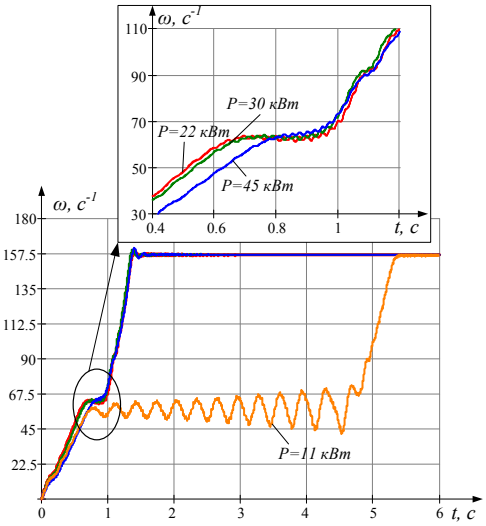


Рис. 6 – Кривые угловых скоростей вращения двигателей разной мощности

Для сравнения полученных результатов, в табл. 1 приведены значения исследуемых параметров вибросистемы при использовании двигателей разной мощности, куда включены: y_{max} – максимальное значение амплитуды колебаний рабочего органа ВМ; t_{zast} – время «застревания» роторов приводных двигателей в резонансной зоне; M_{rez} – момент двигателей во время прохождения резонансной зоны; M_{vibr} – вибрационный момент при прохождении резонансной зоны; t_{pusk} – время пуска ЭП ВМ.

Анализ полученных результатов показал, что использование приводных АД с большей мощностью способствует увеличению темпа роста угловой скорости дебалансных валов при пуске и позволяет быстрее пройти зону резонанса с меньшей амплитудой колебаний рабочего органа ВМ и вибрационного момента.

Таблица 1 – Параметры пусковых процессов вибросистемы при использовании двигателей разной мощности

Двигатель	y_{max}, м	t_{zast}, с	M_{rez}, Нм	M_{vibr}, Нм	t_{pusk}, с
4А200L4	$5{,}45\cdot10^{-3}$	0,136	159,06	127,66	1,466
4А180М4	$6{,}07\cdot10^{-3}$	0,19	139,16	136,66	1,435
4А180S4	$6{,}23\cdot10^{-3}$	0,277	136,19	139,1	1,496
4А132М4	$6{,}66\cdot10^{-3}$	4,027	90,325	179,8	5,382

При применении двигателей меньшей мощности темп роста угловой скорости в резонансной зоне замедляется, что приводит к затяжному процессу пуска ВМ и является причиной возрастания амплитуды колебаний, «застревания» роторов двигателей (рис. 6). Так, на рис. 6 видно, что при использовании мощности АД 11 кВт, наблюдается «застревание» роторов двигателей в резонансной зоне, более 4 с.

По этой причине в используемых на практике зарезонансных ВМ устанавливают электродвигатели со значительным резервом мощности, заранее осознавая, что в установившемся режиме они будут работать с существенной недогрузкой. Кроме этого, ухудшаются энергетические показатели – снижаются КПД и коэффициент мощности, что служит причиной нерационального расходования электроэнергии.

Помимо мощности приводных двигателей, на процесс пуска ВМ существенное воздействие оказывают конструктивно-технологические параметры самой ВМ, от которых зависят такие показатели, характеризующие переходные процессы, как изменение скорости дебалансных валов, величина их углового ускорения в момент прохождения резонанса, значение максимальной амплитуды и резонансной частоты. Так, в процессе эксплуатации ВМ возможны изменения массы обрабатываемой среды, статического момента дебалансов и т.д., что влечет за собой изменение конструктивно-технологических параметров и, соответственно, условий пуска. Возможны такие сочетания параметров ВМ, при которых амплитуда колебаний будет настолько велика, что роторы приводных двигателей, «застряв» на резонансной частоте, так и не смогут выйти на номинальный режим.

Для выявления закономерностей влияния конструктивно-технологических параметров ВМ с двухвальными дебалансными вибровозбудителями на процесс пуска и прохождение резонансной зоны был проведен эксперимент на базе математической модели. При проведении эксперимента реализован композиционный ротатабельный план второго порядка (РЦКП) [9, 10]. Уровни варьирования конструкционных параметров ВМ (m_{pl}, m_0, c_0) в натуральном и кодированном виде приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования факторов					Интервал варьирования
		-1,68179	-1	0	+1	+1,68179	
Масса вибромашины, кг	m_{pl}	5000	6621,59	9000	11378,4	13000	2378,4
Масса дебалансов, кг	m_0	14	15,621	18	20,378	22	2,379
Коэффициент жесткости, Н/м	c_0	$1{,}036\cdot10^8$	$1{,}13\cdot10^8$	$1{,}268\cdot10^8$	$1{,}406\cdot10^8$	$1{,}5\cdot10^8$	$0{,}1379\cdot10^8$

Функцией отклика являлась величина максимальной амплитуды колебаний рабочего органа ВМ (y_{max}), время «застревания» роторов приводных двигателей (t_{zast}) и момент двигателей (M_{rez}) во время прохождения резонансной зоны.

При проведении факторного эксперимента согласно требованиям ротатабельного планирования, в матрицу включали три переменных на двух уровнях (восемь точек), шесть «звездных точек» с координатами ±1,68179; 0; 0 и одна точка в центре эксперимента (табл. 3). В матрице планирования основной уровень обозначен как «0», нижний уровень – знаком «-1», верхний уровень – знаком «+1».

Общее число опытов: $N = 2^k + 2k + k_0 = 15$, где $k = 3$ – число факторов; $2^k = 8$ – полный факторный эксперимент (ядро плана), представленный в строках 1…8 матрицы планирования; $2k = 6$ – звездные точки, представленные в строках 9…14 матрицы планирования (величина звездного плеча $\alpha = 1{,}68179$); $k_0 = 1$ – опыты в центре плана.

По значениям выходных параметров, полученных в результате реализации опытов, проводился расчет коэффициентов регрессий.

В результате математической обработки результатов эксперимента были получены следующие уравнения регрессий без учета незначимых коэффициентов:

– максимальная амплитуда колебаний рабочего органа ВМ при прохождении резонансной зоны:

$$y_{max} = a_0 - a_1 m_{pl} + a_2 m_0, \quad (5)$$

где $a_0 = 59{,}734\cdot10^{-4}$, $a_1 = 21{,}6\cdot10^{-4}$, $a_2 = 10{,}139\cdot10^{-4}$ – коэффициенты регрессионной модели;

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента

№ п/п	m_{pl}, кг	m_0, кг	c_0, Н/м	m_{pl}, кг	m_0, кг	c_0, Н/м	y_{max}, м	t_{zast}, с	M_{rez}, Нм
1	1	1	-1	11378,4	20,3784	$1{,}1301\cdot10^8$	$3{,}99\cdot10^{-3}$	0,035	130,91
2	-1	1	-1	6621,59	20,3784	$1{,}1301\cdot10^8$	$9\cdot10^{-3}$	3,793	142,7
3	1	1	1	11378,4	20,3784	$1{,}4059\cdot10^8$	$4{,}8\cdot10^{-3}$	0,124	135,75
4	1	-1	1	11378,4	15,621	$1{,}4059\cdot10^8$	$2{,}76\cdot10^{-3}$	0	152,01
5	-1	1	1	6621,59	20,3784	$1{,}4059\cdot10^8$	$8{,}8\cdot10^{-3}$	4,121	152,02
6	-1	-1	1	6621,59	15,621	$1{,}4059\cdot10^8$	$7{,}8\cdot10^{-3}$	1,596	157,71
7	-1	-1	-1	6621,59	15,621	$1{,}1301\cdot10^8$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	1,127	144,74
8	1	-1	-1	11378,4	15,621	$1{,}1301\cdot10^8$	$2{,}5\cdot10^{-3}$	0	150,9
9	0	0	1,68179	9000	18	$1{,}5\cdot10^8$	$7{,}5\cdot10^{-3}$	1,191	148,84
10	0	0	-1,68179	9000	18	$1{,}036\cdot10^8$	$4{,}5\cdot10^{-3}$	0,047	139,16
11	-1,68179	0	0	5000	18	$1{,}268\cdot10^8$	$8{,}5\cdot10^{-3}$	3,774	157,03
12	1,68179	0	0	13000	18	$1{,}268\cdot10^8$	$2{,}7\cdot10^{-3}$	0	132,84
13	0	1,68179	0	9000	22	$1{,}268\cdot10^8$	$8{,}1\cdot10^{-3}$	2,71	143,49
14	0	-1,68179	0	9000	14	$1{,}268\cdot10^8$	$3{,}036\cdot10^{-3}$	0	150,85
15	0	0	0	9000	18	$1{,}268\cdot10^8$	$6\cdot10^{-3}$	0,19	139,16

– время «застревания» роторов приводных двигателей в резонансной зоне без учета незначимых коэффициентов:

$$t_{zast} = d_0 - d_1 m_{pl} + d_2 m_0 + d_3 c_0 + d_4 m_{pl}^2 - d_5 m_{pl} m_0 + d_6 m_0^2, \quad (6)$$

где $d_0 = 0{,}1904$, $d_1 = 1{,}232$, $d_2 = 0{,}7255$, $d_3 = 0{,}206$, $d_4 = 0{,}599$, $d_5 = 0{,}629$, $d_6 = 0{,}411$ – коэффициенты регрессионной модели;

– момент двигателя при прохождении резонансной зоны без учета незначимых коэффициентов:

$$M_{rez} = q_0 - q_1 m_{pl} - q_2 m_0 + q_3 c_0 - q_4 m_{pl} m_0 + q_5 m_0^2, \quad (7)$$

где $q_0 = 139{,}15$, $q_1 = 4{,}999$, $q_2 = 4{,}127$, $q_3 = 3{,}2599$, $q_4 = 3{,}565$, $q_5 = 2{,}855$ – коэффициенты регрессионной модели.

Коэффициенты, стоящие перед факторами, говорят о значимости входных параметров и влиянии их на исследуемые отклики, а также их парное взаимодействие на выходную величину. Коэффициент детерминации для y_{max} составляет $R^2 = 0{,}923$, для t_{zast} – $R^2 = 0{,}989$, для M_{rez} – $R^2 = 0{,}912$, что свидетельствует об адекватности полученных регрессионных моделей реальным данным.

Данные регрессионные модели второго порядка позволяют получить информацию о влиянии варьируемых факторов и их взаимодействий на выходные величины. Эти модели можно использовать как для оптимизации процесса пуска ВМ, так и для отыскания таких значений варьируемых факторов внутри диапазона их варьирования, для которых значения качественных и количественных характеристик процесса прохождения резонансной зоны оказываются максимальными или минимальными.

Для определения наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на y_{max}, t_{zast}, M_{rez}, использовались стандартизированные Парето-карты [10]. Так, согласно Парето-карты, на величину y_{max} при прохождении резонансной зоны наиболее существенное влияние оказывают m_{pl} и m_0, т.к. имеют 95 % порогового уровня значимости. Менее влиятельным фактором является c_0, а также парные взаимодействия факторов и их квадратичные зависимости.

На t_{zast} наибольшую значимость оказывают все исходные факторы: m_{pl}, m_0, c_0, а также квадратичные зависимости m_{pl}^2, m_0^2 и парное взаимодействие $m_{pl} m_0$. Менее влиятельными являются квадратичная зависимость c_0 и его взаимодействие с двумя другими факторами.

Значение M_{rez} при прохождении резонансной зоны зависит от всех исходных факторов: m_{pl}, m_0, c_0, и парного взаимодействия $m_{pl} m_0$.

Обработка полученных зависимостей с помощью компьютерной программы позволила получить поверхности откликов (рис. 7–9), отображающие влияние наиболее значимых факторов и позволяющие увидеть не только влияние отдельного фактора на выходную величину, но и их парное взаимодействие.

Анализ рис. 7, 8 при варьировании параметров m_{pl} и m_0 показал, что уменьшение максимальной амплитуды колебаний рабочего органа ВМ и время «застревания» роторов приводных двигателей во время прохождения резонансной зоны достигается при увеличении массы ВМ и уменьшении массы дебалансов.

Для уменьшения момента двигателя при прохождении резонансной зоны анализ поверхности отклика по уровню m_{pl} и m_0 (рис. 9) показал, что необходимо увеличить как массу ВМ, так и массу дебалансов.

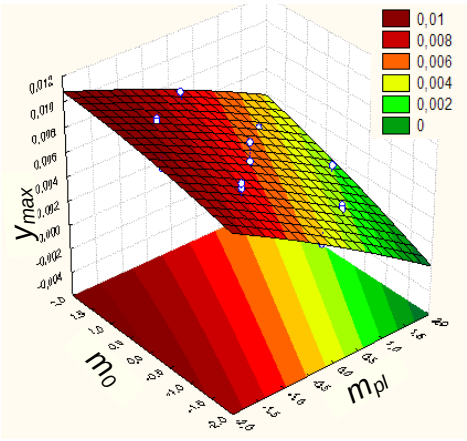


Рис. 7 – Поверхность отклика по уровню регрессии массы ВМ и массы дебалансов на y_{max}

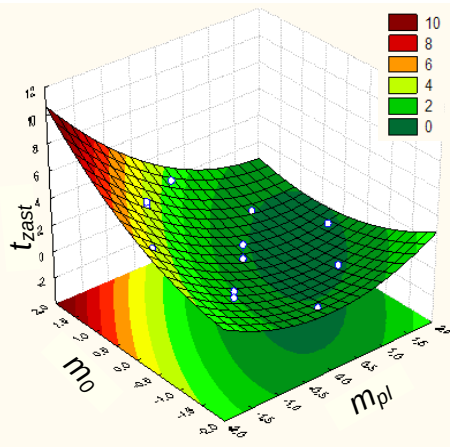


Рис. 8 – Поверхность отклика по уровню регрессии массы ВМ и массы дебалансов на t_{zast}

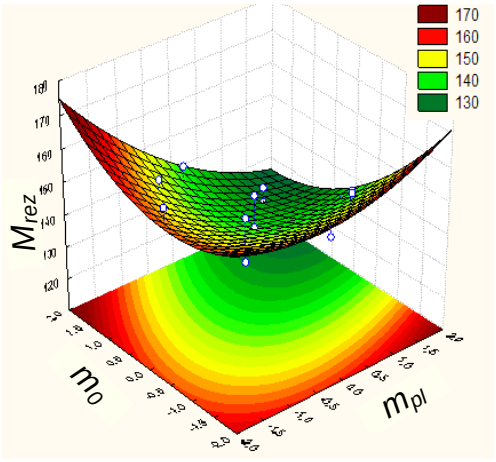


Рис. 9 – Поверхность отклика по уровню регрессии массы ВМ и массы дебалансов на M_{rez}

Выводы. Проведенные исследования пуска зарезонансной вибрационной машины с дебалансными вибровозбудителями с помощью математического моделирования показали, что на прохождение зоны резонанса значительное влияние оказывает как мощность приводных двигателей ВМ, так и технологические режимы работы ВМ, при которых возможны изменения конструкционных параметров ВМ.

Полученные результаты исследований пуска ВМ с помощью метода планирования эксперимента при изменении конструкционных параметрах ВМ показали, что на прохождение резонансной зоны и на проявление эффекта Зоммерфельда существенное воздействие оказывает масса ВМ и масса дебалансов. В то же время менее значимым является коэффициент жесткости.

Таким образом, к ВМ зарезонансного типа необходимо применение регулируемого ЭП обеспечивающего форсированное прохождение резонансной зоны с максимально допустимым ускорением, что позволит снизить механические нагрузки на конструкционные элементы ВМ и мощность приводных двигателей.

Список литературы: **1.** Вибрации в технике : справочник в 6 т. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 4 : Вибрационные машины и процессы. – 509 с. **2.** *Бауман В. А.* Вибрационные машины и процессы в строительстве / *В. А. Бауман, И. И. Быховский*. – М. : Высшая школа, 1977. – 255 с. **3**. Вибрации в технике : справочник в 6 т. – М. : Машиностроение, 1979. – Т. 2 : Колебания нелинейных механических систем. – 351 с. **4.** *Блехман И. И.* Вибрационная механика / *И. И. Блехман*. – М. : Физматлит, 1994. – 400 с. **5.** *Повидайло В. А.* Расчет и конструирование вибрационных питателей / *В. А. Повидайло*. – М. : Машгиз, 1962. – 151 с. **6.** *Дмитриев В. Н.* Переходные процессы зарезонансных вибрационных машин / *В. Н. Дмитриев, Е. Н. Гаврилов* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – №4. – С. 52–55. **7.** *Сипайлов Г. А.* Математическое моделирование электрических машин (АВМ) / *Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос*. – М. : Высшая школа, 1980. – 176 с. **8.** *Копылов И. П.* Математическое моделирование электрических машин / *И. П. Копылов*. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с. **9.** *Ивоботенко Б. А.* Планирование эксперимента в электромеханике / *Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов*. – М. : Энергия, 1971. – 185 с. **10.** *Монтгомери Д. К.* Планирование эксперимента и анализ данных / *Д. К. Монтгомери*. – Ленинград : Судостроение, 1980. – 384 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Vibratsii v tekhnike: spravochnik.* Vol. 4. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. Print. **2.** Bauman, V. A. and Bykhovskiy, I. I. *Vibratsionnyye mashiny i protsessy v stroitelstve*. Moskow: Vysshaya shkola, 1977. Print. **3.** *Vibratsii v tekhnike: spravochnik.* Vol. 2. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979. Print. **4.** Blekhman, I. I. *Vibratsionnaya mekhanika.* Moskow: Fizmatlit, 1994. Print. **5.** Povidaylo, V. A. *Raschet i konstruirovaniye vibratsionnykh pitateley*. Moskow: Mashgiz, 1962. Print. **6.** Dmitriyev, V. N. and Gavrilov, Ye. N. "Perekhodnyye protsessy zarezonansnykh vibratsionnykh mashin". *Elektrotekhnicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya*. No. 4. 2011. 52–55. Print. **7.** Sipaylov, G. A. and Loos, A. V. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin (AVM)*. Moskow: Vysshaya shkola, 1980. Print. **8.** Kopylov, I. P. *Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskikh mashin*. Moskow: Vysshaya shkola, 2001. Print. **9.** Ivobotenko, B. A., Ilinskiy, N. F. and Kopylov, I. P. *Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike*. Moskow: Energiya, 1971. Print. **10.** Montgomeri, D. K. *Planirovaniye eksperimenta i analiz dannykh*. Leningrad: Sudostroyeniye, 1980. Print.

Поступила (received) 14.07.2015

УДК 621.83

Л. Г. ЛИМОНОВ, канд. техн. наук, гл. специалист отдела ЧАО «Тяжпромавтоматика»

НОВАЯ СЕРИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ФИРМЫ СИМЕНС

Введение. Серия электрических двигателей Simotics M 1PH8, разработанная и поставляемая фирмой СИМЕНС, представляет новое поколение трехфазных электродвигателей переменного тока, предназначенных для универсального использования в регулируемых и нерегулируемых электроприводах станков, прессов, экструдеров, крановых механизмов, механизмов печатного производства, бумагоделательной и металлургической промышленностей, и других отраслей промышленного производства [1].

Основные характеристики серии. В состав серии входят асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Все электродвигатели ориентированы на использование, в первую очередь, в регулируемых электроприводах управления движением, с питанием от преобразователей частоты семейства Sinamics S120.

В серии предлагаются электродвигатели как с воздушным принудительным, так и с водяным охлаждением, со степенью защиты IP55 и IP23. Спектр применения расширен различными конструкциями подшипников. Электродвигатели в составе частотного электропривода с преобразователями частоты позволяют достичь высоких показателей нагрузочных циклов, при высоком быстродействии и высокой точности регулирования координат электропривода – скорости, крутящего момента и позиционирования. Для этого они могут быть укомплектованы инкрементальными импульсными датчиками HTL, инкрементальными датчиками sin/cos и многооборотными датчиками абсолютного положения.

В связи с тем, что электродвигатели серии Simotics M 1PH8часто используются в качестве основных электроприводов станков, они получили название электродвигатели главного движения.

Основные особенности электродвигателей новой серии:

- бескорпусная конструкция,
- высокая мощность,
- высокая динамичность,
- высокая точность.

Следует отметить следующие преимущества электродвигателей серии 1PH8:

- высокая удельная мощность при уменьшенном монтажном объеме,
- широкий диапазон скоростей,
- большой диапазон различных типоисполнений предоставляет широкие возможности при конструировании электроприводов,
- длительные сроки службы подшипников,
- низкий уровень шума,
- максимальная тепловая нагрузка во всем диапазоне скоростей,
- оптимизация применения с преобразователями серии Sinamics S120.

Из основных технических данных следует отметить изоляцию класса H, наличие датчиков температуры в обмотке статора, а также нестандартные значения номинальной величины напряжения и частоты при номинальном значении скорости электродвигателя.

В качестве примера, характеризующего асинхронные электродвигатели рассматриваемой серии, в Таблицах 1 и 2 приведены основные технические данные электродвигателей двух отрезков серии, с принудительным воздушным охлаждением и степенью защиты IP55. Обозначения в Таблицах: n – номинальная скорость двигателя, H – высота оси вращения, Pн – номинальная мощность, Uн – номинальное напряжение, fн – номинальная частота, n1 – максимальная скорость двигателя, n2 –предельная допустимая скорость.

Динамические показатели и материалоемкость асинхронных электродвигателей характеризуют данные, приведенные в Таблице 3.

В качестве примера, характеризующего синхронные электродвигатели рассматриваемой серии, в Таблице 4 приведены основные технические данные электродвигателей одного отрезка серии, с принудительным воздушным охлаждением и степенью защиты IP55.

Динамические показатели и материалоемкость синхронных электродвигателей характеризуют данные, приведенные в Таблице 5.

Внешний вид бескорпусных асинхронных двигателей серии Simotics M 1PH8 иллюстрируют фотографии, показанные на рис. 1 (высота оси H=80 ÷ 160мм) и рис. 2 (высота оси H=355мм).

Выводы. Динамические качества электродвигателя описанной серии PH8 подтвердились при использовании его для создания и ввода в действие высокодинамичного электропривода летучей пилы трубоэлектросварочного агрегата (статья, посвященная разработке и внедрению этого электропривода, помещена в данном Сборнике).

© Л.Г. Лимонов, 2015

Таблица 1

n об/мин	H мм	Pн кВт	Uн В	fн Гц	n1 об/мин	n2 об/мин
400	160	9,5 - 13	260 - 300	14,3 – 14,1	2150 - 1750	6500
	180	16,3 – 21,2	271 - 268	13,9 – 13,9 – 13,8	2800 - 3000	5000
	225	30,4 – 39,2 - 48	268 – 264 - 272		2400 – 2500 - 2600	4500
	280	63 – 80 - 103	325	13,6	1100 – 1200 - 1300	3300
700	180	27 - 35	320 - 330	24 – 23 .9	3300 - 3700	5000
	225	55 – 68 - 82	310 – 310 - 315	23,8	2900 -3100 - 3300	4500
	280	110 – 138 - 166	330 – 325 - 325	23,7 – 23.7 – 23.6	2100	3300
1000	100	3,7 – 6,3	333 - 307	35,8 – 35,5	2550 - 4300	9000
	132	12 - 17	319 - 307	35,0 – 34,8	3000 - 4300	8000
	160	22 - 28	300 - 292	34,2	2800 - 4600	6500
	180	39 - 51	340	34,0	4200 - 4400	5000
	225	71 – 92 - 113	335 – 340 - 340	33,8 – 33,8 – 33,9	3300	4500
	280	150 – 182 - 226	335 – 330 - 335	33,7 – 33,6 – 33,6	2100	3300
400	355	270 – 330 – 375 – 440 - 470	400	54,2	1450 – 1450 – 1400 – 1400 - 1400	2800
1150	100	4,3 – 7,2	380 – 348	40,7 – 40,6	2450 - 4750	9000
	132	13,5 - 19	361 – 351	40,0 – 39,8	3000 - 4000	8000
	160	25 – 31	343 - 333	39,2	3550 - 4850	6500
	180	44 - 58	390	39,0 – 38,9	4800 - 5000	6000
	225	81- 105 - 129	385 – 390 - 390	38,8	3400	4500
	280	170 – 210 - 260	400 – 380 - 385	38,6	2200	3300

Таблица 2

n об/мин	H мм	Pн кВт	Uн В	fн Гц	n1 об/мин	n2 об/мин
400	355	160 – 190 – 225 – 255 - 295	400	24,2	1150	2800
500	160	12 - 16	325 - 365	17,6 – 17?5	2200 - 1850	6500
	180	20,5 – 26,5	335	17,4 – 17,2	2900 - 3100	5000
	225	38 – 49 - 60	335 – 330 - 340	17,2	2500 – 2600 - 2700	4500
	280	80 – 100 - 130	395 – 400 - 395	17,0	1600	3300
640	355	210 – 250 -290 – 335 - 385	400	32,2	1150	2800
800	180	31 - 40	365 - 360	27,4 – 27,3	3800 - 4100	5000
	225	57 – 73 - 92	350 – 350 - 360	27,1 – 27,1 – 27,2	3400 -3600 – 3800	4500
	280	125 – 155 - 190	400 – 385 - 370	27,0	2300	3300
	355	250 – 305 – 355 - 410	400	40,2	1200	2800
830	355	475		41,9	1350	

Таблица 3

n об/мин	H мм	Pн кВт	Mн Нм	J кгм2	G кг	Mн/J 1/с²	G/Mн кг/Нм
400	355	160 - 295	3183 - 5869	14,74 – 27,79	2235 - 3629	216 - 211	0,702 – 0,618
500	160	12 - 18	229 - 306	0,216 – 0,232	195 - 230	1060 - 1319	0,852 – 0, 752
	180	20,5 – 26,5	392 - 506	0,489 – 0,652	350 - 422	802 - 776	0,893 – 0,834
	225	38 - 60	726 - 1146	1,48 – 2,33	610 - 870	491 - 514	0,840 – 0,759
	280	80 - 130	1529 - 2481	4,20 – 6,3	1200 - 1650	364 - 394	0,785 – 0,685
640	355	210 - 385	3134 - 5745	14,74 – 27,79	2235 - 3629	213 - 210	0,713 – 0,632
800	180	31 - 40	370 - 478	0,489 – 0,652	350 - 422	757 - 733	0,946 – 0,883
	225	57 - 92	681 - 1098	1,48 – 2,33	610 - 870	460 - 471	0,896 – 0,792
	280	125 - 190	1492 - 2268	4,20 – 6,3	1200 - 1650	355 - 360	0,804 – 0,728
	355	250 - 410	2984 - 4894	14,74 – 24,22	2235 - 3256	202 - 209	0,749 – 0,665
		305	3641	17,40	2560	209	0,703
		355	4238	20,66	2889	205	0,682
		410	4894	24,22	3256	202	0,665
830	355	475	5444	27,79	3629	196	0,667

Таблица 4

n об/мин	H мм	Pн кВт	Uн В	fн Гц	n1 об/мин	n2 об/мин
700	180	33 - 44	278 - 269	47	1450	3600
	225	48 - 64 - 80	256 – 238 - 254		1450 – 1550 - 1450	3500
1000	180	46 - 62	285 - 275	67	1950 - 2050	3800
	225	68 – 91 - 113	254 – 265 - 271		2050 – 1950 - 1950	3500
1500	132	15.7 – 19,9 – 23,7 – 30,6	388 – 316 – 383 - 356	50	2550 – 3050 – 2450 2700	4500
	160	61 - 69	340 - 345	100	2600	4000
	180	70 - 93	308 - 282		2700 - 2950	3800
	225	101 – 134 - 168	271 – 288 - 270		2900 – 2700 - 2900	3500
2000	132	31,4	356	66,7	3500	4500
2500	132	25 – 31,7 – 48,4	371	83,3	4050 – 3950 - 3900	4500
	160	84 - 95	370 - 350	167	3900 - 4000	4000
3000	132	57,5	370	100	4500	4500
800	180	38 - 50	316 - 306	53	1450	3800
	225	55 – 73 - 91	292 – 271 - 290		1450 – 1550 - 1450	3500
1150	180	53 - 71	327 - 315	77	1950 - 2050	3800
	225	78 – 104 - 129	292 – 304 - 311		2050 – 1950 - 1950	3500
1750	132	18 – 23,1 – 27,2 – 35,6	415 – 366 – 415 - 12	58,3	2550 – 3050 – 2450 - 2700	4500
	160	69 - 77	395 - 400	117	2600	4000
	180	82 - 109	359 - 328		2700 - 2950	3800
	225	117 – 156 - 195	315 – 335 - 314		2900 – 2700 - 2900	3500
2300	132	35,6	407	76,7	3500	4500
2800	132	27,7 – 35,2 – 53,4	415	93,3	4050 – 3950 - 3900	
	160	87 - 98	410 - 385	187	3900 - 4000	4000

Рис. 1

Рис. 2

Таблица 5

n об/мин	H мм	Рн кВт	Мн Нм	J кгм2	G кг	Мн/J 1/с²	G/Мн кг/Нм
700	180	33	450	0,46	330	978	0,733
		44	600	0,60	400	1000	0,667
	225	48	655	1,28	580	512	0,885
		64	873	1,66	700	526	0,802
		80	1091	2,02	810	540	0,742
1000	180	46	439	0,46	330	954	0,752
		62	592	0,60	400	987	0,676
	225	68	649	1,28	580	507	0,894
		91	869	1,66	700	523	0,806
		113	1079	2,02	810	534	0,751
1500	132	15,7	100	0,0446	85	2246	0,85
		19,9	127	0,0600	103	2117	0,811
		23,7	151	0,0750	120	2013	0,795
		30,6	195	0,0885	136	2203	0,697
	160	61	390	0,216	218	1806	0,559
		69	435	0,244	240	947	0,552
	180	70	446	0,46	330	960	0,734
		93	592	0,60	405	987	0,684
	225	101	643	1,28	580	502	0,902
		134	853	1,66	700	514	0,821
		168	1070	2,02	810	530	0,757
2000	132	31,4	150	0,0750	120	2000	0,867
2500	132	25	96	0,0446	85	2152	0,885
		31,7	121	0,0600	103	2017	0,851
		48,4	185	0,0885	136	2090	0,735
	160	84	320	0,216	218	1481	0,681
		95	360	0,244	240	1475	0,667
3000	132	57,5	183	0,0885	136	2068	0,743

Список литературы: 1. SIMOTION, SINAMICS S120 & SIMOTICS. Equipment for Production Mashines. Motion Control. Catalog PM21 – 2013.

Bibliography: 1. SIMOTION, SINAMICS S120 & SIMOTICS. Equipment for Production Mashines. Motion Control. Catalog PM21 – 2013.

Поступила(received) 17.06.2015

УДК 621.3

В. Б. КЛЕПИКОВ, д.т.н., проф. НТУ «ХПИ»
П. А. КОРОТАЕВ, ассистент НТУ «ХПИ»

ОСОБЕННОСТИ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПОСЛЕ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Введение. Для Украины, которая обеспечена собственными топливными энергоресурсами лишь на 48% от потребностей, проблема энергоресурсосбережения крайне важна. Экономия электроэнергии – один из наиболее эффективных путей энергосбережения [1].

В [2] отмечено, что при существующей изношенности тепловых электростанций, качества угля и графике сменности режимов работы коэффициент полезного действия электростанций доходит до 28% и даже 25%. При этом, как показано в [3], с учетом затрат на добычу и транспортировку энергетических ресурсов оказывается, что каждая единица сэкономленной электроэнергии обеспечивает в энергетическом эквиваленте 5 единиц топливных энергоресурсов. Это значит, что экономия электроэнергии является исключительно эффективным средством их сбережения. Известно, что наибольшие потери электроэнергии имеют место у потребителя [3]. Основным потребителем, как известно, является электропривод (ЭП), на долю которого приходится около 70% всей вырабатываемой электроэнергии. Автоматизированный ЭП, являясь средством оптимизации технологических процессов позволяет существенно сократить как прямые так и косвенные расходы электроэнергии, обеспечивая, так называемый, синергетический эффект умножения экономии электроэнергии, что обеспечивается не только снижением потребления электроэнергии по счетчику, установленному на ЭП, но и в результате оптимизации электроприводом технологического процесса за счет исключения энергетических затрат на производство, транспортирование сэкономленных расходных материалов, затрат на ремонт и восстановительные работы, увеличения качества и долговечности выпускаемой продукции и т.п.

Турбомеханизмы, к которым относятся и центробежные насосы для перекачки воды и других жидкостей, потребляют до 25 % всей вырабатываемой электроэнергии. Работа этих систем отличается неравномерным потреблением воды, тепловой энергии, воздуха в течение суток в зависимости от погодных условий, времени года.

Выпускаемые насосные агрегаты обычно оснащаются нерегулируемым электроприводом. Регулирование подачи осуществляется при этом дросселированием на стороне нагнетания. Характерным примером являются многие станции горячего и холодного водоснабжения и системы отопления зданий. Механизмы этих станций, выбранные исходя из максимальной производительности, значительную часть времени работают с меньшей производительностью, что определяется изменением потребления воды в разные периоды времени. Среднесуточная загрузка насосов холодного водоснабжения составляет 50-55% максимальной. Существующие системы водоснабжения с нерегулируемым электроприводом не обеспечивают заметного снижения потребляемой мощности при уменьшении расхода воды, а также обусловливают при этом существенный рост давления (напора) в системе, что приводит к утечкам воды и значительному числу порывов магистралей водоснабжения [4].

Современные системы, в частности на базе частотно-регулируемого электропривода, показывают существенную экономию энергетических и материальных ресурсов [5, 6]. Именно эти системы позволяют в условиях высокой степени износа материально-технической базы ЖКХ резко повысить энергоэффективность работы, качество предоставляемых услуг и существенно снизить аварийность, при этом создается возможность высвобождения средств для рефинансирования и планомерного обновления оборудования и капитального ремонта коммуникаций.

Особо неприятным фактором для эксплуатации являются многочисленные порывы водопроводных сетей, которые возникают после кратковременного отключения напряжения питания. По данным Харьковского КП «ПТП «Вода» основное число порывов приходится при включении насосных агрегатов в работу. В 2011г. при потере электроснабжения всего на 10 минут после возобновления электропитания и пуска насосных агрегатов возникло около 100 порывов, но ликвидировать за сутки удавалось лишь 17 [4].

Вышеуказанное свидетельствует о том, что исследование энергоресурсосберегающего электропривода, в том числе решающего проблемы водопроводных сетей, является важной и актуальной задачей.

Порывы, как это было показано в [7], являются следствием волновых процессов, возникающих в электромеханогидравлической системе с распределенными параметрами. Было показано, что пуск электропривода насосного агрегата с преобразователем частоты по определенному закону изменения частоты преобразователя может устранить порывы водопроводной сети. Существует много насосных станций второго подъема, на которых преобразователь частоты установлен только на одном насосном агрегате. А электропривода остальных запускаются прямым пуском электропривода, который сопровождается бросками повышенного давления.

© В.Б. Клепиков, П.А. Коротаев, 2015

Цель работы – Выяснить возможность устранения бросков давления при прямых пусках электроприводов с учетом волновых процессов электромеханогидравлической системе с несколькими насосами, работающими на единую систему водоснабжения.

Материалы исследования. На рис.1 показана математическая модель в структурной форме электропривода двух насосных установок, работающих на водопроводную сеть.

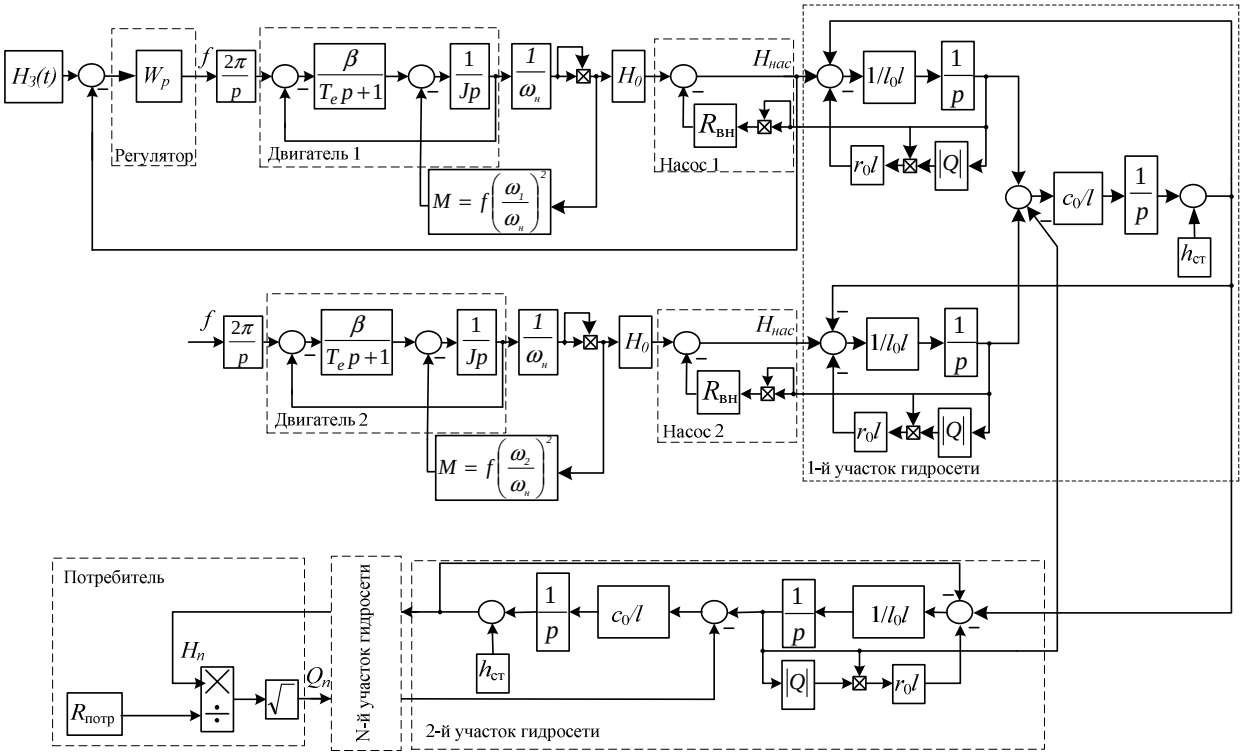


Рис. 1 – Математическая модель в структурной форме электроприводов насосной станции с двумя насосами, работающими на водопроводную сеть

Асинхронный двигатель (АД) электропривода насоса принят в виде модели, в которой звено электромеханического преобразования энергии представлено апериодическим звеном первого порядка [8].

Математическая модель может быть получена при рассмотрении следующих соотношений:

$$\begin{cases} T_э \dfrac{dM(t)}{dt} = \beta(\omega_0(t) - \omega(t)) - M(t); \\ J \dfrac{d\omega(t)}{dt} = M(t) - M_c(t), \end{cases} \tag{1}$$

где $\omega_0 = \dfrac{2\pi f_1}{p_n}$ – угловая скорость электромагнитного поля АД, рад/с, f_1 – частота питания, Гц; p_n – число пар полюсов обмотки статора, M – момент АД, Нм, M_c – момент сопротивления насоса, Нм, $T_э$ – электромагнитная постоянная времени, с$^{-1}$; J – суммарный момент инерции насосного агрегата, кг·м^2; β – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики АД

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_0 s_k} \tag{2}$$

Уравнение линеаризованной механической характеристики АД:

$$M = \frac{2M_к}{s_к} s \tag{3}$$

где $M_к$ – критический момент АД, Нм, s, $s_к$ – текущее и критическое скольжения (то есть скольжение при $M=M_к$) АД.

Уравнение движения АД:

$$M - M_c = Jp\omega \tag{4}$$

Учитывая, что $s = \dfrac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$, можно (4) представить как

$$M = \frac{2M_к}{s_к} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (5)$$

Значение электромагнитной постоянной времени $T_э$ определяется по соотношению [8]:

$$T_э = \frac{1}{2\pi f_{1.н} s_к}, \quad (6)$$

При работе турбомеханизма с противодавлением $H_с$ статический момент $M_с$ на валу описывается зависимостью:

$$M_c = M_0 \upsilon^2 + (M_н - M_0)\upsilon \sqrt{\frac{H_0 \upsilon^2 - H_c}{H_0 - H_c}}, \quad (7)$$

где $\upsilon = \omega / \omega_{ном}$ – относительная скорость обращения рабочего колеса насоса, ω, $\omega_н$– текущая и номинальная частоты вращения насоса, $с^{-1}$, H_0 – напор, который развивает насос при нулевой подаче (закрытая задвижка), м; $H_с$ – противодавление в гидравлической сети, м, $M_н$ – номинальный момент турбомеханизма, Нм; $M_0 = P_0 / \omega_{ном}$ – момент, Нм, обусловленный мощностью на валу турбомеханизма при нулевом расходе и номинальной скорости вращения.

Центробежные насосы служат для повышения кинетической и потенциальной энергии потока жидкости путем влияния лопаток рабочего колеса на поток. На практике зависимость напора от подачи (напорная характеристика) определяется для каждого насоса экспериментально. С достаточной степенью точности в пределах рабочей зоны напорная характеристика центробежного насоса может быть представлена параболой вида [9]

$$H = H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_н} \right)^2 - R_{вн} Q^2, \quad (8)$$

где $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление насоса, $с^2/м^5$:

$$R_{вн} = \frac{H_0 - H_н}{Q_н^2}; \quad (9)$$

$H_н$, $Q_н$ – номинальный напор и подача насоса, м, $м^3/с$.

Предполагаем, что преобразователь представляет собой безинерционное звено, а стабилизация осуществляется с помощью ПИ-регулятора давления с передаточной функцией:

$$W_p = k_p + \frac{k_p}{T_p p} \quad (10)$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора давления, T_p – постоянная интегрирование регулятора давления, с.

Трубопроводную сеть представим известными уравнениями [10]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H}{\partial x} - \dfrac{1}{gS}\dfrac{\partial Q}{\partial t} - \dfrac{\lambda}{d}\dfrac{1}{S^2}\dfrac{Q|Q|}{2g} = 0; \\ \dfrac{\partial H}{\partial t} + \dfrac{c^2}{gS}\dfrac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $H = p/(\rho g)$, Q – напор и расход жидкости в текущем сечении трубопровода соответственно, м, $м^3/с$, p – давление в текущем сечении трубопровода, Па, $S = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения, $м^2$, d – диаметр трубопровода, м, λ – безразмерный коэффициент сопротивления трубопровода, c – скорость распространения ударной волны в рабочей среде, м/с, ρ – плотность рабочего среды, кг/ $м^3$, g = 9,81 $м/с^2$ – ускорение свободного падения.

Решение уравнений (11) с помощью метода конечных разностей позволяет представить трубопроводную сеть конечным числом участков с равными параметрами и перейти от частных производных к разностным аналогам:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H}{\partial x} = \dfrac{H_{вых.уч} - H_{вх.уч}}{l_{уч}}; \\ \dfrac{\partial Q}{\partial x} = \dfrac{Q_{вых.уч} - Q_{вх.уч}}{l_{уч}}, \end{cases} \quad (12)$$

где $l_{уч} = L/N$ – длина участка трубопровода; L – длина трубопроводной сети, м, N – число участков, на которые разбитый трубопровод, $H_{вх.уч}$, $H_{вых.уч}$ – напор на входе и выходе участка, м, $Q_{вх}$, $Q_{вых}$ –расход на входе и выходе участка, $м^3/с$.

Тогда для і-ого участка уравнения напора и расхода будут иметь вид:

$$\begin{cases} H_i - H_{i-1} + l_0 l_{уч} \dfrac{dQ_i}{dt} + r_0 l_{уч} Q_i |Q_i| = 0; \\ \dfrac{dH_i}{dt} + c_0 \dfrac{1}{l_{уч}} (Q_i - Q_{i-1}) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где $r_0 = \dfrac{\lambda}{2gS^2 d}$; $c_0 = \dfrac{c^2}{Sg}$; $l_0 = \dfrac{1}{Sg}$ – удельные параметры участка трубопровода, $H_i = h_i + h_{cmi}$, Q_i, $H_{i-1} = h_{i-1} + h_{cmi-1}$, Q_{i-1} – напор и расход на выходе и входе і-ого участка трубопровода соответственно, $\lambda = 0{,}11\left(\dfrac{k_e}{d}\right)^{0{,}25}$ – коэффициент сопротивления трубопровода, k_e – коэффициент жесткости трубы, м, h_{cmi}, h_{cmi-1} – высота расположения конца и начала і-ого участка относительно оси насоса соответственно, м, $h_i = \dfrac{p_i}{\rho g}$, $h_{i-1} = \dfrac{p_{i-1}}{\rho g}$ – абсолютный напор на выходе и входе і-ого участка трубопровода, м, p_i, p_{i-1} – абсолютное давление на выходе и входе і-ого участка трубопровода, Па.

Характеристика системы потребления на выходе водопроводной магистрали представлена соотношением[11]:

$$H_{потр} - h_{ст} = R_{потр\ н} Q_{потр}^2, \quad (14)$$

где $H_{потр}$, $Q_{потр}$ – напор и расход в сети потребителя, м, м^3/с, $R_{потр\ н}$ – номинальное гидравлическое сопротивление потребителя, с^2/м^5, $h_{ст}$ – статический напор потребителя, м.

На насосной станции обычно размещается несколько насосных агрегатов, работающих одновременно на одну и ту же водопроводную магистраль. Регулирование подачи насосной станции изменением частоты вращения насосов, имеющих различные характеристики, иллюстрируется рис. 2. Если два насоса с суммарной характеристикой *2* работают на сеть с характеристикой *1* в точке *A* с производительностью Q_A и необходимо уменьшить их производительность до Q_A', то это можно сделать двумя способами: уменьшить частоту вращения обоих насосов (их характеристики *3* и *4* и суммарная характеристика *2')* или снизить, но более значительно, частоту вращения одного из насосов (характеристика *5* при сниженной частоте вращения). Регулирование производительности изменением частоты вращения одновременно двух насосов по своим показателям равноценно регулированию частоты вращения насоса при его одиночной работе.

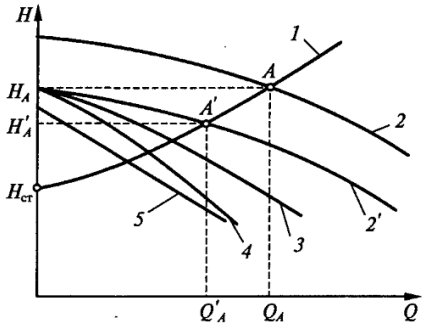


Рис. 2 – Регулирование подачи насосной станции изменением частоты вращения насосов

С точки зрения экономичности регулирования более выгодным является одновременное изменение частоты вращения всех параллельно работающих насосов. Однако это связано с увеличением капитальных затрат на оснащение всех агрегатов регулируемым электроприводом. Поэтому для большинства насосных станций достаточно иметь только один регулируемый агрегат и осуществлять более глубокое регулирование отключением отдельных насосов.

При параллельной работе нагнетателей с разными характеристиками представляется целесообразным определять средний КПД нагнетателей [11]:

$$\eta_{ср} = \frac{Q_1 \cdot H_1 + Q_2 \cdot H_2}{Q_1 \cdot H_1 / \eta_1 + Q_2 \cdot H_2 / \eta_2}, \quad (15)$$

где Q_1, H_1,η_1 – производительность, давление, КПД первого насоса,

Q_2, H_2,η_2 – производительность, давление, КПД второго насоса.

Из формулы (15) следует, что более мощные нагнетатели должны работать с максимальным КПД, а регулировать расход в системе целесообразнее менее мощным нагнетателем [11].

Первое моделирование проводилось для насосной станции, осуществляющей подачу воды с помощью насосного агрегата, состоящего из двигателя 1 мощностью $P_н$=15 кВт и насоса с номинальным напором и производительностью соответственно $H_н$=28 м и $Q_н$=80 м^3/ч, напор насоса при нулевой подаче составляет H_0=29 м. Параметры нерегулируемого насосного агрегата, состоящего из двигателя 2 и насоса 2 принимались равными регулируемому. Для расчетов водопроводной сети взято N=20 участков трубопровода, удельные параметры которых равны: r_0=20,5 с^2/м^6, l_0=3,2 с^2/м^3, c_0=3·10^6 м$^{-1}$.

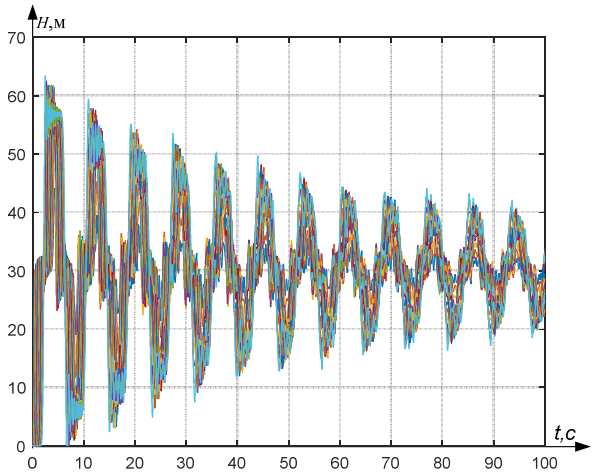


Рис. 3 – Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата

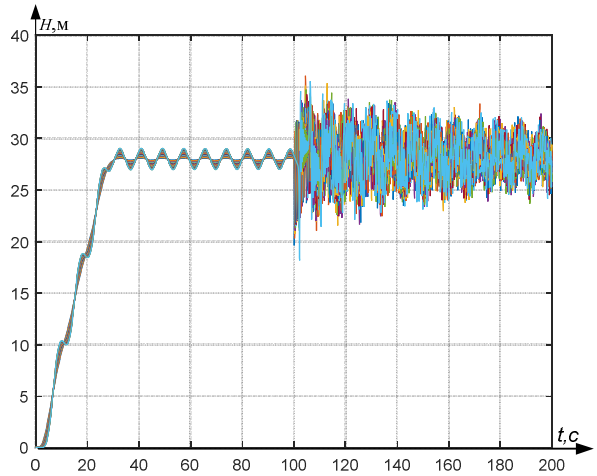


Рис.4 - Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым электропривода насосного агрегата с преобразователем частоты

Из рис. 3 видно, что при запуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата повышение напора H_{max}=63 м, что в 2,2 раза превышает номинально значение. При пуске первым насосного агрегата с регулируемым электроприводом максимальное повышение напора составляет H_{max}=36 м, что в 1,3 раза больше номинального значения и в 1,8 раза меньше чем максимальное значение давления при запуске первым насоса с нерегулируемым электроприводом.

Второе моделирование проводилось для насосной станции, осуществляющей подачу воды с помощью насосного агрегата, состоящего из двигателя 1 мощностью $P_н$=15 кВт и насоса с номинальным напором и производительностью соответственно $H_н$=28 м и $Q_н$=80 м^3/ч, напор насоса при нулевой подаче составляет H_0=29 м. Нерегулируемого насосный агрегат состоит из двигателя 2 мощностью $P_н$=30 кВт и насоса 2 с номинальным напором и производительностью соответственно $H_н$=36 м и $Q_н$=200 м^3/ч, напор насоса при нулевой подаче составляет H_0=40 м. Для расчетов водопроводной сети взято N=20 участков трубопровода.

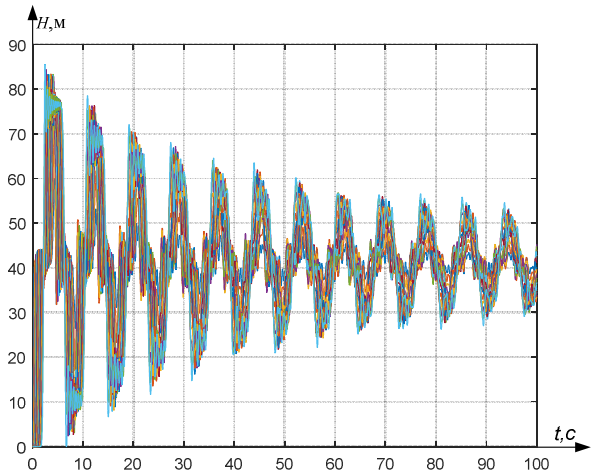


Рис. 5 – Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата

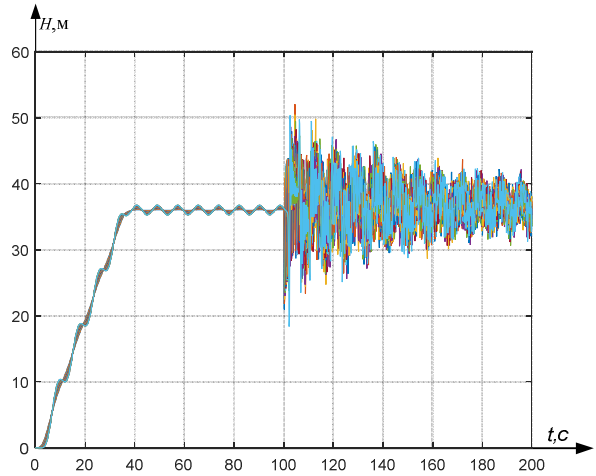


Рис.6 - Изменение напора на каждом участке водопровода при пуске первым электропривода насосного агрегата с преобразователем частоты

Из рис. 5 видно показал, что при запуске первым нерегулируемого электропривода насосного агрегата повышение напора H_{max}=85,5 м, что в 2,4 раза превышает номинально значение. При пуске первым насосного агрегата с регулируемым электроприводом максимальное повышение напора составляет H_{max}=52 м, что в 1,4 раза больше номинального значения и в 1,6 раза меньше чем максимальное значение давления при запуске первым насоса с нерегулируемым электроприводом.

Выводы. Таким образом, для снижения давления в водопроводной магистрали во время пуска электроприводов насосной станции с несколькими насосными агрегатами, один из которых имеет регулируемый электропривод с преобразователем частоты напряжения, каждый прямой пуск нерегулируемых электроприводов насосных агрегатов следует выполнять обязательно после запуска электропривода с частотным преобразователем.

Список литературы: 1. Стратегия энергосбережения в Украине: аналитические справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / под ред. В.А. *Жовтянского*, М.М. *Кулика*, Б.С. *Стогния* – К.: Академпериодика, 2006. – т. 1-510 с. **2.** *Товажнянский* Л.Л. Проблеми енергетики на межі XXI століття: Навч. посіб. / Л.Л. *Товажнянский*, Б.О. *Левченко*. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – С. 57 – 86. **3.** *Клепиков* В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. *Клепиков*, В.Ю. *Розов* // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2008. – № 30. – с.18-21. **4.** *Буряковская* Т. Харьковские коммунальщики готовятся к зиме / Т. *Буряковская* // Время. – 2011. – №673. – С. 1. **5**. *Браславский* И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. *Браславский*, З.Ш. *Ишматов*, В.Н. *Поляков* – М.: Академия. – 2004. **6.** *Клепиков* В.Б. К итогам эксплуатации энергосберегающего электропривода станции второго подъема п.г.т. Солоницевка / В.Б. *Клепиков*, П.А. *Коротаев* // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. - №5. – С. 15 – 18. **7.** *Клепиков* В.Б. Волновые процессы в электромеханогидравлической системе при пуске электропривода насосного агрегата / В.Б. *Клепиков*, П.А. *Коротаев* // Техническая электродинамика. – Киев, 2014. – №5. – С. 131-133. **8.** *Ключев* В.И. Теория электропривода / В.И. *Ключев* – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. **9.** *Онищенко* Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. *Онищенко*, М.Г. *Юньков* – М., Энергия, 1972. – 240 с. **10.** *Вишневский* К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи / К.П. *Вишневский* – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с. **11.** *Белов* М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. *Белов*, А.Д. *Новиков* – М.: Академия, 2007. - 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zhovtyanskiy, V. A., M. M. Kulik, B. S. Stogniy. Strategiya energosberezheniya v Ukraine: analiticheskie spravochnyie materialyi v 2-h tomah. Obschie osnovyi energosberezheniya. Kiev: Akademperiodika, 2006. Print. **2.** Tovazhnyanskiy, L. L., B. O. Levchenko. Problemi energetiki na mezhI XXI stolIttya. Harkov: NTU "HPI", 2006. 57–86. Print. **3.** Klepikov, V. B., V. Y. Rozov. "O roli elektroprivoda v reshenii problemyi energoresursosberezheniya v Ukraine". Vestnik natsionalnogo tehnicheskogo universiteta «Harkovskiy politehnicheskiy institut». No. 30. 2008. 18-21. Print. **4.** Buryakovskaya, T. "Harkovskie kommunalschiki gotovyatsya k zime" Vremya. No. 673. 2011. Print. **5.** Braslavskiy, I. Y., Z. S. Ishmatov, V. N. Polyakov Energosberegayuschiy asinhronnyiy elektroprivod. Moscow: Akademiya. 2004. Print. **6.** Klepikov, V. B., P. A. Korotaev. "K itogam ekspluatatsii energosberegayuschego elektroprivoda stantsii vtorogo pod'ema p.g.t. Solonitsevka". Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit. No. 5. 2011. 15–18. Print. **7.** Klepikov V. B., P. A. Korotaev. "Volnovyie protsessyi v elektromehanogidravlicheskoy sisteme pri puske elektroprivoda nasosnogo agregata" Tehnicheskaya elektrodinamika. Kiev. No.5. 2014. 131-133. Print. **8.** Klyuchev, V. I. Teoriya elektroprivoda. Moscow: Energoatomizdat. 2001. Print. **9.** Onischenko, G. B., M. G. Yunkov Elektroprivod turbomehanizmov. Moscow: Energiya. 1972. Print. **10.** Vishnevskiy, K. P. Perehodnyie protsessyi v napornyih sistemah vodopodachi. Moscow: Agropromizdat. 1986. Print. **11.** Belov, M. P., A. D. Novikov. Avtomatizirovannyiy elektroprivod tipovyih proizvodstvennyih mehanizmov i tehnologicheskih kompleksov. Moscow: Akademiya. 2007. Print.

Поступила (received) 20.07.2015

УДК 62-838:629.423.1

Д.А. ШОКАРЕВ, ст. преп. КрНУ имени Михаила Остоградского
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преп. ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РУДНИЧНОГО КОНТАКТНОГО-АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Введение. Создание нового типа рудничного электровоза – контактно-аккумуляторного, соответствующего по требованиям производственников по комплексу параметров и эффективной по структуре, базируется, прежде всего, на типе и структуре того или иного вида тягового электрического привода (ТАП) [1 – 3]. Научными коллективами Криворожского национального университета и Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского разработан макетный образец нового синергетического электропривода переменного тока: *IGBT*-инвертор – тяговый асинхронный электрический двигатель (ТАД), для 14-ти тонного вида контактно-аккумуляторного рудничного электровоза [4 – 5]. Данный вид электровоза и его электроэнергоэффективный тяговый электропривод позволят повысить эффективность работы всего комплекса внутришахтного транспорта (ВШТ) и одновременно повысить безопасность работы горнорабочих при транспортировании железорудного сырья по подземным выработкам шахт [6 – 9]. Поэтому разработка и испытание макетного образца тягового асинхронного привода для вновь создаваемого вида электровозов для отечественных шахт является задачей важной на этапе подготовки к конструированию опытного образца.

Материалы исследования. Лабораторные испытания макетного образца ТАП проводились на специализированном испытательном стенде ДВНЗ «Криворожский национальный университет», а отдельные узлы и блоки – в лаборатории кафедры систем энергопотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского

Главной задачей исследований было:

– оценка адекватности результатов, полученных в ходе теоретических исследований ;

– выявление технических и технологических особенностей и их влияние на режимы функционирования ТАП, что не поддавалось оценке в ходе теоретических исследований;

– установление реальности и возможности функционирования разработанного ТАП в экспериментальных (лабораторных), а в дальнейшем и промышленных условиях.

Тактика проведения испытаний строилась в соответствии с разработанной и утвержденной руководителями заказчика и исполнителя (соисполнителей) методикой с согласованием её с рядом заинтересованных организаций и учреждений.

На стендовые испытания был представлен изготовленный макетный образец ТАП в составе двух тяговых асинхронных трехфазных электродвигателей типа АД-50 (разработчик ПАО «Электромашина», г. Харьков) с параметрами: г. $U_{ном} = 250В$, $f = 60Гц$, $P = 50кВт$, а также транзисторного инвертора напряжения, пульта управления, тиристорного блока защитных и тормозных резисторов.

Электрическая схема лабораторного испытательного стенда представлена на рис. 1.

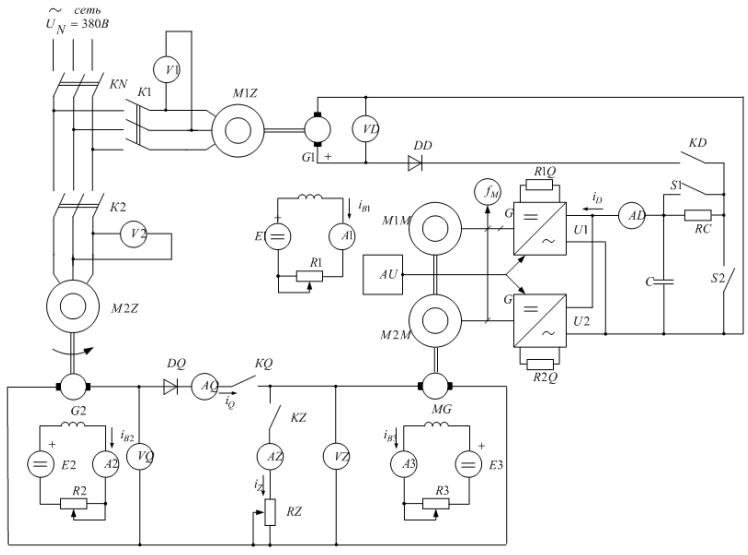


Рис. 1 – Электрическая схема испытательного стенда

A1, A2, A3 – амперметры токов возбуждения i_B;

AD – амперметр тока i_D в цепи питания инверторов;

AQ – амперметр тормозного тока i_Q;

AZ – амперметр нагрузочного тока i_Z;

AU – система управления инверторами и регулирования ТЭП;

C – фильтровый конденсатор (емкость добавлена с учетом индуктивности *G1*);

DQ, DZ – разделительные диоды;

E – источники возбуждения;

f_M – частота напряжения U_M двигателя;

G – генераторы;

KN – автомат;

K1, K2 – пускатели;

KD, KQ, KZ – контакторы;

MM – тяговые двигатели;

MG – мотор – генератор;

MZ – приводные двигатели;

R1, R2, R3 – резисторы регулирования токов возбуждения;

© Д.А. Шокарев, В.А. Федотов, 2015

Датчики тока и напряжения, необходимые для системы управления, на схеме не показаны, (они устанавливаются по указаниям разработчика преобразователя).

Испытательный стенд позволял имитировать реальные процессы, происходящие в системе тягового привода с асинхронными двигателями при работе рудничного электровоза сцепной массой 14 кН, с целью полной реализации программы и методики испытаний экспериментального образца ТАП.

На рис 2а, 2б показаны осциллограммы трехфазного тока ТАД, в режимах холостого тока и работы под нагрузкой при ШИМ напряжения питания.

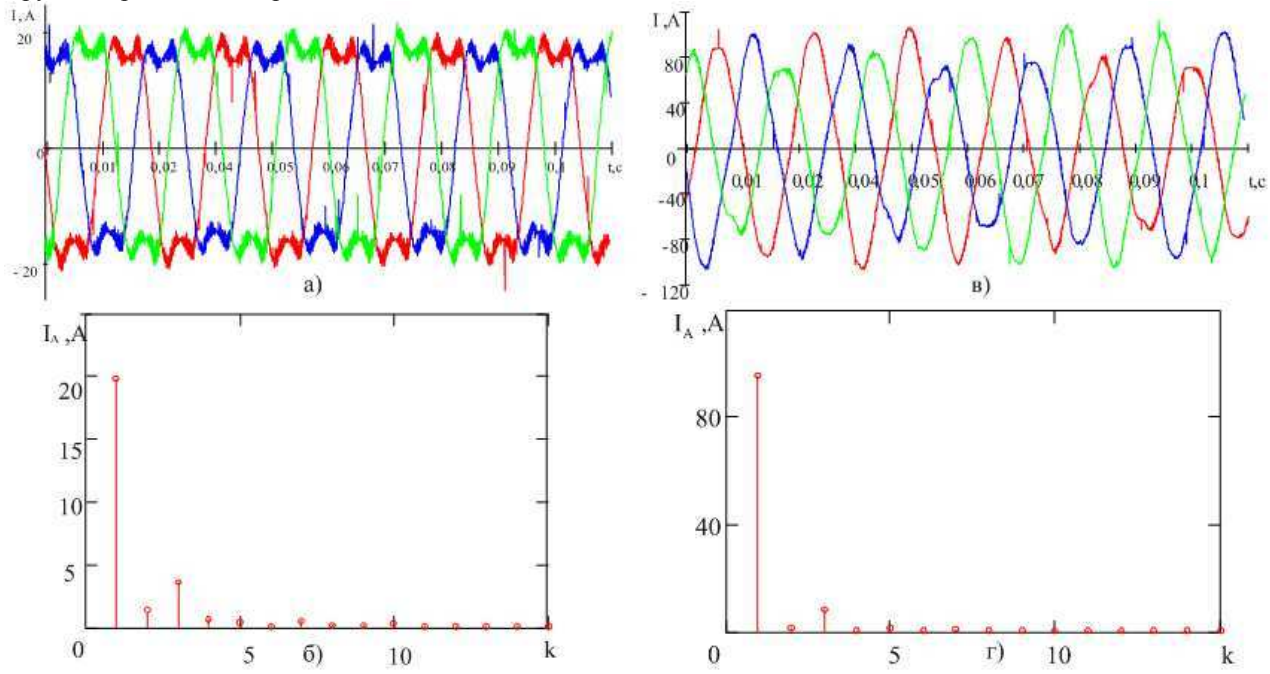


Рис. 2 – Осциллограммы трехфазных токов ТАД: а) в режиме работы без нагрузки при ШИМ напряжения ; б) в установившемся режиме с нагрузкой на валу двигателя при ШИМ напряжения;в) гармонический состав тягового токав режиме работы без нагрузки; г) гармонический состав тягового тока в установившемся режиме.

Работа датчика движения полностью соответствовала установившейся частоте вращения ротора тягового двигателя (двигателей).

При моделировании режима «ТОРМОЗ» производился анализ форм кривых выходного тока и напряжения IGBT - инвертора по трем фазам двигателя.

Для оценки уровня синусоидальности формы тока на выходе от преобразователя был приведен гармонический анализ (рис. 2в, рис. 2г) (уровень задатчика интенсивности равен «2-й ступени режима «ТЯГА» в установившемся режиме работы). Величина питающего напряжения задавалась в диапазоне 230–80 В. В ходе испытаний было установлено, что форма тока содержит первую гармонику частоты (97 %), что соответствует расчетным данным [4].

На рис. 3а, 3б приведены осциллограммы переходных процессов в ТАД электропривода рудничного контактно-аккумуляторного электровоза при несанкционированном допустимом исчезновении напряжения питания на входе контура преобразователя электрической энергии, возникающей в момент исчезновения питания ТАП с нагрузкой равной 0,25 номинальной (установившийся режим «ТЯГА», ротор двигателя вращается на стабильной частоте).

Как следует из осциллограмм, протекание электрических переходных процессов в тяговых асинхронных двигателях ТАП при различных системах питания – КС и ТАБ практически идентичны.

Канал 1 (рис. 3а) показывает амплитудное значение фазного напряжения на двигателе, а канал № 2 (рис. 3б) – переходной процесс.

Имитация по процессам в ТАП при обрыве пантографа от контактного провода проводилась при временном интервале 0,15 с.

Исследования показали, что спад напряжения с уровня 230 В до уровня ниже 80 В происходит за время менее 150 мс.

В то же время, «подхват» напряжения (переход в режим питание от тяговой аккумуляторной батареи) осуществляется через 0,15 с после установившегося режима.

На рис. 4 представлена осциллограмма переходных процессов в тяговом двигателе ТАП при отключении питания электровоза от контактной сети под номинальной нагрузкой на валу тягового двигателя электропривода электровоза и переключением на питание от ТАБ.

В ходе эксперимента также осуществлялись (моделировались на физической модели -стенде) пуски ТАП под полной нагрузкой, при U = 250В и U = 80 В резкий сброс и резкий наброс нагрузки, переключения источника питания: КС–ТАБ в функции нагрузки на ТАД.

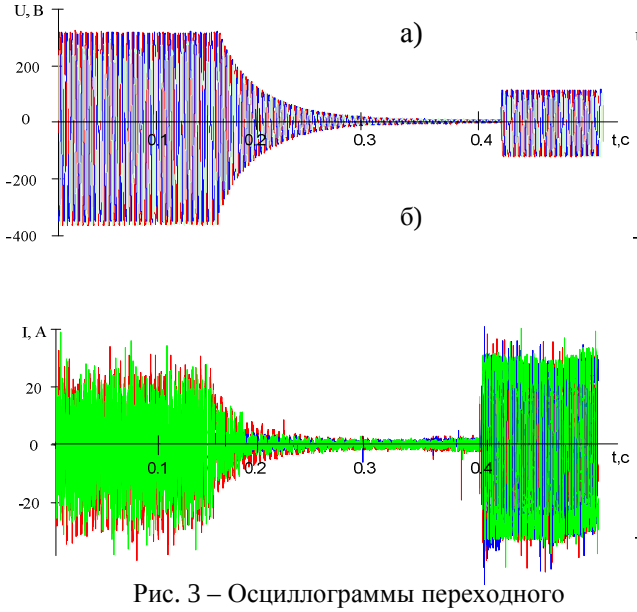
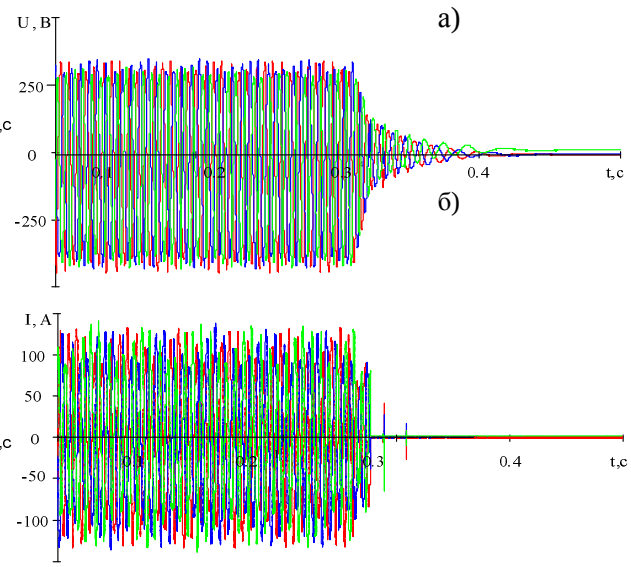


Рис. 3 – Осциллограммы переходного процесса а) напряжения;
б) токов на выходе ТАД в момент кратковременного исчезновения питания на входе преобразователя с переходом на питание от другого источника



Рисю 4 – Осциллограммы переходных процессов
а) трехфазного напряжения и б) токов на фазах (ТАД) в момент исчезновения напряжения на входе преобразователя с максимальной нагрузкой на валу

Должное внимание уделялось также анализу гармонического состава тока и напряжения в функции метода ШИМ – трапецеидальная или синусоидальная [9]. На рис. 5 (а, б) представлены осциллограммы напряжения на двигателе при синусоидальном и трапецеидальном законе управления при ШИМ напряжения.

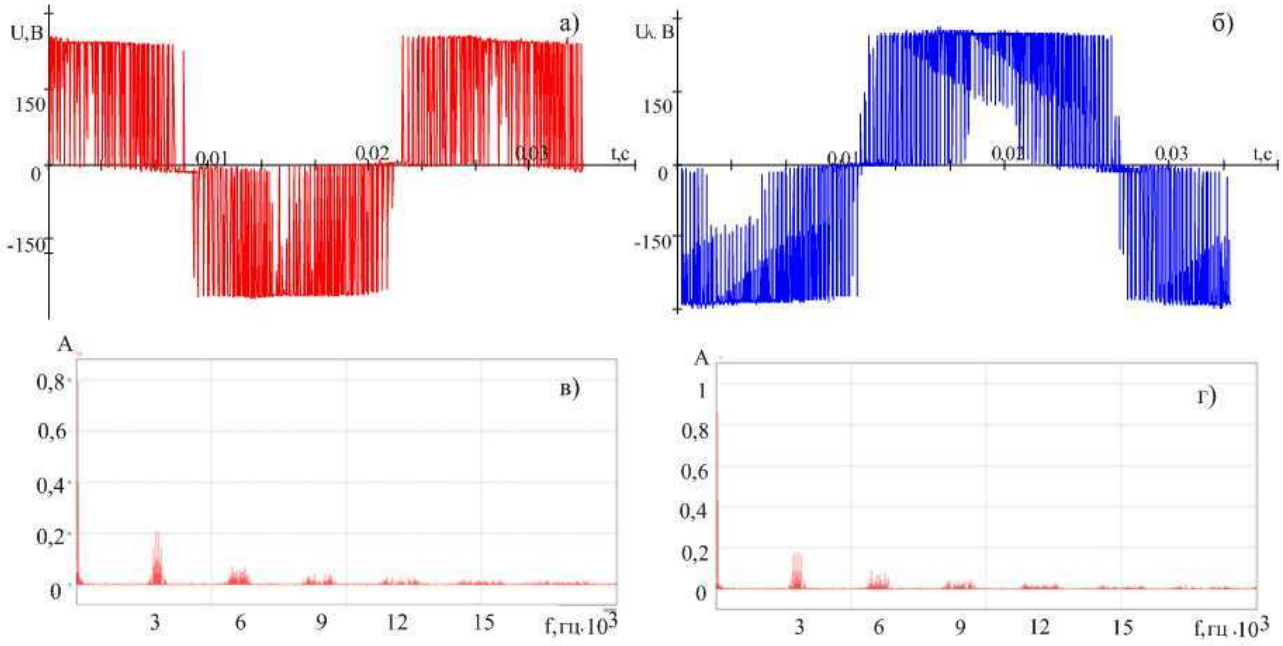


Рис. 5 – Графики фазного напряжения, полученные :а) на выходе инвертора напряжения с ШИМ при синусоидальном законе управления; б) на выходе инвертора напряжения с ШИМ при трапецеидальном законе управления в) гармонический состав фазного напряжения на при синусоидальном законе управления
г) гармонический состав фазного напряжения на при трапецеидальном законе управления

Оценивался также гармонический состав тягового тока и напряжения в функции способов управления и режимов функционирования ТАП (рис. 5в, рис. 5г). Как свидетельствуют результаты анализа, гармонический состав тягового тока изменяется в соответствии с режимом и способом управления ШИМ. Так, при применении трапецеидального закона управления в тяговом токе амплитуда 5-й и 13-й гармоники почти в два раза меньше, чем при синусоидальном способе, а коэффициент искажения равен $K_и = 0,9858$ против $K_и = 0,9723$ при применении синусоидального закона управления. Остальные амплитуды гармоник отличаются незначительно.

В ходе экспериментов была также оценена точечно адекватность математической модели и реальных данных – лабораторного стенда. Расхождения вполне допустимые – не превышали 5,7–8,3 %.

Вместе с тем испытания выявили определенную неудовлетворенность отдельными составляющими ТАП, в частности параметрами разработанных ОАО «Электромашина» (г. Харьков) первыми экспериментальными образцами тяговых электрических асинхронных двигателей АД-50.

Вместе с тем, обобщая результаты исследований можно сделать вывод, что экспериментальный образец ТАП на базе тяговых асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором и *IGB*-транзисторных преобразователей с микропроцессорной системой управления подтвердил в основном свою эффективность его применения для рудничных электровозов с двухуровневым режимом питания КС-ТАБ.

Выводы. 1. Разработаны авторские теоретические выкладки по структуре, параметрам и компоновке синергетического тягового электропривода с асинхронными двигателями и *IGB*-транзисторными преобразователями позволяют перейти к конструированию опытного образца рудничных контактно-аккумуляторных электровозов с двухуровневым режимом питания ТАД.

2. Результаты исследований рекомендуются к дальнейшему внедрению на рудничных и промышленных электровозах соответствующих видов и типов.

.

Список литературы: 1. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт / Ю.Ф. Бутт, В.Б. Грядущий, В.Л. Дебелый, А.Н. Коваль, А.Л. Фурман, В.М. Щука, В.А. Яценко // Под общ. ред. Б.А.Грядущего. – Т.1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с**. 2.** Степаненко В.П. Разработка и испытание шахтных контактно-аккумуляторных электровозов/ В.П. Степаненко, Ванцлафф В., Дайнека Р.// Уголь. – 1986. - №12. – С.32 – 33. **3.** Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P.212 **4.** Шокарев, Д. А. Система управления тяговым асинхронным электроприводом рудничного контактно-аккмуляторного электровоза / Д. А. Шокарев : Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : науково-технічна конференція : матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, –2013. – С. 118–119**. 5.** Коржев А.А. Повышение тяговых свойств рудничных электровозов за сет применения комбинированного привода. Автореферат диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Санки-Петербург, 2005, 19с. **6.** Бинус М.С. Повышение надёжности и электробезопасности работы электровозной откатки шахт. Безопасность и надежность электроснабжения горнорудныхз предприятий /М.С.Бинус, В.И. Кунин, В.Н. Кобевник// Тезисы докладов. – Днепропетровск: 2002. – С. 32 – 33. **7.** Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАНУ, 2006. – 252с. **8.** Синчук О.Н. К вопросу о повышении безопасности эксплуатации електровозного транспорта шахт и рудников// Тезисы докладов. – Днепропетровск: 2002. – С. 32 – 33. **9.** Бунько В.А. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки / Бунько В.А., Волотковский С.А., Пивняк Г.Г. - М.: Недра, 1964, - 200 с. **10**. Випробування асинхронного тягового електропривода рудникового контактно-акумуляторного електровоза / О. М. Сінчук, Д. А. Шокарьов, Є. І. Скапа, І. О. Сінчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – Випуск 6(99). – С. 49–52.

Bibliography (transliterated): 1. Shahtnyj podzemnyj transport: spravochnoe izdanie. Shahtnyj lokomotivnyj i rel'sovyj transport / Ju.F. Butt, V.B. Grjadushhij, V.L. Debelyj, A.N. Koval', A.L. Furman, V.M. Shhuka, V.A. Jacenko // Pod obshh. red. B.A.Grjadushhego. – T.1. – Doneck: «VIK», 2009. – 481 s. **2.** Stepanenko V.P. Razrabotka i ispytanie shahtnyh kontaktno-akkumuljatornyh jelektrovozov/ V.P. Stepanenko, Vanclaff V., Dajneka R.// Ugol'. – 1986. - №12. – S.32 – 33. **3.** Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P.212 **4.** Shokarev, D. A. Sistema upravleniya tyagovym asinhronnym e'lektroprivodom rudnichnogo kontaktno-akkmulyatornogo e'lektrovoza / D. A. SHokarev : Elektromehanichni ta energetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizaciї : naukovo-tehnichna konferenciya : materiali konferenciї. – Kremenchuk: KrNU, –2013. – S. 118–119. **5.** Korzhev A.A. Povyshenie tjagovyh svojstv rudnichnyh jelektrovozov za set primenenija kombinirovannogo privoda. Avtoreferat dissertacionnoj raboty na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehn. nauk. Sanki-Peterburg, 2005, 19s. **6**. Binus M.S. Povyshenie nadjozhnosti i jelektrobezopasnosti raboty jelektrovoznoj otkatki shaht. Bezopasnost' i nadezhnost' jelektrosnabzhenija gornorudnyhz predprijatij /M.S.Binus, V.I. Kunin, V.N. Kobevnik// Tezisy dokladov. – Dnepropetrovsk: 2002. – S. 32 – 33. **7.** Sinchuk O.N. Kombinatorika preobrazovatelej naprjazhenija sovremennyh tjagovyh jelektroprivodov rudnichnyh jelektrovozov / O.N. Sinchuk, I.O. Sinchuk, N.N. Jurchenko, A.A. Chernyshov, O.A. Udovenko, O.V. Pas'ko, Je.S. Guzov. Nauchnoe izdanie. – Kiїv: IEDNANU, 2006. – 252s. **8.** Sinchuk O.N. K voprosu o povyshenii bezopasnosti jekspluatacii elektrovoznogo transporta shaht i rudnikov// Tezisy dokladov. – Dnepropetrovsk: 2002. – S. 32 – 33 **9.** Bun'ko V.A. Povyshenie bezopasnosti rudnichnoj jelektrovoznoj otkatki / Bun'ko V.A., Volotkovskij S.A., Pivnjak G.G. - M.: Nedra, 1964, - 200 s. **10.** Viprobuvannya asinhronnogo tyagovogo elektroprivoda rudnikovogo kontaktno-akumulyatornogo elektrovoza / O. M. Sinchuk, D. A. Shokar'ov, E. I. Skapa, I. O. Sinchuk // Visnik Vinnic'kogo politehnichnogo institutu. – Vinnicya: VNTU, 2011. – Vipusk 6(99). – S. 49–52.

Поступила (received) 21.08.2015

УДК 62-83:629.584

В.С. БЛІНЦОВ, д-р техн. наук, проф., НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв;
С.М. ВОЛЯНСЬКИЙ, асистент каф. ЕОСтаІБ НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв

УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУШІЙНО-КЕРМОВИМ КОМПЛЕКСОМ ПІДВОДНОГО АПАРАТА

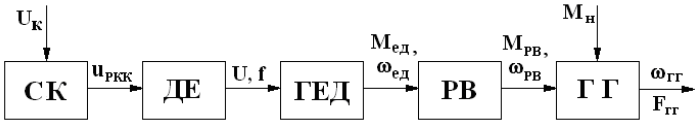
Вступ. Розширення масштабів науково-дослідних робіт в глибинах Світового океану, а також інтенсивне освоєння шельфу Азовського та Чорного морів привело до значного зростання числа підводних апаратів (ПА). Прямолінійний рух є основним видом руху ПА, тому саме до нього, як складової високоточного просторового руху, пред'являються вимоги щодо підвищення точності за рахунок автоматизації. Отже, з підвищенням швидкості руху, маневрених характеристик, вимог до точності керування й продуктивності підводних робіт актуальності набуває задача удосконалення систем автоматичного керування (САК) горизонтальним прямолінійним рухом ПА шляхом розробки нових алгоритмів керування, що у свою чергу передбачає розробку та комплексне налагодження математичних і імітаційних моделей рушійно-кермового комплексу (РКК) ПА, як найбільш вимогливого до якості керування об'єкта ПА.

Постановка задачі. Сьогодні найбільш відомими є схеми РКК ПА з герметичними двигунами, що мають низький ККД, з баророзвантаженими асинхронними двигунами (БАД), заповненими рідким діелектриком, але найбільш розповсюдженими, зокрема, у зарубіжних аналогах ПА, є конструкції РКК ПА, де в якості гребних електродвигунів використовуються двигуни постійного струму з магнітними або електромагнітними муфтами. Останні, в порівнянні з БАД мають на порядок складнішу конструкцію та більш високу вартість, що негативно впливає на розвиток технології конструювання й кількість ПА. Тому найбільш перспективними є баророзвантажені асинхронні двигуни, які, проте, мають недолік у вигляді суттєвих нелінійностей механічних характеристик в залежності від температури навколишнього середовища та фізичних властивостей рідкого діелектрика.

Підвищення вимог до точності та ефективності керування РКК ПА на базі БАД стимулює побудову САК РКК ПА на основі різних елементних баз, зокрема адаптивних ПІД-регуляторів [8] і нечіткої логіки. Істотний вклад в розробку нечітких регуляторів і систем на їх основі внесли українські та закордонні вчені В.Б. Клепиков, А.О. Лозинський, В.М. Казак, В.І. Архангельський, В.І. Гостев, О.В. Збруцький, Ю.П. Зайченко, В.А. Терехов, A.U. Levin, T. Miller, A.A. Yamamura та інші. Проте питання розробки таких регуляторів для САК РКК при горизонтальному прямолінійному русі ПА на сьогодні в науково-технічній літературі розглянуті недостатньо.

Тому **метою роботи** є удосконалення автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата на базі баророзвантаженого асинхронного двигуна шляхом синтезу адаптивних та нечітких регуляторів для систем керування, що забезпечує підвищення ефективності керування при його горизонтальному прямолінійному русі.

Матеріали досліджень. Узагальнена структурна схема РКК ПА як об'єкту керування (рис. 1) містить нелінійні моделі автономно працюючих рушіїв (гребних гвинтів), які отримують механічну енергію від відповідних гребних електричних двигунів через валопровід і механічні редуктори [1]. До особливостей математичного моделювання таких систем слід віднести необхідність врахування додаткових втрат механічної енергії двигунів через їх роботу в середовищі рідкого діелектрика та коректного моделювання нелінійних характеристик гребних гвинтів на усьому діапазоні їх кутової швидкості як суттєво нелінійних гідродинамічних об'єктів [2, 3].



СК – система керування РКК ПА; ГЕД – гребний електродвигун з напівпровідниковим керованим джерелом електроенергії (ДЕ); РВ – редуктор і валопровід; ГГ –гребний гвинт в конусній насадці; $U_к$ – керуюча напруга; $u_{РКК}$ – напруга, сформована за законами СК; U, f – напруга та частота ДЕ; $M_{ед}$, $\omega_{ед}$ – момент обертання та кутова швидкість вала ГЕД; $M_{рв}$, $\omega_{рв}$ – момент обертання та кутова швидкість валопроводу; $M_н$ – момент опору зовнішнього середовища; $\omega_{гг}$ – кутова швидкість обертання ГГ; $F_{гг}$ – упор ГГ.

Рис. 1 – Узагальнена структурна схема РКК ПА як об'єкту керування

На основі структурної схеми (рис. 1) складено спрощену структурну схему РКК ПА як об'єкту керування (рис 2). На рис. 2 позначено: $u_{РКК}$ – сигнал завдання ДЕ; ГМ – блок гальмівного моменту баророзвантаженого електродвигуна (ЕД); Q_g – гідродинамічний момент опору обертання ротора в рідкому діелектрику, який заповнює ЕД; τ – температура робочої рідини (діелектрика); $Q_{гг}$ – гальмівний момент ГГ.

©В.С. Блінцов, С.М. Волянський, 2015

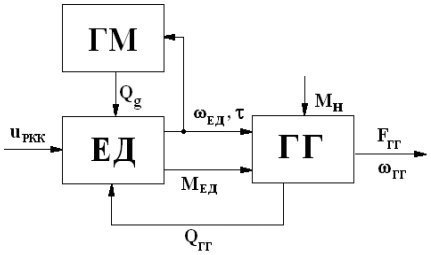


Рис. 2 – Спрощена структурна схема РКК ПА.

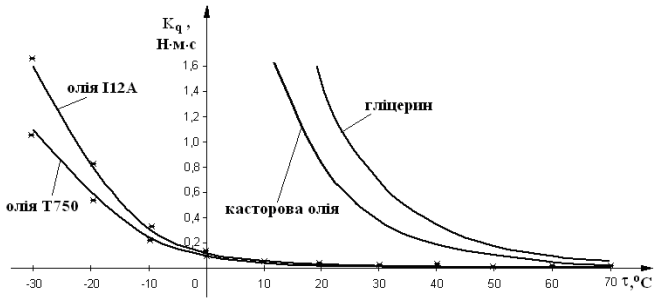


Рис. 3 – Залежності коефіцієнта K_q від температури та виду робочої рідини (діелектрика).

В якості напівпровідникового керованого джерела електроенергії використовується регульоване джерело напруги. Блоки ЕД, ГМ містять рівняння, які описують роботу цих елементів. Блок СК замінено сигналом $u_{\text{РКК}}$, РВ замінено коефіцієнтом, рівним одиниці.

Момент тертя ротора ЕД об рідкий діелектрик досить суттєвий при великих швидкостях обертання, тому їм не можна нехтувати [7]. Гальмівний гідродинамічний момент Q_g залежить лінійно від кутової швидкості обертання валу електродвигуна й нелінійно від температури τ та виду $Д$ робочої рідини (діелектрика) БАД:

$$Q_g(\tau, Д, \omega_{\text{ед}}) = K_q(\tau, Д)\omega_{\text{ед}},$$

де $K_q(\tau, Д) = 4\mu\pi r^3\left(\frac{L_r}{r} + \frac{L_r}{2\delta_1} + \frac{r}{4\delta_2}\right)$ – коефіцієнт гідродинамічних втрат.

Отримано залежності коефіцієнта K_q від температури та виду робочої рідини (діелектрика) (рис. 3).

Залежності для ацетону, води дистильованої, ксилолу, толуолу, гліцерину побудовані розрахунковим шляхом, залежності для етанолу, олій І12А, Т750 побудовані розрахунковим шляхом (*гладка лінія*) та підтверджені експериментальними даними (*маркер «зірочка»*).

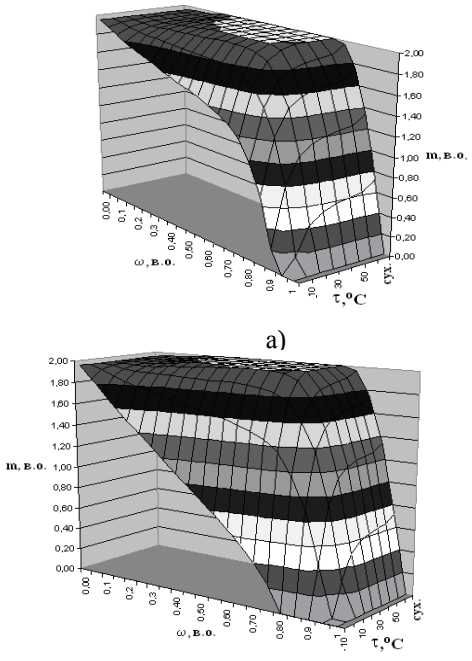
Як видно з рис. 3 експериментальні дані мають розбіжність з розрахунковими в межах 10-11%.

За допомогою отриманих на рис. 3 залежностей побудовано поверхні механічних характеристик БАД потужністю 250Вт, використовуваного в підводному апараті «Софокл», при різних температурах і видах робочих рідин, що представлено на рис. 4.

З рис. 3 і 4 видно, що механічна характеристика БАД суттєво залежить від температури та виду робочої рідини, тому вплив цих параметрів необхідно враховувати при синтезі САК РКК ПА.

Удосконалено узагальнену математичну модель РКК горизонтального прямолінійного руху ПА складену на підставі спрощеної структурної схеми РКК ПА як об'єкту керування (рис 2), шляхом обліку втрат гальмівного гідродинамічного моменту гребного баророзвантаженого двигуна постійного або змінного роду струму, працюючого у середовищі рідкого діелектрика [4]:

$$\begin{cases} m_x \dfrac{d\vartheta_x}{dt} = F_{\text{гг}} - q\upsilon^{2/3}c_x; \\ M_{\text{дин}} = M_{\text{ед}} - Q_g - Q_{\text{гг}}; \\ Q_g = 4\mu\pi r^2\omega_{\text{ед}}\left(\dfrac{L_r}{r} + \dfrac{L_r}{2\delta_1} + \dfrac{r}{4\delta_2}\right); \\ Q_{\text{гг}} = \begin{cases} \dfrac{k_Q\rho D_{\text{гг}}^5}{4\pi^2}\left(\dfrac{\omega_{\text{ед}}}{i}\right)^2 & при\ \ J \in [-1;1]; \\ k_q\rho D_{\text{гг}}^3\vartheta_{\text{ПА}}^2 & при\ \ J^{-1} \in (-1;1); \end{cases} \\ F_{\text{гг}} = \begin{cases} \dfrac{k_F\rho D_{\text{гг}}^4}{4\pi^2}\left(\dfrac{\omega_{\text{ед}}}{i}\right)^2 & при\ \ J \in [-1;1]; \\ k_f\rho D_{\text{гг}}^2\vartheta_{\text{ПА}}^2 & при\ \ J^{-1} \in (-1;1); \end{cases} \\ J = \dfrac{2\pi\vartheta_{\text{ПА}}}{\omega_{\text{ед}} D_{\text{гг}}}. \end{cases} \quad (1)$$



а)

б)

Рис. 4 – Поверхні механічних характеристик асинхронного БАД потужністю 250Вт залежно від температури та виду робочої рідини:
а) олія І12А, б) олія Т750.

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідкого діелектрика; L_r, r – довжина і радіус ротора; δ_1 – зазор між ротором і статором; δ_2 – зазор між торцевими поверхнями ротора та кришками ЕД; $\vartheta_{\text{ПА}}$ – проекція вектору швидкості переміщення РКК відносно води на вісь прямого ходу РКК; $D_{\text{гг}}$ – діаметр ГГ; $k_Q = f(J)$ і $k_q = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують момент ГГ; ρ – питома щільність води; $k_F = f(J)$ і $k_f = f(J^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують упор ГГ; J – відносний крок ГГ; J^{-1} – крок ГГ при реверсі; υ – об'ємна водотоннажність ПА; m_x – безрозмірна характеристика гідродинамічного моменту крену; q – швидкісний натиск; c_x – коефіцієнт подовжньої гідродинамічної сили.

За удосконаленими математичною моделлю (1) та структурною схемою (рис 2) розроблено Simulink – модель горизонтального прямолінійного руху ПА та проведено перевірку її точності шляхом порівняння розрахованих за допомогою її даних з експериментальними. Експериментальні дані отримано при дослідженні горизонтального прямолінійного руху ПА «Софокл» у випробувальному басейні НУК. Умови моделювання на Simulink – моделі ідентичні умовам проведення експерименту у випробувальному басейні. Результати оцінки точності моделювання прямолінійного руху ПА представлено на рис. 5.

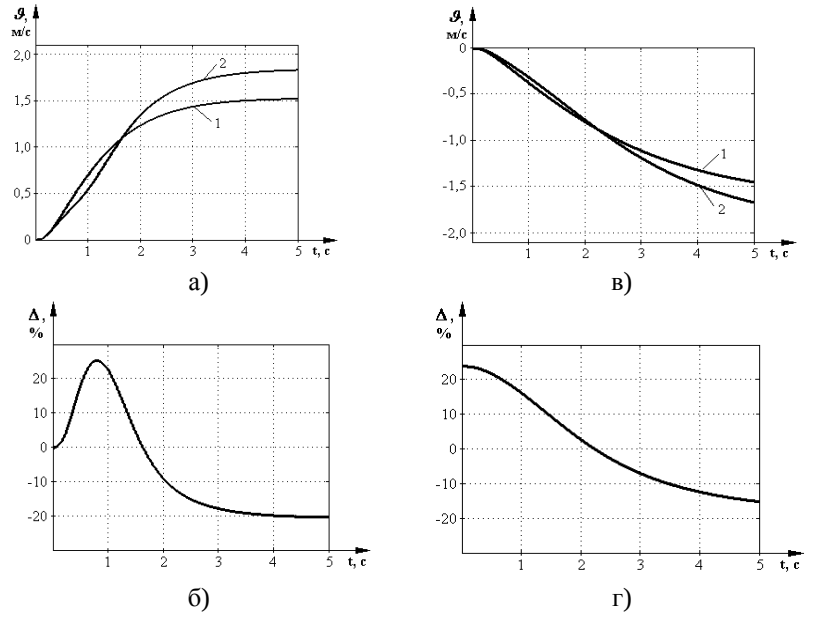


Рис. 5 – Результати оцінки точності моделювання горизонтального прямолінійного руху ПА: *а-в* – швидкість горизонтального прямолінійного руху ПА при прямому та зворотному ході (*крива 1* – моделювання; *крива 2* – експеримент); *б-г* – похибка моделювання.

Як видно з графіків на рис. 5 похибка моделювання горизонтального прямолінійного руху ПА не перевищує 25%, що на 5-10% нижче відомих подібних експериментів. Отримана похибка дозволяє говорити про достовірність проведених досліджень. При малих швидкостях руху ПА точність моделювання досягає максимальної похибки й має знакозмінний нелінійний характер.

Таким чином, розроблена Simulink – модель горизонтального прямолінійного руху ПА є працездатною, адекватною, а удосконалена математична модель достовірною, що дає можливість використовувати її для синтезу високоефективних регуляторів та систем автоматичного керування в усьому діапазоні зміни робочої температури та виду діелектрика БАД.

Узагальнена схема слідкуючої адаптивної САК з урахуванням впливу гальмівного гідродинамічного моменту Q_g (вихід блоку $W_\tau(t)$) і блоку $W_k(t)$ адаптивного підбору коефіцієнтів k_1, k_2, k_3 регулятора залежно від температури τ та виду $Д$ робочої рідини (діелектрика) БАД, представлена на рис. 6.

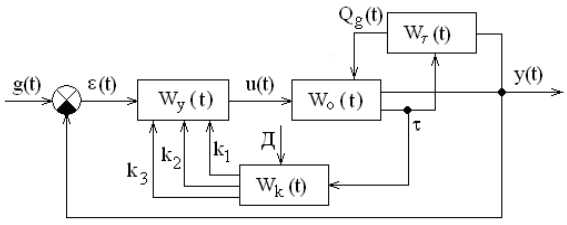


Рис. 6 – Узагальнена схема слідкуючої адаптивної САК.

Для синтезу узагальненої САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА (рис. 7) використана спрощена структурна схема РКК ПА (рис. 2) з урахуванням узагальненої схеми слідкуючої адаптивної САК (рис. 6). Вихідними параметрами цієї структурної схеми є кутова швидкість обертання ГГ, температура робочої рідини, момент, створюваний ГГ і швидкість переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі. У системі діють обурюючи дії: гальмівний момент ГГ $Q_{\text{гг}}$ є зовнішньою дією на об'єкт керування, швидкість переміщення ПА, $\vartheta_{\text{ПА}}$ – на ГГ і вид робочої рідини, $Д$ – на коефіцієнти регулятора.

На рис. 7 позначено: $W_{\text{у}}(t)$, $W_{\text{о}}(t)$, $W_{\text{гг}}(t)$, $W_{\text{зз}}(t)$, $W_{\vartheta_{\text{ПА}}}(t)$, $W_\tau(t)$, $W_k(t)$ – передатні функції регулятора, об'єкту керування, ГГ, зворотного зв'язку, швидкості прямолінійного горизонтального руху ПА, гідро-

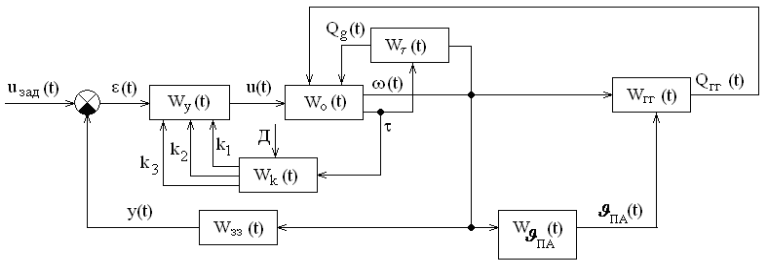


Рис. 7 – Узагальнена структурна схема синтезуємої САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА.

динамічного гальмівного моменту, блоку адаптивного підбору коефіцієнтів регулятора відповідно; $u_{\text{зад}}(t)$ – заздалегідь невідома дія; $\varepsilon(t)$ – помилка стеження; $u(t)$ – керуюча дія; $\omega(t)$ – кутова швидкість обертання електродвигуна $Q_{\text{гг}}(t)$ – гальмівний момент ГГ; $\vartheta_{\text{ПА}}(t)$ – швидкість прямолінійного горизонтального руху ПА; $y(t)$ – сигнал зворотного зв'язку; $Q_g(t)$ – гідродинамічний гальмівний момент; k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти регулятора.

Передатна функція регулятора $W_{\text{y}}(t)$ залежить від τ і $Д$, та перетворюється до виду $W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))$, де $k_i(\tau, Д)$ – функція коефіцієнтів ПІД-регулятора. Опис блоків, крім блоку регулятора $W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))$, відповідає рівнянням (1). Синтез регулятора $W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))$ виконано за допомогою пакету Simulink середовища MATLAB.

Загальний вигляд закону керування визначається видом функції $u(t)$ [5]

$$u(t) = \varepsilon(t) W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д)). \quad (2)$$

Тоді закони керування САК РКК по стабілізації кутової швидкості обертання гребного гвинта ПА, по стабілізації упору гребного гвинта ПА, по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі можливо представити у виді (3)-(5):

$$u(t) = W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))\varepsilon(t) = W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))[u_{\text{зад}}(t) - \omega(t)]. \quad (3)$$

$$u(t) = W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))\varepsilon(t) = W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))[u_{\text{зад}}(t) - F_{\text{гг}}(t)]. \quad (4)$$

$$u(t) = W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))\varepsilon(t) = W_{\text{y}}(t, k_i(\tau, Д))[u_{\text{зад}}(t) - \vartheta_{\text{ПА}}(t)]. \quad (5)$$

Розроблено Simulink – моделі для синтезу нечітких регуляторів і адаптивних ПІД-регуляторів та проведено моделювання САК РКК по стабілізації кутової швидкості обертання, упору гребного гвинта ПА та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі з синтезованими регуляторами. Результати моделювання САК РКК по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами представлено на рис. 8.

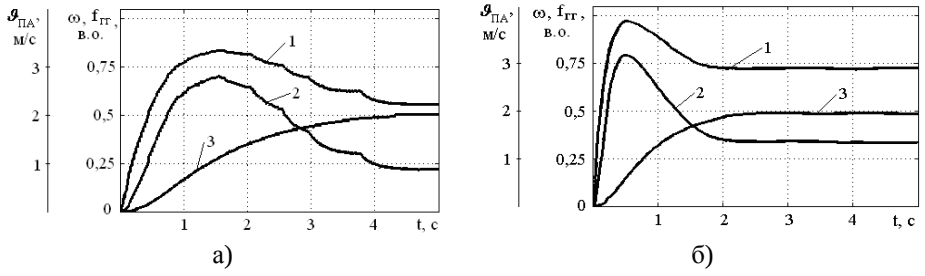


Рис. 8 – Результати моделювання роботи САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами (*а*) та нечіткими регуляторами (*б*): *крива 1* – кутова швидкість обертання ГГ $\omega_{\text{ед}}$; *крива 2* – упор ГГ $f_{\text{гг}}$; *крива 3* – швидкість переміщення при горизонтальному русі ПА $\vartheta_{\text{ПА}}$.

При аналізі перехідних процесів, представлених на рис. 8, *а*, можна зробити висновок, що адаптивні ПІД-регулятори в САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА забезпечують стійке відпрацювання вхідного сигналу по різних каналах керування з досить малими помилками розузгодження.

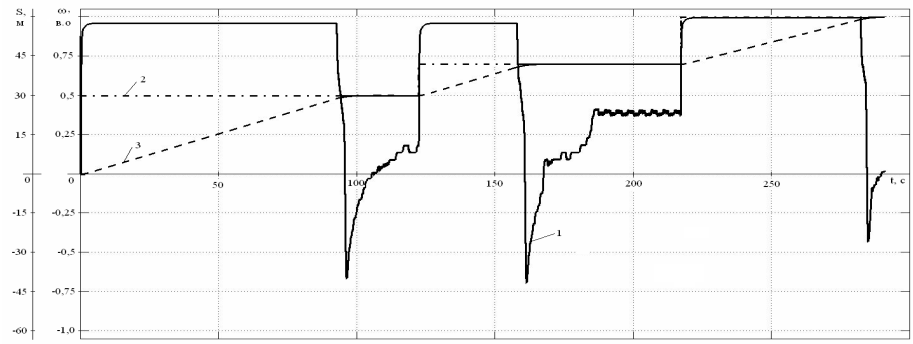
Проте, як показали проведені дослідження (рис. 8, *б*) застосування нечіткого регулятора, наприклад, в САК РКК по стабілізації упору ГГ ПА дозволило знизити в 2,5 рази помилку розузгодження й в 3 рази перерегулювання, в порівнянні з аналогічною системою з адаптивним ПІД-регулятором.

Крім того, застосування нечітких регуляторів в САК РКК ПА по стабілізації кутової швидкості обертання ГГ та по стабілізації швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі дозволило знизити від 1,6 до 2 разів час перехідного процесу в порівнянні з аналогічними САК РКК ПА з адаптивними ПІД-регуляторами.

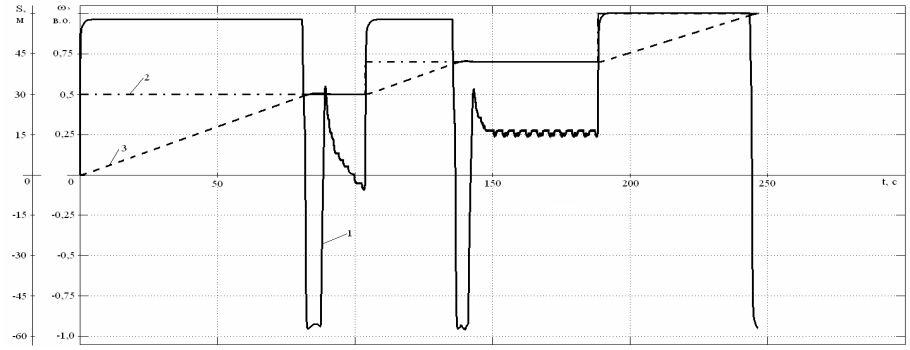
Таким чином, можна стверджувати наступне: особливості налагодження адаптивного ПІД-регулятора дозволяють використовувати його за наявності достовірних функцій зміни внутрішніх обурюючих дій, наприклад, гідродинамічного гальмівного моменту баророзвантаженого асинхронного двигуна. Але в той же час, практич-

но, дуже складно враховувати зовнішні обурюючі дії (набігаючий на ПА потік води, що нелінійно змінюється, нелінійний момент ГГ і т. д.). За наявності достовірного спостерігача та відповідних баз правил цих недоліків позбавлена САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з нечіткими регуляторами.

Розроблено САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами. Проведено моделювання їх роботи [6]. Результати моделювання представлено на рис. 9.



а)



б)

Рис. 9 – Результати моделювання роботи синтезованої САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з адаптивними ПІД-регуляторами (*а*) та нечіткими регуляторами (*б*): *крива 1* – кутова швидкість обертання ГГ; *крива 2* – u_{zad}; *крива 3* – координата горизонтального прямолінійного переміщення ПА.

З графіків рис. 9 видно, що САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами виконали програму переміщення ПА по заданому алгоритму. При цьому в перехідних режимах (розгін, гальмування ПА) САК з нечіткими регуляторами показала більш високу швидкість відпрацювання сигналу.

В результаті порівняння показників якості керування синтезованих САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами отримано збільшення перерегулювання кутової швидкості обертання ГГ при гальмуванні ПА на 12% і точності виведення на задану координату ПА на 29%, час виконання програми переміщення ПА по заданому алгоритму зменшено на 15%. За базовий варіант прийнято САК з адаптивними ПІД-регуляторами.

Для зведення до мінімуму впливу допущень на якість керування системою, необхідно проводити експерименти на конкретному електроприводі, що не завжди можливо, або на його натурній імітаційній моделі. Для цього був розроблений спеціалізований моделюючий комплекс (СМК), до складу якого входить навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1», призначений для дослідження ефективності САК електроприводами будь-якого роду струму РКК ПА і спеціалізоване програмне забезпечення. Фото СМК представлено на рис. 10. Для підтвердження достовірності результатів проведених досліджень було проведено метрологічну атестацію розробленого навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1».

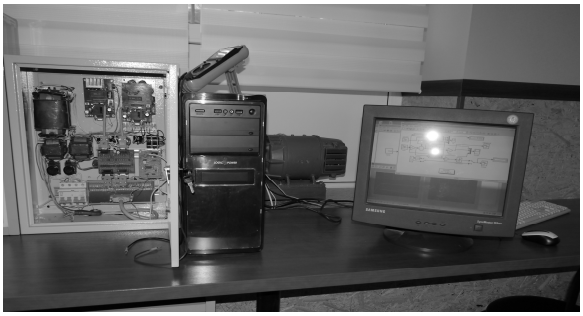


Рис. 10 – Фото спеціалізованого моделюючого комплексу.

Для експериментальних досліджень на СМК САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА, розроблено Simulink – моделі САК РКК по стабілізації кутової швидкості обертання, упору ГГ та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі з синтезованими адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами.Дослідження показали, що синтезовані САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА є стійкими. Розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень незначна й складає 5-8%.

Висновки. 1. На основі системного аналізу удосконалено математичну модель рушійно-кермового комплексу як підводного апарата об'єкту керування при його горизонтальному прямолінійному русі шляхом обліку втрат гальмівного гідродинамічного моменту баророзвантаженого асинхронного двигуна, працюючого у середовищі рідкого діелектрика, що дає змогу створювати високоефективні регулятори та системи автоматичного керування в усьому діапазоні зміни робочої температури та виду діелектрика. 2. Вперше на основі удосконаленої узагальненої структури РКК ПА шляхом введення в неї передатних ланок, які відповідають заданому параметру керування та зворотних зв'язків, що враховують властивості БАД як нелінійного об'єкту керування в залежності від температури та виду діелектрика, синтезовано закони керування САК РКК по стабілізації кутової швидкості обертання, упора гребного гвинта ПА та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі, що дають змогу підвищити ефективність керування підводним апаратом. 3. Вперше синтезовано адаптивний ПІД-регулятор і нечіткий регулятор РКК ПА на базі БАД, які ґрунтуються на отриманих законах керування та в порівнянні з класичними ПІД-регуляторами забезпечують трьохкратне зменшення помилки розугодження при стабілізації упору гребного гвинта ПА, двохкратне зменшення часу перехідного процесу при стабілізації кутової швидкості обертання та швидкості горизонтального прямолінійного переміщення підводного апарата. 4. Удосконалено структуру САК РКК ПА шляхом використання синтезованих адаптивних ПІД-регуляторів і нечітких регуляторів та бібліотеки даних, яка дозволяє здійснювати автоматичний вибір регулятора за наявністю невизначених зовнішніх збурень при горизонтальному прямолінійному русі ПА, що дає змогу підвищити ефективність керування під час переміщення підводного апарата по заданій траєкторії. 5. Розроблено, створено, випробувано, впроваджено у виробництво й в навчальний процес спеціалізований моделюючий комплекс для дослідження ефективності САК електроприводом, призначений для опрацювання в лабораторних умовах алгоритмів і принципів керування, виміру енергетичних і динамічних характеристик електроприводів, до складу якого входить метрологічно атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1».

Список літератури: 1. Агеев М.Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА / М.Д. Агеев // Подводные роботы и их системы. – Владивосток: Дальнаука. – 1995. – С. 33–49. 2. Блинцов В.С. Определение потерь в погружном электроприводе подводного аппарата / В.С. Блинцов, Д.В. Костенко, П Шимчак // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків: НТУ ХПІ. – 2001. – С. 410–411. 3. Блинцов В.С., Красюк А.Н. Особенности создания погружных электромеханических систем для подводной робототехники в целом и для подводных аппаратов в частности / В.С. Блинцов, А.Н. Красюк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 353–355. 4. Волянский С.М. Синтез математической модели системы ДРК ПА как объекта управления / С.М. Волянский // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2014. – № 6. – С. 35–39. 5. Волянский С.М. Синтез законов управления САУ движительно-рулевым комплексом при горизонтальном прямолинейном движении подводного аппарата / С.М. Волянский // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – №8. – С. 44–47. 6. Волянский С.М. Анализ энергоэффективности системы управления движителями подводного аппарата методом компьютерного моделирования / С.М. Волянский // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Кременчуг: 2012. – № 3(19). – С. 472-474. 7. Король Ю.М. Влияние гидродинамических потерь на механические характеристики капсулированных управляемых асинхронных двигателей подводных аппаратов / Ю.М. Король // Сб. науч. трудов – Николаев: НУК, 2004. – № 6. С. 15-24. 8. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu, and Gosine R.G. (1999), Analysis of direct action fuzzy PID controller structures [Text], *ICEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. June 1999*, Vol. 29, Issue 3, pp. 371-378.

Bibliography (transliterated): 1. Ageev M.D. *Uproshchennaya metodika rascheta dvizhiteley dlya APA*. Vladivostok, Dalnauka, 1995, pp. 33-49. Print. 2. Blintsov V.S., Kostenko D.V., Shimchak P. Opredelenie poter v pogruzhnom elektroprivode podvodnogo apparata. // *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut»*. Zbirka naukovikh prats. Tematichniy vipusk 10. – Kharkiv, NTU KhPI, 2001, pp. 410-411. Print. 3. Blintsov V.S., Krasyuk A.N. Osobennosti sozdaniya pogruzhnykh elektromekhanicheskikh sistem dlya podvodnoy robototekhniki v tselom i dlya podvodnykh apparatov v chastnosti // *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut»*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. – № 28. – pp. 353–355. Print. 4. Volyanskiy S.M. Sintez matematicheskoy modeli sistemy DRK PA kak obekta upravleniya. // *Zb. nauk. prats NUK*. Mikolaïv, NUK, 2014, issue 6. – pp. 35-39. Print. 5. Volyanskiy S.M. Sintez zakonov upravleniya SAU dvizhitelno-rulevym kompleksom pri gorizontalnom pryamolineynom dvizhenii podvodnogo apparata. // *Zb. nauk. prats NUK*. – Mikolaïv: NUK, 2015. – issue 8. – pp. 44-47. Print 6. Volyansky S.M. Analiz energoeffektivnosti sistemy upravleniya dvizhitelyami podvodnogo apparata metodom kompjuternogo modelirovaniya. *Problemy avtomatizirovannogo electroprivoda*. Krementchug, Ukraine, 2014, issue 3(19), pp. 472-474. Print. 7. Korol Yu.M. Vliyanie gidrodinamicheskikh poter na mekhanicheskie kharakteristiki kapsulirovannykh upravlyaemykh asinkhronnykh dvigateley podvodnykh apparatov. // *Zb. nauk. prats NUK*. Mykolayiv, NUOS, 2004, issue 6, pp. 15–24. Print. 8. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu, Gosine R.G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures. (1999) *ICEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part B. *Publ*, Vol. 29. Issue 3. pp. 371-378. Print.

Поступила (received) 08.08.2015

УДК 621.83

А. А. КРАВЦОВ, ЧАО «Тяжпромавтоматика, начальник сектора;
А.А.КУПРИЯНОВ, ЧАО «Тяжпромавтоматика», инженер-программист;
Л. Г. ЛИМОНОВ, канд. техн. наук, ЧАО «Тяжпромавтоматика», гл. специалист отдела;
С. В. ПОТАПОВ, ЧАО «Тяжпромавтоматика», гл. специалист отдела;
В. В.СИНЕЛЬНИКОВ, ЧАО «Тяжпромавтоматика», ведущий инженер.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛЕТУЧЕЙ ПИЛЫ В СИСТЕМЕ МЕРНОГО РЕЗА

Вступление. Летучая пила – механизм, предназначенный для разрезания на ходу движущегося проката таких сечений, порезка которых с помощью летучих ножниц не может быть реализована. Такие механизмы используются для разделения на мерные длины заготовки на машинах непрерывного литья заготовок, разделения на мерные длины трубы на трубоэлектросварочных агрегатах (ТЭСА) и в других подобных случаях. Как правило, электропривод летучей пилы работает под управлением системы мерного реза, обеспечивая требуемую точность порезки материала. Ниже изложены основные принципы построения системы управления электроприводами летучей пилы ТЭСА в режиме мерного реза материала. Описанные решения апробированы и могут быть использованы при создании или модернизации аналогичных электромеханических систем.

Следует отметить, что в последние годы в технической литературе вопросам комплексного исследования автоматизированного электроприводов и системы управления мерным резом летучей пилы уделяется мало внимания. Тематика опубликованных в последние годы работ посвящена, как правило, частным проблемам этого электромеханического комплекса [1 –7].

Конструкция. Электромеханический комплекс механизмов летучей пилы ТЭСА разделяет на части заданной длины получаемую на агрегате движущуюся трубу. Известны различные конструкции такого комплекса, включающие электрические, гидравлические и пневматические приводы.

Рассматривается конкретный случай, когда в состав электромеханического комплекса летучей пилы ТЭСА входят четыре основных механизма: передвижения каретки; вращения пильного диска; перемещения пильного диска; сцепки движущейся каретки с трубой. Последние три механизма установлены на каретке.

Каретка приводится в движение регулируемым электродвигателем через цилиндрический редуктор и реечную зубчатую передачу, вращение пильного диска производится нерегулируемым асинхронным электродвигателем, а механизмы перемещения пильного диска и сцепки оснащены электрогидравлическими приводами.

Технологический процесс. Электропривод вращения пильного диска работает в продолжительном режиме, а работа остальных механизмов летучей пилы происходит циклично. Общее время цикла работы состоит из следующих отрезков:

– стоянка каретки, механизмов сцепки и перемещения пильного диска в исходных положениях в промежутке между резами (пауза);
– разгон каретки до скорости движения трубы;
– соединение каретки с трубой с помощью механизма сцепки;
– рез трубы перемещением пильного диска при совместном движении сцепленных трубы и каретки;
– расцепление трубы и каретки после окончания реза;
– торможение и остановка каретки;
– возврат каретки в исходное положение.

С точки зрения управления автоматизированную электромеханическую систему летучей пилы следует отнести к системам повышенной сложности, она предназначена для циклического решения двух основных задач: управление параметрами электродвигателя каретки (ток, момент, скорость вращения) и управление траекторией движения каретки, как рабочего органа. Если первая из этих задач может быть успешно решена с помощью стандартных средств управления современного автоматизированного электропривода с цифровым микропроцессорным управлением, то для качественного решения второй задачи требуется использование дополнительных средств программируемой вычислительной техники.

Основные решения. Современный регулируемый электропривод переменного тока каретки выполняется по системе ПЧ-АД. Учитывая требования к динамике этого электропривода целесообразно применить электродвигатель с высокими динамическими показателями. Такими свойствами обладают, к примеру, электродвигатели новой серии Simotics M 1PH8 фирмы Siemens, эти электродвигатели ориентированы на применение в системах частотного электропривода с питанием от преобразователей частоты с цифровым микропроцессорным управлением серии Sinamics S120 фирмы Siemens [8; 9]. Электродвигатель каретки оснащается импульсным датчиком скорости, векторная система автоматического регулирования скорости цифровая микропроцессорная.

© А.А.Кравцов, А.А.Куприянов, Л.Г.Лимонов, С.В. Потапов, В.В.Синельников, 2015

Для построения программируемой автоматизированной системы мерного реза используются вычислительные возможности программируемого контроллера, в качестве которого может быть использован, например, контроллер серии Simatic S7-300, фирмы Siemens [10 – 11]. Необходим датчик скорости движения трубы, например, импульс-ный датчик, установленный на ролике, он приводится во вращение движущейся трубой.

Рассмотрим возможные варианты построения алгоритмов работы электроприводов и автоматизированной системы мерного реза на временных отрезках цикла.

Разгон каретки из исходного положения.

В режиме разгона каретки из исходного положения до достижения рабочей скорости движения трубы, система автоматического регулирования (САР) электропривода представляет собой САР скорости электродвигателя с регулятором скорости пропорционально-интегрального действия. Задание скорости на вход регулятора подается от программируемого контроллера через задатчик интенсивности (ramp-function generator) [9], сигнал задания соответствует линейной скорости трубы V_T. Этот сигнал формируется в программируемом контроллере с использованием сигнала импульсного датчика скорости трубы. Задатчик интенсивности электропривода настраивается на минимально возможное время разгона электропривода до максимальной рабочей скорости. Это время, как правило, ограничено не допустимой перегрузкой электродвигателя, а возможностями механического оборудования привода перемещения каретки (реечное зацепление). Структурная схема электропривода в режиме разгона представлена на рис.1.

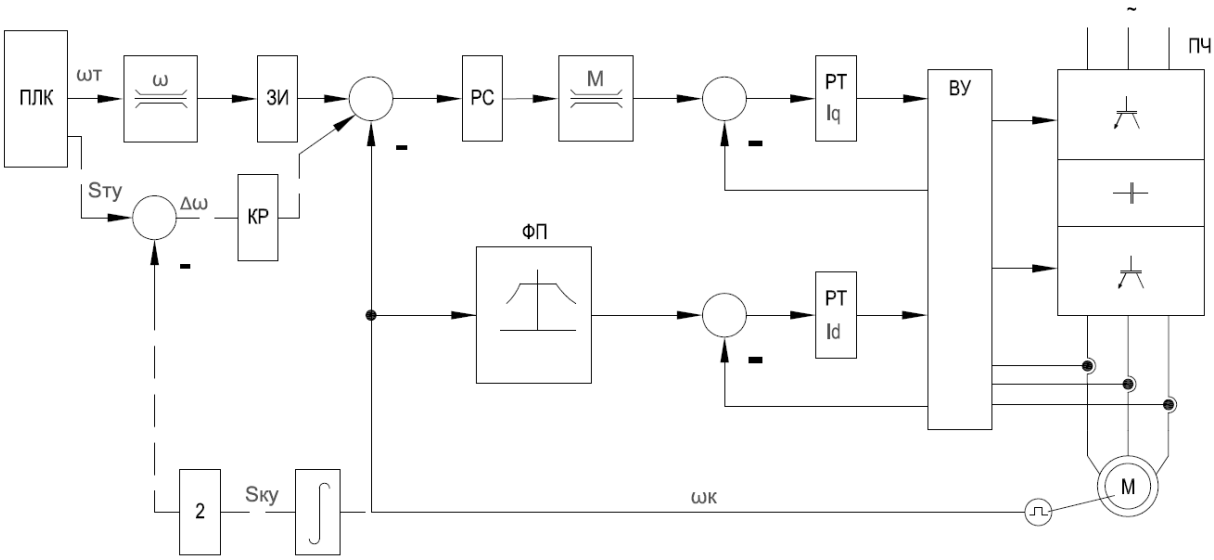


Рис.1 Структурная схема электропривода каретки в режиме разгона

После подачи команды на разгон, система регулирования электропривода обеспечивает разгон каретки до заданной рабочей скорости трубы по линейному закону с постоянным ускорением. Степень приближения траектории разгона электропривода к прямой линии влияет на точность отрезаемой трубы. Если точность недостаточна, в систему регулирования скорости предлагается ввести дополнительный корректирующий регулятор РК задания скорости каретки (на рис. 1 показан пунктиром). На входе этого регулятора производится сравнение величины S_{TY} пути, проходимого в процессе разгона каретки трубой, эта величина формируется в программируемом контроллере с использованием сигнала датчика скорости трубы, и удвоенной величины S_{KV} пути каретки за то же время, эта величина формируется в модуле CU320 системы управления электроприводом. Корректирующий П-регулятор может быть реализован в программируемом контроллере или в системе управления электроприводом, последний вариант предпочтительнее, так как обеспечивает большее быстродействие контура коррекции. При идеальном линейном разгоне, как известно, величина пути каретки в два раза меньше.

Одновременно в программируемом контроллере производится вычисление полного пути каретки S_K с использованием сигнала импульсного датчика на валу электродвигателя каретки.

Соединение каретки с трубой. Скорость каретки V_K сравнивается в контроллере со скоростью трубы V_T, и, когда они станут равны, контроллер формирует сигнал на перемещение механизма сцепки. Если используется корректирующий регулятор, то условием формирования указанного сигнала является нулевой выход корректирующего регулятора. Происходит сцепление каретки с трубой.

Рез трубы. Практически одновременно контроллер формирует команду на рез, по этой команде начинается движение пильного диска и отрезание трубы, а в САР электропривода каретки вводится ограничение момента до величины $(0{,}05-0{,}1)M_H$.

Вычисление пути S_K каретки продолжается, а величина длины трубы, прошедшей от момента начала движения каретки до момента начала движения пильного диска L_{TP}, запоминается.

Пильный диск производит отрезание трубы при совместном движении трубы и каретки в сцепленном состоянии. Окончание реза и возвращение пильного диска в исходное положение фиксируется сигналом соответствующего конечного выключателя.

Расцепление трубы и каретки. По срабатыванию этого конечного выключателя в программируемом контроллере формируется команда на расцепление каретки и трубы.

Возврат каретки в исходное положение. После очень небольшой выдержки времени на отведение каретки от трубы происходит возврат каретки в исходное положение. Возможны два варианте работы электропривода каретки в режиме возврата.

Первый вариант возврата каретки реализуется путем перестройки САР электропривода в трехконтурную САР положения с П-регулятором положения в третьем контуре. На входе этого регулятора сравнивается нулевой сигнал задания и величина пути S_K, пройденного кареткой с момента начала движения, как сигнал обратной связи. Действие регулятора положения обеспечит торможение электропривода каретки с темпом, определяемым задатчиком интенсивности, до полной остановки и последующий реверс электропривода до максимальной скорости с остановкой в исходном положении каретки. Структурная схема системы регулирования электропривода каретки для такого варианта режима возврата показана на рис.2

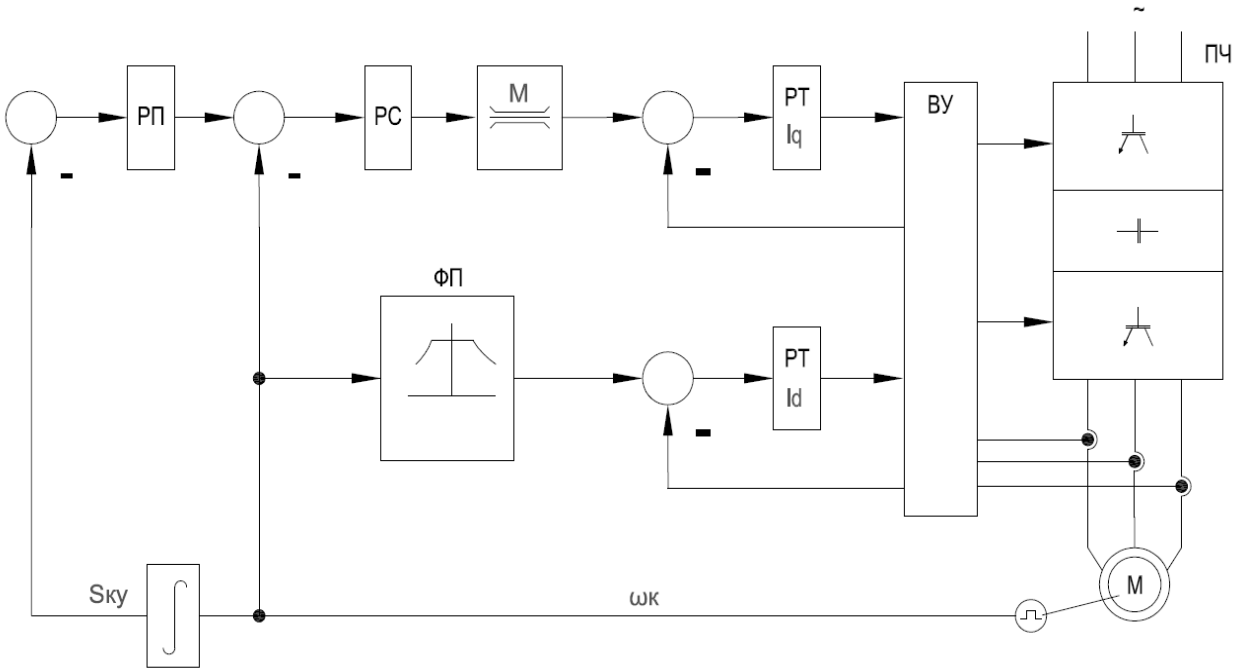


Рис.2. Структурная схема электропривода каретки в режиме возврата в исходное положение

Отметим, что указанный регулятор положения может быть реализован в программируемом контроллере или с использованием возможностей модуля управления преобразователя частоты CU320. Последний вариант предпочтительнее, так как он обеспечивает более высокое быстродействие, а следовательно и точность.

При использовании второго варианта возврата каретки после расцепления трубы и каретки в САР электропривода каретки производится увеличение величины ограничения момента до $(1{,}5-1{,}7)M_H$, и на вход регулятора скорости подается отрицательный сигнал задания максимальной величины скорости электропривода. Это обеспечит торможение электропривода с темпом, определяемым задатчиком интенсивности, до полной остановки, и последующий разгон его до максимальной скорости возврата каретки. Для остановки каретки в исходном положении используется сигнал соответствующего конечного выключателя, установленного на пути движения каретки. В этом варианте координата точки остановки каретки является плавающей, что впоследствии учитывается при определении момента начала разгона каретки для следующего реза.

В исходном положении каретка находится до момента начала движения для производства следующего реза. Момент начала движения каретки определяется, когда будет выполнено равенство

$$L_0 - L_{TP} - L_T = 0\,, \quad (1)$$

где L_0 – заданная длина отрезаемой трубы; L_T – текущая длина трубы с момента начала движения пильного диска для производства реза, отсчитываемая в программируемом контроллере с использованием импульсного датчика на трубе.

При использовании описанного алгоритма управления электроприводом каретки при выполнении реза, ошибка в точности отрезаемой длины трубы может происходить под влиянием следующих основных факторов:

– проскальзывание ролика импульсного датчика на трубе;

– изменение диаметра ролика импульсного датчика на трубе вследствие истирания поверхности ролика;

– отклонения скорости движения трубы

– отклонения траектории движения электропривода каретки от линейной при разгоне.

Уменьшение влияния первых двух факторов может быть достигнуто применением соответствующих организационных мероприятий: регулярный контроль диаметра ролика и замена износившегося, контроль состояния поверхности ролика и усилия прижатия.

Для уменьшения влияния двух последних факторов система управления служит контур динамического позиционирования с введением дополнительного корректирующего регулятора положения для коррекции скорости каретки в процессе разгона.

Описанные автоматизированный электропривод и система мерного реза успешно реализованы на трубоэлектросварочном агрегате №1 ТЭСА 20-76 ПАО «Коминмет».

Выводы. Современный частотный электропривод, обладающий высокими динамическими показателями, в сочетании с применением программируемого контроллера позволяет выполнить требования, предъявляемые системой мерного реза к быстродействию и точности отработки траектории движения, что обеспечивает требуемую точность порезки трубы на мерные длины. На практике реализованный алгоритм системы мерного реза трубы обеспечил получение требуемой точности порезки во всем диапазоне заданных длин и сортамента труб.

Список литературы: 1. Червяков В. Д. Летучие механизмы как класс рабочих машин в аспекте задач управления / В. Д. Червяков, А. А. Паныч //Электротехнические системы и комплексы. Сборник трудов.– Магнитогорск : МГТУ. – 1998. – Вып.3. – С. 176 – 182. 2. Червяков В. Д. Двухрежимное управление электроприводом несущего органа летучей пилы / В. Д. Червяков, А. А Паныч // Вісник ХДПУ. Збірка наукових праць. Тематич. вип.. 61.– Харків : ХДПУ. – 1999. – С. 233 – 234. 3. Червяков В. Д. Задачи ресурсосберегающего управления электроприводом несущего органа летучей пилы / В.Д. Червяков, А. А. Паныч //Вісник НТУ ХПІ. Збірка наукових праць. Тематич. вип. 10. –Харків : НТУ ХПІ. – 2001. – С. 370 – 371. 4. Паныч А. А. Сетевая модель рабочего цикла летучей пилы / А. А. Паныч // Труды СумГУ. – 1999. 5. Червяков В. Д. К построению объектной модели системы управления электроприводом несущего органа летучей пилы / В. Д. Червяков, А. А. Паныч // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. – Кременчуг : – 2000 – Вып.1. С. 281– 286. 6. Панич А. О. Обмеження ривка в двохрежимній системі управління електропривода несучого органа летучої пили / А.О. Панич, М. О. Петренко //Вісник КДПУ. – 2007. –Ч. 1. – Вип. 3(44). 7. Червяков В. Д. Объектно-ориентированные системы управления процессами движения машин / В. Д. Червяков, А. А. Паныч, А. М. Щекотов, А. А. Доброжан // Изд. СумГУ. – 2009. – 55с. 8. SIMOTION, SINAMICS S120 & SIMOTICS Equipment for Production Machines. Motion Control. Catalog PM21, Edition 2013. SIEMENS AG 2013. 9. Sinamics S., (2007), List manual. 10. SIMATIC ST 70 Products for Totally Integrated Automation. Catalog ST70, Edition 2014. SIEMENS AG 2014. 11. SIMATIC PC PC-based Automation Human Machine Interface Systems PC-based Automation. Catalog ST 80/ST PC, Edition 2014. SIEMENS AG 2014.

Bibliography (transliterated): 1. Cherviakov V.D., and Panich A.A Letuchie mehanizmi kak klass rabochih mashin v aspekte zadach upravlenia [Volatile Mechanisms as a Class Machines in the Aspect of Management Tasks], (1998), *Sbornik Trudov.* Magnitogorsk, Russian Federation, *MGTU,* Vol. 3, pp. 176 – 182 (In Russian). 2. Cherviakov V.D., and Panich A.A Dvuhregimnoe upravlenie elektroprivodom nesuschego organa letuchei pili [Dual-mode Drive Control of the Carrier Body Flying saw], (1999), *Visnik HDPU, Zbirka Naukovih Prats. Tematichni* Vol. 61, Kharkov, Ukraine, *HDPU,* pp. 233 – 234 (In Russian). 3. Cherviakov V.D., and Panich A.A. Zadachi resursosberegaiuschego upravlenia elektroprivodom nesuschego organa letuchei pili [eng], (2001), *Visnsk NTU HPI. Zbirka Nauovih Prts. Tematichni Vipusk* 10, Kharkov, Ukraine, *NTU HPI,* pp. 370 – 371 (In Russian). 4. Panich A.A. Setevaia model rabochego cikla letuchei pili [Network Model Runtime Flying saw], *Trudi SumGU.* 1999 (In Russian). 5. Cherviakov V.D., and Panich A.A. К postroeniyu obiektnoi modeli sistemi upravlenia elektroprivodom letuchei pili [Construction of the Object Model of Motor Control of the Carrier Body Flying saw], (2000), *Problemi Sozdania Novih Mashin I Tehnologii. Nauchnie trudi KGPI.* Vol.1, Kremenchug, Ukraine, *KGPI,* pp .281 – 286 (In Russian). 6. Panich A.A., and Petrenko A.O. Obmegennia rivka v dvohregimni sistemi upravlinnia elektroprivoda nesuschego organa letuchei pili [Restrictions Dvohrezhymniy Break-through in Electric Control System of the Carrier Body Flying saws], (2007), *Visnik KDPU,* Vol. 3(44), Chaste 1 (In Ukraine). 7. Cherviakov V.D., Panich A.A., Schekotov A.M., and Dobrogan A.A. Objektno-orientirovanie sistemi upravlenia processami dvigenia mashin [Object-oriented Process Control System Motion Machines], (2009), *Izd. SumGU,* 55 p. (In Russian). 8. SIMOTION, SINAMICS S120 & SIMOTICS Equipment for Production Machines. Motion control. Catalog PM21, Edition 2013. SIEMENS AG 2013. 9. Sinamics S., (2007)б List manual. 10. SIMATIC ST 70 Products for Totally Integrated Automation. Catalog ST70, Edition 2014. SIEMENS AG 2014. 11. SIMATIC PC PC-based Automation Human Machine Interface Systems PC-based Automation. Catalog ST 80/ST PC, Edition 2014. SIEMENS AG 2014.

Поступила (received) 17.06.2015

УДК 622.6

И. В. ОБРУЧ, ст. преподаватель, НТУ «ХПИ»;
Ю. Н. КУТОВОЙ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ».

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА АРП14 С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

Введение. Традиционные методы управления, основанные на классических понятиях теории автоматического управления для линейных систем, к настоящему времени достигли достаточного совершенства. В принципе, используя, например, методы модального управления или систем подчиненного регулирования, можно синтезировать системы, обеспечивающие высокое качество как статических, так и динамических показателей регулирования координат электропривода. При аналитическом синтезе параметров подобных систем широко используются матричные, корневые, топологические методы, получившие существенное развитие в последнее время.

Однако, такое управление требует введения внешних обратных связей по большинству координат электропривода. Это не только усложняет систему, но и затрудняет ее реализацию, когда необходимо иметь информацию о трудно измеряемых координатах, таких как, например, упругий момент в определенной кинематической связи. Использование наблюдателей для измерения подобных координат существенно усложняет электромеханическую систему. Другим недостатком таких систем может быть невозможность реализации синтезированных законов управления по различным причинам.

Очевидно, устранить вышеуказанные недостатки можно было бы введением в систему такого нелинейного регулятора, который, имел на входе информацию по легко измеряемым одной или нескольким координатам и обеспечивал бы требуемое управление электроприводом. К таким регуляторам могут быть отнесены нейроконтроллеры – технические устройства, построенные на базе искусственных нейронных сетей различной организации, которые могут быть реализованы при помощи различных аппаратных средств или микропрограммно.

Постановка задачи. Как показали ранее проведенные исследования [1, 2], для реализации замкнутых систем управления с нейронной сетью для управления электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения вполне достаточно одной обратной связи по скорости электродвигателя, с дискретизацией по времени и одним звеном чистого запаздывания. В этих работах [1, 2] механическая часть электропривода была представлена одномассовой расчетной схемой. Однако, в реальных системах электроприводов кинематические связи не являются абсолютно жесткими и поэтому представление электромеханической системы как одномассовой может приводить к существенным ошибкам. Упругие элементы могут стать причиной возникновения резонансных режимов, появления [3] больших динамических перегрузок в элементах электропривода, развития усталостных явлений и отказов. Если при синтезе системы не учтены упругие кинематические связи, то это может привести к отличию характера движения исполнительного органа и вала электродвигателя от расчетных, то есть к нарушению заданного режима работы механизма. Таким образом возникает задача синтеза нейросетевой системы управления двухмассовой электромеханической системы с электродвигателем последовательного возбуждения.

Материалы исследований. На рис. 1 представлена структурная схема нейросетевой системы управления двухмассовой электромеханической системы с электродвигателем последовательного возбуждения, которая отличается от рассмотренных ранее [1, 2] наличием упругого звена и второй массы.

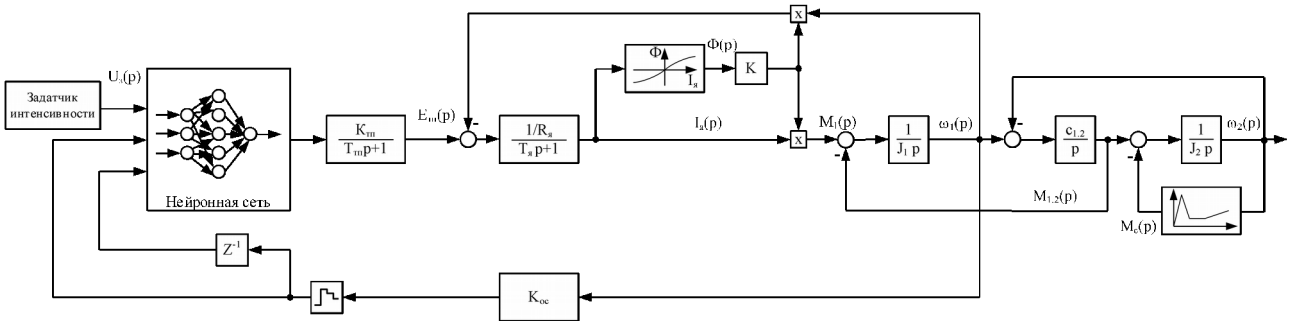


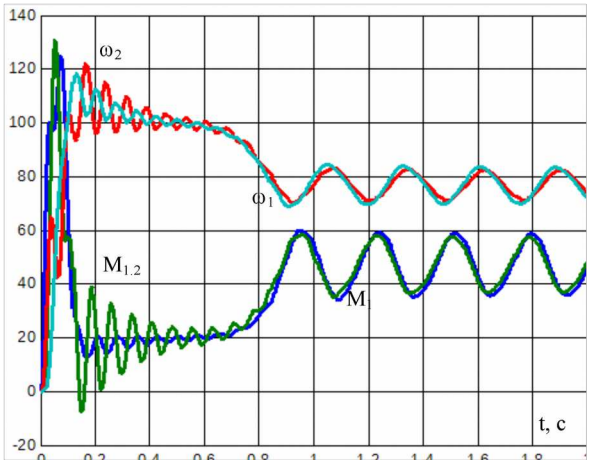
Рисунок 1 – Структурная схема нейросетевой системы управления двухмассовой электромеханической системы с электродвигателем последовательного возбуждения

Переходные процессы и динамические характеристики в такой разомкнутой системе представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2 в данной разомкнутой системе возникают фрикционные автоколебания скорости первой (ω_1) и второй масс (ω_2), момента электродвигателя (M_1) и упругого ($M_{1,2}$), которые обусловлены нелинейностью механической характеристики

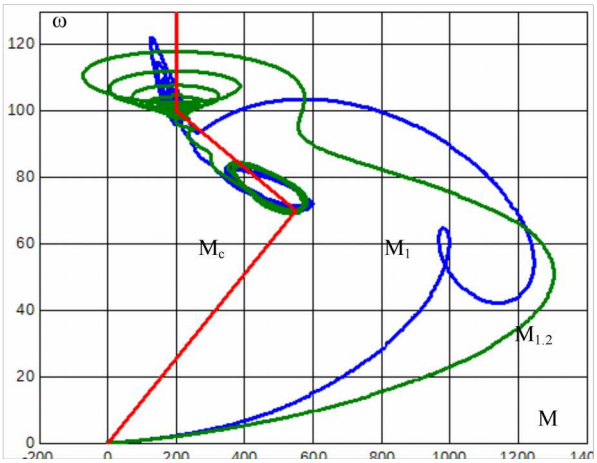
© И.В. Обруч, Ю.Н. Кутовой, 2015

и наличии «падающего» участка нагрузки, на котором находится рабочая точка электропривода.

Данный динамический режим приводит к росту динамических нагрузок на кинематические части электропривода рудничного электровоза, что в свою очередь увеличивает износ и количество поломок колесных пар [3], сокращению срока службы электропривода и возрастанию эксплуатационных расходов на неплановые ремонты и обслуживание.



а) переходные процессы
(масштабный коэффициент для момента равен 10)



б) динамические характеристики

Рисунок 2 – Переходные процессы и динамические характеристики при прямом пуске электропривода рудничного электровоза АРП14

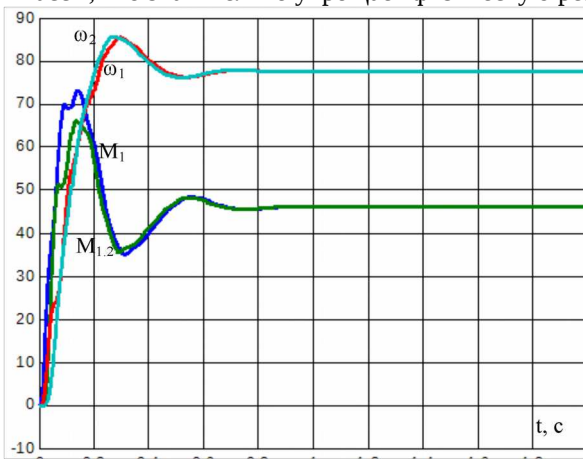
В общем случае, при применении регуляторов на базе нейронных сетей при изменении объекта регулирования, нейрорегулятор необходимо заново обучать каким-либо методом, например, методом генетического алгоритма [4]. Однако, нейронные сети, на базе которых построены нейрорегуляторы, обладают рядом свойств не присущих традиционным аналоговым системам управления. Одним из важнейших свойств нейронных сетей, благодаря которым, имеется возможность построения нейросетевых систем управления электроприводами – это свойства *обобщения* и *универсальной аппроксимации* [5, 6]. В процессе обучения весовые коэффициенты и сдвиги нейронных сетей настраиваются так, чтобы сеть аппроксимировала выходные данные хранящиеся в предъявляемых ей тренировочных сигналах, поэтому в конце процесса обучения сеть запоминает все тренировочные данные, то есть правильно реагирует на тестовые входы. Однако кроме способности помнить тренировочные сигналы, сеть обладает свойством обобщать данные, предъявляемые ей при обучении. Термин обобщение для обученной нейронной сети обозначает явление, когда осуществляемое ею преобразование вход-выход верно, как для тренировочных данных, так и для тестовых данных, не использовавшихся при тренировке. Обобщение возникает в нейронной сети как следствие хорошей нелинейной интерполяции входных данных, главным образом благодаря непрерывности и гладкости активационной функции самих нейронов.

В результате, имеется вероятность того, что ранее обученная нейронная сеть для какого-либо объекта регулирования, сможет работать и для другого объекта электропривода, если данные объекты не очень сильно отличаются по параметрам или структуре. В предыдущих статьях был рассмотрен синтез нейросетевых систем управления для одномассового электропривода рудничного электровоза АРП14, работающие с реактивной [1] или фрикционной [2] нагрузкой, и показана возможность построения замкнутых систем управления для электроприводов с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения на основе нейронных сетей. Поэтому, прежде чем синтезировать нейрорегултор для двухмассовой электромеханической системы рудничного электровоза АРП14, проверим ее работу с уже полученной нейронной сетью, синтезированной для одномассовой электромеханической системы с фрикционной нагрузкой структуры NN3-10-1.

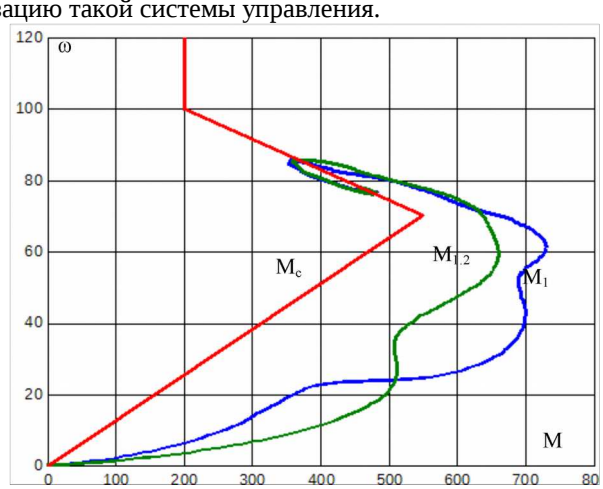
Переходные процессы и динамические характеристики в двухмассовой нейросетевой системе управления при пуске от задатчика интенсивности электропривода рудничного электровоза АРП14 с нейрорегулятором, синтезированным для одномассовой системы представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, нейронная сеть, синтезированная для одномассовой электромеханической системы электропривода рудничного электровоза АРП14 легко справилась с задачей управления этого же объекта регулирования при условии рассмотрения его механической части как двухмассовой расчетной схемы, т.е. при учете упругости кинематических связей данного электропривода. При этом были достигнуты следующие показатели качества переходного процесса: перерегулирование скорости электродвигателя – 10,1%, перерегулирование скорости исполнительного механизма – 10,4%, статическая ошибка регулирования скорости – 2,7%.

Одним из преимуществ такой нейросетевой системы управления является то, что требуемый закон управления был синтезирован с помощью единственной, легко измеряемой, обратной связью по скорости электро-

двигателя (скорости первой массы), не возникло необходимости использовать обратную связь по скорости второй массы, что значительно упрощает физическую реализацию такой системы управления.



а) переходные процессы
(масштабный коэффициент для момента равен 10)



б) динамические характеристики

Рисунок 3 – Переходные процессы и динамические характеристики в нейросетевой системе управления при пуске от задатчика интенсивности электропривода рудничного электровоза АРП14

Выводы. Для нейросетевой системы управления двухмассовым электроприводом рудничного электровоза АРП14 имеется возможность использовать нейронную сеть, синтезированную для данного электропривод без учета упругости кинематических связей механической части. При этом были получены следующие показатели качества переходного процесса: перерегулирование скорости электродвигателя – 10,1%, перерегулирование скорости исполнительного механизма – 10,4%, статическая ошибка регулирования скорости – 2,7%.

Список литературы: **1**. *Обруч И. В., Кутовой Ю. Н.* Замкнутые системы управления электроприводом с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения на базе нейронных сетей // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: «Проблемы автоматизированного ЭП: Теория и практика», спец. выпуск №36, 2013, сс. 485 – 487. **2**. *Обруч И. В., Кутовой Ю. Н.* Нейросетевая система управления электропривода электровоза АРП14 // Электротехнические и компьютерные системы № 15 (91). Изд. «Техника», Киев, 2014, сс. 132 – 135. **3**. *Шахтарь П. С., Ренгевич А. А.* Причины поломок осей рудничных электровозов // Сб. Вопросы рудничного транспорта. – М.: Госгортехиздат, 1962. – сс. 192 – 203. **4**. *De Jong K.* A. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective // In: Process of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1985. – pp. 167 – 177. **5**. *Hornik K., Stinchcombe M., White H.* Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators // Neural Networks. – 1989. – Vol. 2. – pp. 359 – 366. **6**. *Narendra K.S., Parthasarathy K.* Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. on Neur. Net. 1990. – vol. 1. № 1. – pp. 4 – 27.

Bibliography (transliterated): **1**. *Obruch I. V., Kutovoi Yu. N.* Zamknutye sistemy upravleniya elektroprivodom s dvigatelem postoyannogo toka posledovatel'nogo vozbuzhdeniya na baze neironnykh setei // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: «Problemy avtomatizirovannogo EP: Teoriya i praktika», spets. vypusk №36, 2013, ss. 485 – 487. **2**. *Obruch I. V., Kutovoi Yu. N.* Neirosetevaya sistema upravleniya elektroprivoda elektrovoza ARP14 // Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy № 15 (91). Izd. «Tekhnika», Kiev, 2014, ss. 132 – 135. **3**. Shakhtar' P. S., Rengevich A. A. Prichiny polomok osei rudnichnykh elektrovozov // Sb. Voprosy rudnichnogo transporta. – M.: Gosgortekhizdat, 1962. – ss. 192 – 203. **4**. *De Jong K.* A. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective // In: Process of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms, 1985. – pp. 167 – 177. **5**. *Hornik K., Stinchcombe M., White H.* Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators // Neural Networks. – 1989. – Vol. 2. – pp. 359 – 366. **6**. *Narendra K.S., Parthasarathy K.* Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. on Neur. Net. 1990. – vol. 1. № 1. – pp. 4 – 27.

Поступила (received) 06.07.2015

УДК 622.6

О.Н. СИНЧУК, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. АЭПТС ГВУЗ «Криворожский национальный ун-т»
А.Б. СЁМОЧКИН, канд. техн. наук, доц. каф. АЭПТС ГВУЗ «Криворожский национальный ун-т»
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преп. каф. АЭПТС ГВУЗ «Криворожский национальный ун-т»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ВЕЛИЧИНУ УДАРНОГО УСИЛИЯ В СЦЕПНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПАРЫ «ЭЛЕКТРОВОЗ-ВАГОНЕТКА» ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОМ

Введение. Как известно, транспортировка железорудного сырья (ЖРС), добываемого подземным способом, от мест добычи к шахтным стволам, осуществляется внутришахтным транспортом (ВШТ), представляющие собой электровозосоставы, ведомые специальными типами двухосных, так называемых рудничных, электровозов [1-4]. В определенной мере ВШТ можно считать одним из «узких» мест, сдерживающих дальнейшую интенсификацию и экономическую эффективность добычи ЖРС подземным способом [5]. Немаловажным фактором, усугубляющим высветленную проблему, является постоянно увеличивающееся число повреждений слагаемых элементов ВШТ, в том числе электровозов и вагонеток [6]. Так, в 2010-2015 г.г. общее количество повреждений только по ВШТ ПАО «Криворожский железорудный комбинат» увеличилось в 1.8 раза. Основной причиной такого явления являются: износ элементов ВШТ из-за увеличения сроков внеплановой эксплуатации, человеческого фактора, и, как и прежде, динамические удары, вызванные тем, что электровозы, ведущие электровозосоставы, более чем 60% времени цикла функционируют в неустановившихся- переходных режимах их тяговых электромеханических систем (ТЭМС), что и вызывает ударные динамические нагрузки, сопровождающиеся запредельными по условиям гарантийной эксплуатации ударами (соударениями) в элементах электровозосостава. Особенно это характерно для мест сцепки «электровоз-вагонетка» и «вагонетка- вагонетка». Если учесть, что в электровозосоставах, эксплуатируемых в железорудных шахтах, применяются не автосцепки, а примитивные сцепные устройства с ограниченным уровнем смягчения естественных ударных нагрузок, то эта проблема становится особенно очевидной, а ее решение – актуальным.

Постановка задачи: исследование и оценка причин возникновения динамических процессов в элементах ВШТ и разработка методов и средств минимизации этих воздействий средствами систем управления тяговыми электромеханическими системами рудничных электровозов.

Материалы исследований. Как уже отмечалось, на ВШТ нередки выходы из строя механической части электровозосоставов, к чему приводит довольно напряженный график пуско-тормозных режимов рудничных ТЭМС при загрузке-разгрузке руды. Сказанное можно пояснить с помощью иллюстрации (рис. 1):

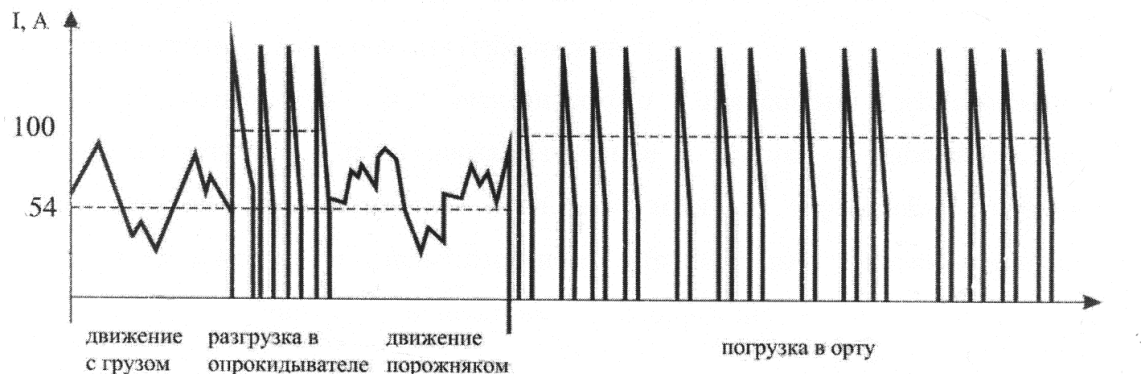


Рис. 1. Аппроксимированные нагрузочные диаграммы тяговых электроприводов контактных электровозов в цикле движения по подземным горизонтам отечественных железорудных шахт

Как видно, в цикле функционирования ВШТ доминируют переходные режимы. В исследованиях, проведенных профессорами Ренгевичем А.А., Шахтарем П.С., Клепиковым В.Б. [7,8] и рядом других ученых, задекларировано, что максимальные продольно-динамические нагрузки в буферно-сцепных устройствах ВШТ возникают при переходных режимах движения в процессе трогания и торможения поезда.

Проанализируем влияние факторов на величину ударных усилий в сцепных устройствах элементов, предполагая первоначально, что перемещение пары «электровоз-вагонетка» осуществляется на некоторое расстояние, согласно графику:

© О.Н. Синчук, А.Б. Сёмочкин, В.А. Федотов В.А. 2015

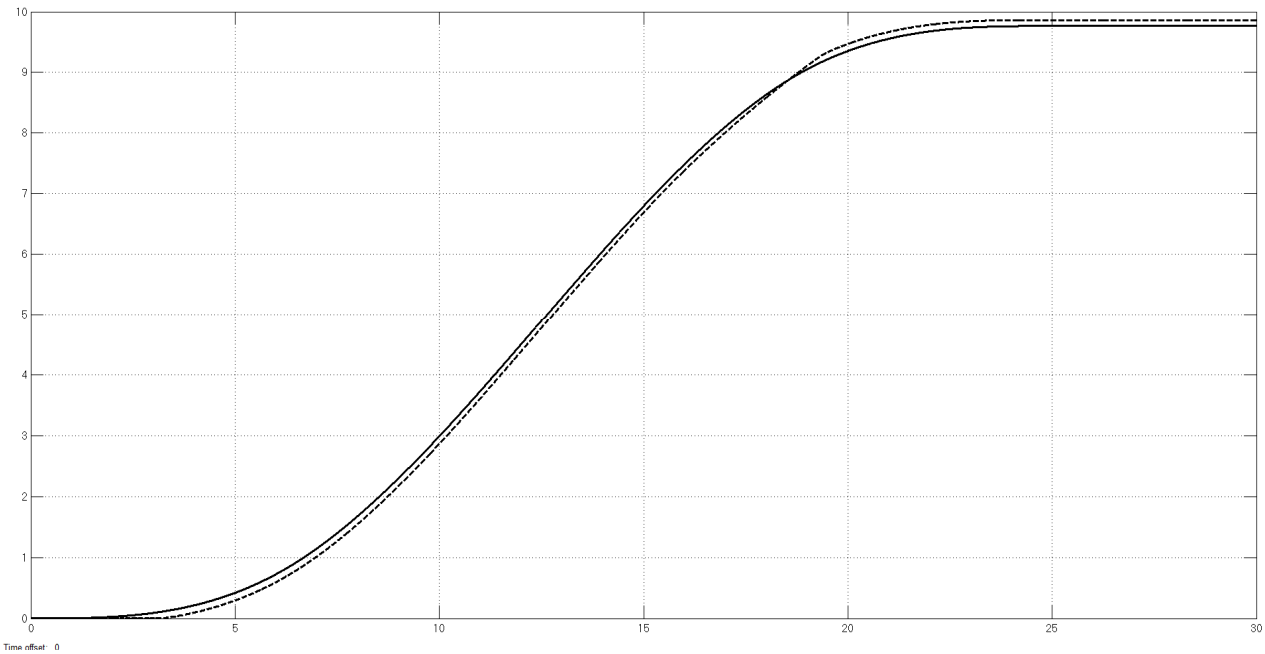


Рис. 2. Графики перемещения электровоза и вагонетки

Этот график перемещения обеспечивается с помощью формирования скорости электровоза следующей формы (рис. 3):

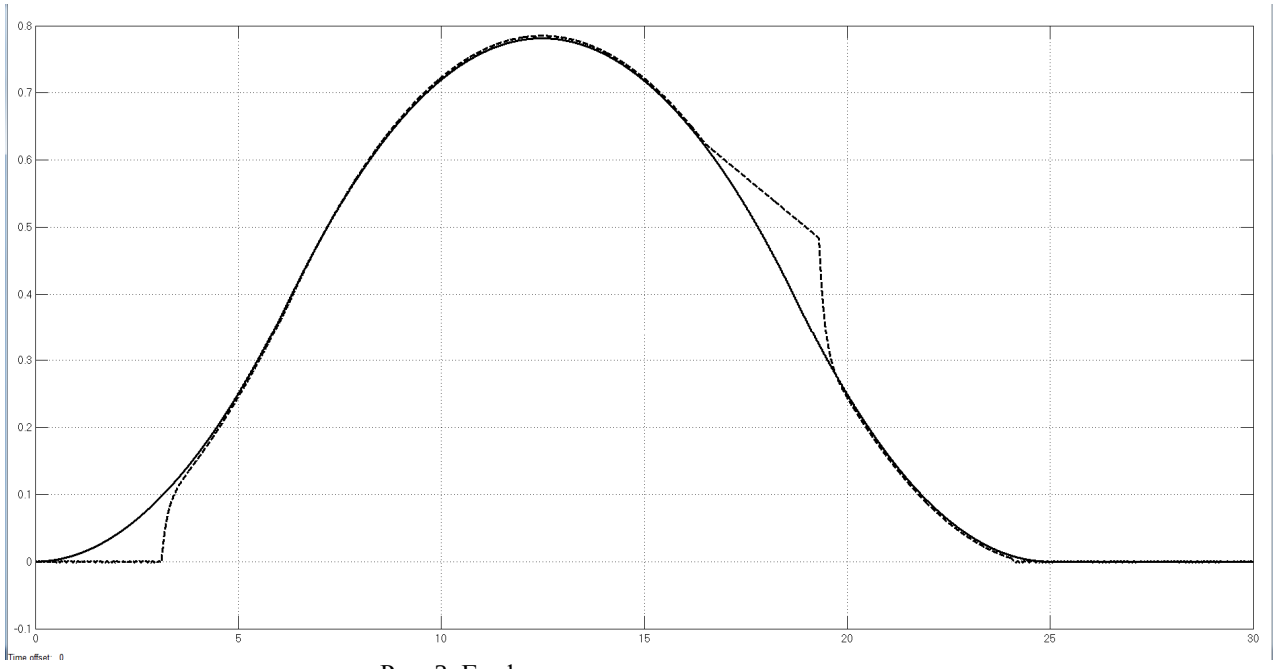


Рис. 3. Графики скорости электровоза и вагонетки

Изменение ударных усилий в сцепном устройстве приведен0 на рис. 4:

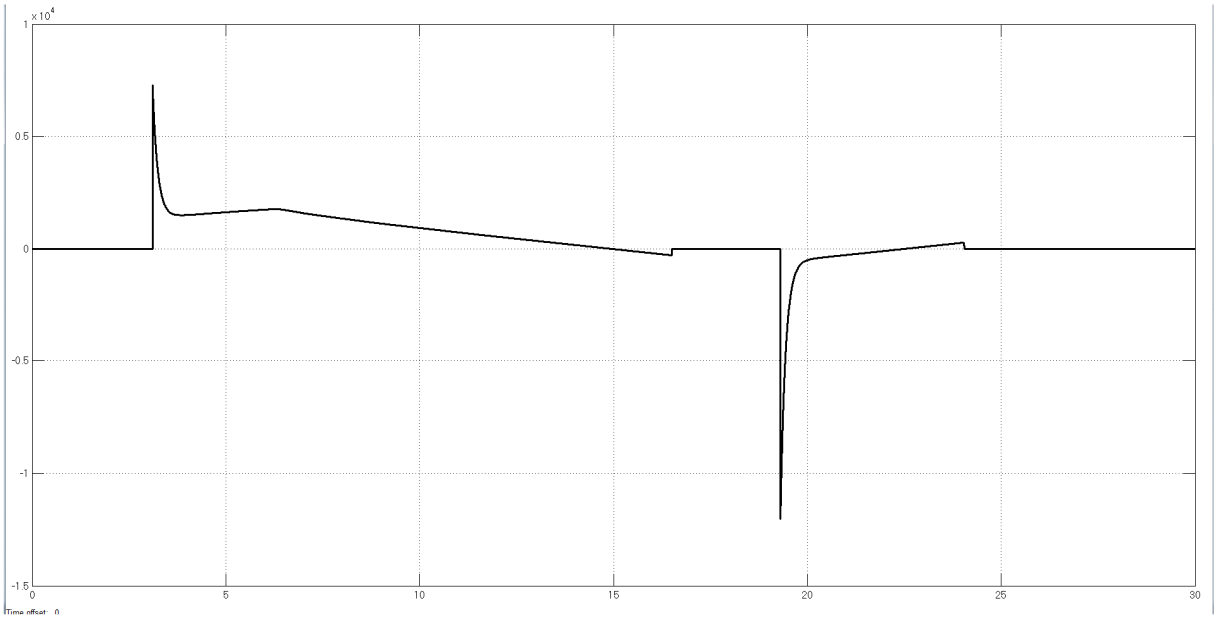


Рис. 4. Ударные усилия в сцепном устройстве при соударении в разные стороны друг от друга (положительный «выброс») и соударении навстречу друг другу (отрицательный «выброс»)

Характер ударов в сцепном устройстве становится понятен по фотоиллюстрациям рис. 5.

Изо всех графиков переходных процессов нас больше всего интересует рис. 4, так как именно на нем видны упругие удары в сцепных устройствах.

Оценим влияние на показатели переходных процессов следующих факторов:

-рывка электровоза J (принимается в диапазоне от 1 до 3);

-момента трогания вагонетки Mtr (принимается в диапазоне от 0 до 600Н);

-зазора в сцепном устройстве Z (принимается в диапазоне от -0.01 до 0.01 м);

-массы вагонетки $m_{вг}$ (принимается в диапазоне от 2130 до 16270 т).

Задание скорости рывком принимается в силу того, что график скорости (рис. 3) при этом получается состоящим из параболических участков, что должно смягчить колебания в упругой системе.

Рис. 5. Иллюстративное фото двух крайних положений спепного устройства электровозосостава

В силу выбранной тактики исследований оценим влияние этих факторов на предельную величину силы упругости в сцепке. Используем для этого теорию планирования экспериментов. Для этого составляем план 4-факторного эксперимента [9], с помощью которого проводим на модели 25 вычислительных экспериментов при различных значениях параметров, указанных в таблице в кодированных единицах.

Для реализации вычислительных экспериментов (и получения графиков рис. 2, 5, 4) была построена модель в Матлабе вида рис. 6

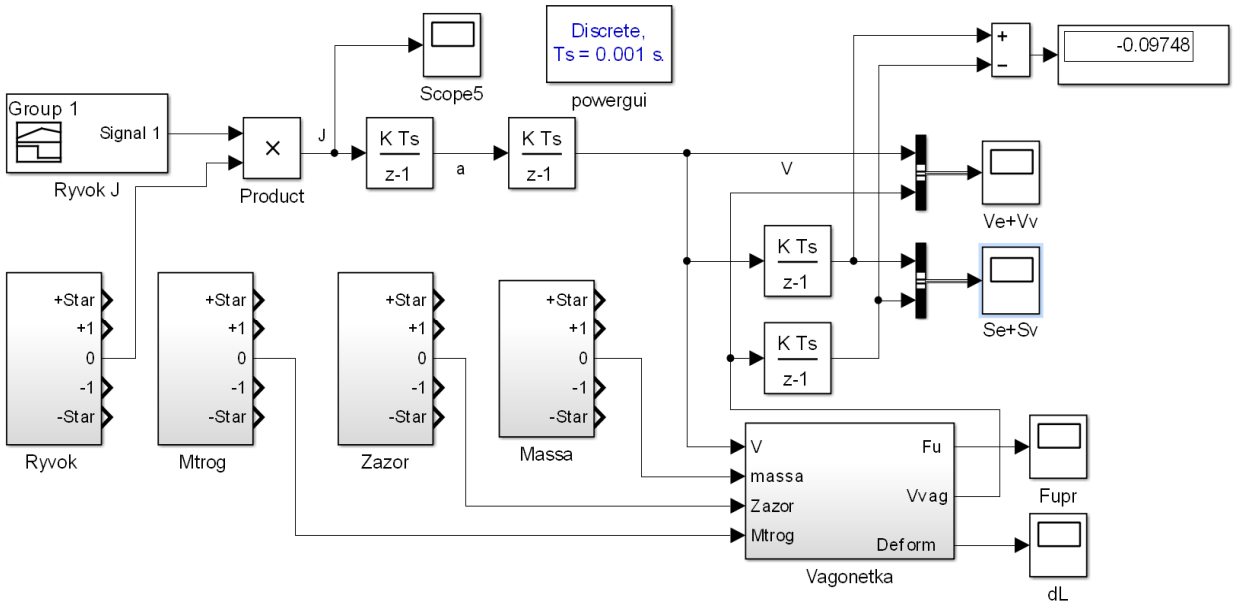


Рис. 6. Модель для проведения экспериментов в паре «электровоз-вагонетка»

Опуская подробности выполнения процедур теории планирования экспериментов, приведем готовый результат - полную функцию отклика:

$$Fy+ = 7119{,}6+791{,}9\cdot J+0.035\cdot Mtr-3669\cdot Z+0.135\cdot m_{вг}-15{,}7\cdot J^2+110.8\cdot Mtr^2-640.4\cdot Z^2+110.8\cdot m_{вг}^2- 0.04\cdot J\cdot Mtr-452.6\cdot J\cdot Z+0.08\cdot J\cdot m_{вг}+0.08\cdot Mtr\cdot Z-0.04\cdot Mtr\cdot m_{вг}+0.21\cdot Z\cdot m_{вг} \quad (1)$$

где Fy+ - предельные величины «положительных» выбросов упругого усилия на графиках рис. 4.

После отсева незначащих коэффициентов, приводящих к разбросу выходной величины в 5 %, получим сокращенную запись выражения функции отклика:

$$Fy+ = 7119{,}6+791{,}9\cdot J+0.035\cdot Mtr-3669\cdot Z -15{,}7\cdot J^2+110.8\cdot Mtr^2-640.4\cdot Z^2+110.8\cdot m_{вг}^2-0.04\cdot J\cdot Mtr-452.6\cdot J\cdot Z \quad (2)$$

Расчет значений функции отклика по полной и сокращенной формам представления показал, что при наихудших условиях (при максимальной ударной силе упругости) разница между ними составляет не более 0,00086%, то есть практически совпадают.

При сравнении расчетных значений для всех 25 экспериментов, полученных с помощью упрощенной функции отклика, с аналогичными экспериментальными значениями, можно увидеть, что максимальная ошибка достигает 5.18% при средневзвешенной ошибке 0.55 %

При анализе упрощенной записи функции отклика с помощью оператора Maximize програмного пакета Mathcad было установлено, что наибольшего значения функция отклика достигает при следующем сочетании величин факторов:

$$\text{рывок } J = 1;\ \text{зазор } Z = -1;\ \text{момент трогания } Mtr = 1;\ \text{масса } M = 1. \quad (3)$$

Считаем в дальнейшем эти значения самыми жесткими условиями протекания переходных процессов.

Проанализируем полученную функцию отклика отдельно по факторам:

С помощью графиков рис. 7, 8, 9, 10 и аналитически установлено, что чувствительность выходной величины функции отклика отдельно по факторам (в пределах монотонных участков графиков) составляет для:

рывка	1245 (Н/о.е.)
усилия трогания	220 (Н/о.е.)
величины зазора в сцепке	8245 (Н/о.е.)
веса вагонетки	220 (Н/о.е.).

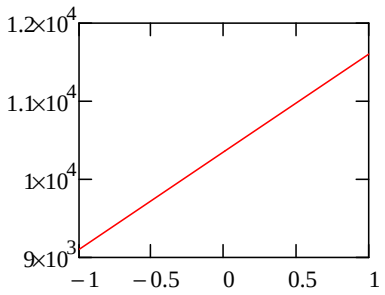


Рис. 7. Зависимость ударной силы упругости в функции рывка скорости

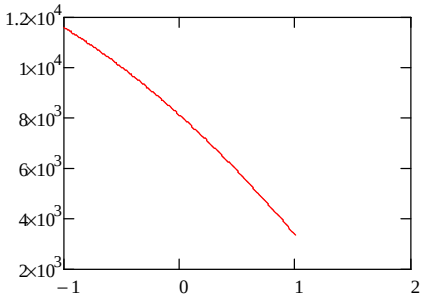


Рис. 8. Зависимость ударной силы упругости в функции величины зазора сцепки

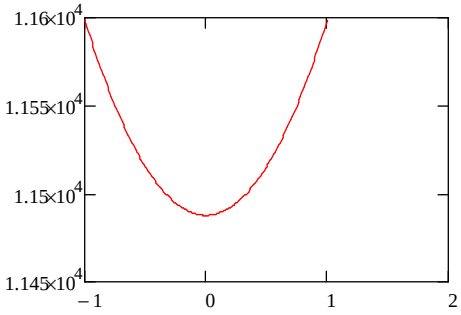


Рис. 9. Зависимость ударной силы упругости в функции усилия трогания (минимальное значение 11490 Н при 0 (то есть массе вагонетки 9200 кг))

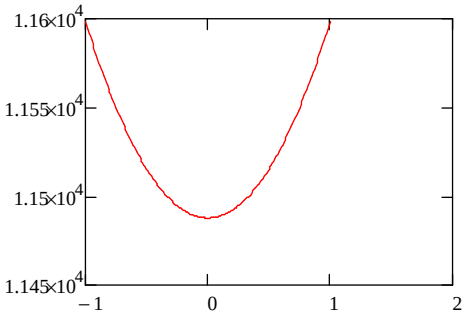


Рис. 10. Зависимость ударной силы упругости в функции веса вагонетки (минимальное значение 11490 Н при 0 (то есть массе вагонетки 9200 кг))

Особое внимание на себя обращает факт, что вес вагонетки и усилие трогания (по сути вес вагонетки также определяет сопротивление, только постоянное) одинаково мало по сравнению с другими факторами влияют на ударную силу упругости. Так, во всем пространстве факторов ударная сила упругости изменяется на 11600 -11490 = 110 Н. По сравнению с номинальной силой натяжения сцепного устройства эта величина мала, и ею можно пренебречь.

Несмотря на то, что усилие трогания быстро исчезает, на ударную величину упругой силы усилие трогания влияет независимо от того, каково будет в дальнейшем сопротивление движению, и потом никак не сказывается. По этой причине усилие трогания можно в дальнейшем не учитывать, и вносить его априори (при исследованиях ударных сил упругости) в момент сопротивления движению вагонетки.

На ударную упругую силу в сцепке, как видим, наибольшим образом влияют в основном два фактора – рывок и начальный зазор в сцепном устройстве, на это косвенно также указывает то, что после отсева незначащих коэффициентов функции отклика остается единственный коэффициент, учитывающий взаимодействие рывка и зазора (-452,6).

И последнее. Незначительное влияние массы вагонетки и усилия трогания можно объяснить тем, что мы воздействуем на вагонетку через электровоз с помощью жесткой тахограммы скорости, при этом очевидно, что обратная связь по сопротивлению отсутствует.

Необходимо отметить, что при отработке электровозом заданной тахограммы скорости необходимо следить за предотвращением буксования колес, так как в противном случае тахограмма искажается, и использование функции отклика приводит к ошибкам.

Окончательно были проведены аналогичные исследования пары «электровоз-вагонетка» при условии формирования электровозом заданного тягового усилия. Естественно ожидать, то картина динамики должна значительно измениться, хотя бы в силу того, что скорость электровозосостава будет определяться совокупностью сил тяги электровоза, сопротивления движению, и инерцией движущихся масс.

Для проведения указанных исследований тяговое усилие электровоза по аналогии с вышеприведенным формировалось с учетом постоянства рывка. Аналогичные проведенные исследования с помощью теории планирования экспериментов по влиянию факторов тех же факторов J ; Z ; Mtr; M на максимальную величину ударного усилия в сцепках оказались неудачными. Была получена функция отклика, для которой максимальная ошибка между расчетными и экспериментальными значениями в области определения функции отклика без «звездных» точек составляет 62% при средневзвешенной ошибке 11.26%. Полученные результаты указывают на провал текущей попытки получить адекватную функцию отклика при формировании заданного тягового усилия электровоза.

Но это отнюдь не означает, что задачу в данном направлении невозможно решить. Возможно, задача имеет адекватное решение при сужении областей определения факторов функции отклика, либо при некоторой другой форме тягового усилия. Пока что можно констатировать, что снижение упругих ударов проще осуществить при формировании заданного графика скорости электровоза.

Выводы.

1. Возможности управления переходными процессами шахтным электропоездом значительно выше при формировании заданной тахограммы движения электровоза, нежели при формировании заданного усилия электровоза.
2. Наибольшее влияние на формирование ударных усилий оказывают зазор в сцепных устройствах, и рывок скорости (в значительно меньшей степени) электровоза.
3. Данные результаты определяют дальнейшее направление исследований по построению систем автоматического управления скоростью шахтных поездов в русле заданной тахограммы движения электровоза. При этом необходимо следить, чтобы не было пробуксовок колес электровоза, в противном случае управление движением с использованием функции отклика становится невозможным.

Список литературы: **1.** Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой коньюктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг. / *Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик* и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011 . **2.** *Дебелый, В. Л.* Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта [Текст] / *В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников* // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С. 30–31 **3.** *Синчук О.Н.* Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / *О.Н. Синчук, С.В. Лебедкин, И.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько* // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83 – 92. **4.** *Синчук О.Н.* Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / *О.Н. Синчук, В.В. Чумак, О.В. Ержов* // Под ред. д. т. н., проф. О.Н. Синчука – К.: АДЕФ – Украина. – 278 с. **5.** *Азарян А.А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманиц Ф.І., Колосов В.О., Моркун В.С., Пілов П.І., Сидоренко В.Д., Темченко А.Г., Федоренко П.Й.* Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с. **6.** *Синчук О.Н.,Синчук И.О., Чёрная В.О.*Система защиты рудничного электровоза переменного тока от аварийных режимов. Электротехника. Ежемесячный научно-технический журнал. Вып. №4(апрель) – М.: «Знак», 2012 – С.52 – 56 **7.** *Шахтарь П.С.* Рудничне локомотивы. М.: Недра. – 1982. – 272 с.
8. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография/ В.Б.Клепиков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с. 9. Ивоботенко Б.А. др. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия. 1975. – С.184. 10. Жеребкин Б.В. Синтез структуры системы векторного управления тяговых электромеханических комплексов двуосных электровозов / Б.В. Жеребкин, Д.А. Шокарев, Е.И. Скапа // Електромеханічні і енергозберігаючісистеми: щоквартальнийнауково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. № 4/2011(16). – С.17–21. 11. Кордаков В.Н., Коржев А.А. Методика определения рациональной величины силы тяги дополнительного линейного электропривода рудничного электровоза // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. – Вып. 29. – СПб.: СЗТУ, 2003. – С. 120 – 125.

Bibliography (translated): 1. *Sbornik tehniko-ekonomicheskyh pokazateley gornodobyvayushih predpriyatiy Ukrainy в 2009 – 2010 гг. Analiz mirovoy kon'uktury rynka GRS* 2004 – 2011 *gg.* / E.K. Babets, L.A. Shtan'ko, V.A. Salganik i dr. – *Kryvoy Rog: Vydavnichiy dim*, 2011. Print. 2. Debelyi, V. L. *Osnovnye napravleniya razvitiya shahtnogo locomotivnogo transporta [Tekst*] / V. L. Debelyi, L. L. Debelyi, S. A. Mel'nikov // *Ugol' Ukrainy*. – 2006. – *№*6. – *S.* 30–31. Print **3.** Sinchuk O.N. *Perspektivy razvitiya shahtnyh (rudnichnyh) elektrovozov s energosberegayucshimi vidami tyagovyh elektropryvodov* / O.N. Синчук, S.V. Lebedkin, I.O. Sinchuk, O.A. Udovenko, O.V. Pas'ko // *Visnyk Shidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodymyra Dalya. Lugans'k: SNU im. V. Dalya*. – 2006. – № 8 (102). – *S*. 83 – 92. **4.** Sinchuk O.N. *Impul'sni sistemy upravleniya i zacshity na rudnichnom elektrovoznom transporte* / O.N. Sinchuk, V.V. Chumak, O.V. Erzchoff *// Pod red. d. t. n., prof.* O.N. Sinchuka – K.: ADEF – Ukraina. – 278 с. **5.** Azarjan A.A., Vilkul Ju.G., Kaplenko Ju.P., Karamanic F.I., Kolosov V.O., Morkun V.S., Pilov P.I., Sidorenko V.D., Temchenko A.G., Fedorenko P.J. *Kompleks resurso- i energozberigajuchih geotehnologij vidobutku ta pererobki mineral'noї sirovini, tehnichnih zasobiv їh monitoringu iz sistemoju upravlinnja i optimizaciї girnichorudnih virobnictv – Krivij Rig: Mineral*, 2006. – 219 s**. 6.** Sinchuk O.N.,Sinchuk I.O., Chjornaja V.O. *Sistema zashhity rudnichnogo jelektrovoza peremennogo toka ot avarijnyh rezhimov. Jelektrotehnika. Ezhemesjachnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. Vyp*. №4(aprel') – *M.: «Znak»*, 2012 – *S*.52 – 56 **7.** Shahtar' P.S. *Rudnichne lokomotivy. M.: Nedra*. – 1982. – 272 s. **8.** *Dinamika jelektromehanicheskih sistem s nelinejnym treniem: monografija*/ V.B.Klepikov. – *H.: Izd-vo «Pidruchnik NTU «HPI»»*, 2014. – 408 s**. 9.** Ivobotenko B.A. dr. *Planirovanie jeksperimenta v jelektromehanike. M.: Jenergija*. 1975. – *S*.184. **10.** Zherebkin B.V. *Sintez struktury sistemy vektornogo upravlenija tjagovyh jelektromehanicheskih kompleksov dvuosnyh jelektrovozov* / B.V. Zherebkin, D.A. Shokarev, E.I. Skapa // *Elektromehanichni i energozberigajuchisistemi: shhokvar-tal'nijnaukovo-virobnichij zhurnal. – Kremenchuk: KrNU*, 2011. – *Vip*. № 4/2011(16). – *S*.17–21. **11.** Kordakov V.N., Korzhev A.A. *Metodika opredelenija racional'noj velichiny sily tjagi dopolnitel'nogo linejnogo jelektroprivoda rudnichnogo jelektrovoza* // *Problemy mashinovedenija i mashinostroenija: Mezhvuz. sb*. – *Vyp*. 29. – *SPb.: SZTU*, 2003. – *S*. 120 – 125.

Получено (received) 25.08.2015

УДК 621.314

О. О. ШКУРПЕЛА, асп. УкрДУЗТ, Харків;
С. І. ЯЦЬКО, канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Харків;
І. О. ТУКАЛОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ».

АНАЛІЗ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ МОДЕРНІЗОВАНОГО ТЕПЛОВОЗА ЧМЕ3М З ДВОМА СИЛОВИМИ УСТАНОВКАМИ

Вступ, постановка задачі. Необхідність модернізації системи тягової електропередачі (ТЕП) рухомого складу залізниць обумовлена постійним підвищенням вимог до енергетичної ефективності, екологічного навантаження та експлуатаційної надійності модернізованих тепловозів. Серед різних варіантів підвищення енергоефективності найбільш широко застосовуються ТЕП з накопичувачами енергії – акумулятори різних типів або суперконденсатори, також застосовують декілька силових установок однакової або різної потужності. Окрему перспективну групу тепловозів займають газодизель ні тепловози, які використовують більш дешеве та екологічне пальне.

На даний час, незважаючи на широке використання асинхронного тягового електроприводу на різних рухомих одиницях, продовжуються інтенсивна модернізація тепловозів з ТЕП змінно-постійного струму.

Мета роботи полягає в розробці та проведенні досліджень математичної моделі тягової електропередачі модернізованого тепловозу ЧМЕ3М з двома силовими установками.

Матеріали та результат дослідження.

ТЕП модернізованого маневрового тепловозу ЧМЕ3М має в своєму складі два тягових генератора ТГ1 та ТГ2, тягових випрямлячів ТВ1 та ТВ2 та шість тягових двигунів ТЕД1 – ТЕД6. Тягові випрямлячі виконані по трифазній мостовій схемі та з’єднані по виходу послідовно. Функціональна схема ТЕП ЧМЕ3М представлена на рисунку 1 [1].

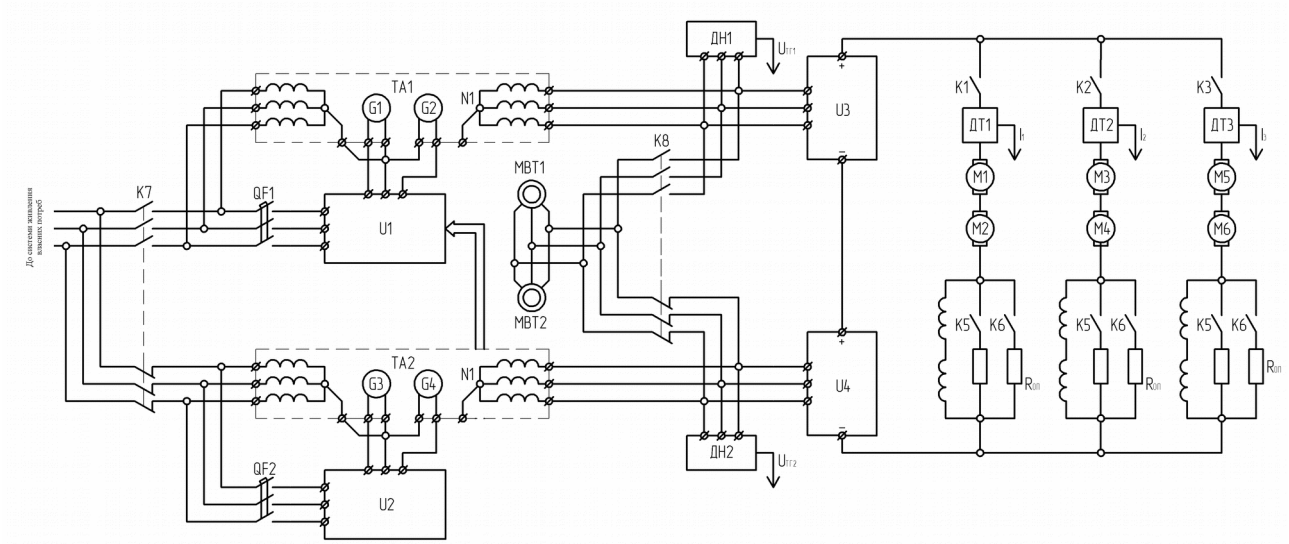


Рис.1 Функціональна схема ТЕП ЧМЕ3М

Робота тягової електропередачі у режимі обмеженої потужності (з використанням однієї силової установки) принципово не відрізняється від роботи серійних маневрових тепловозів з ТЕП змінно-постійного струму. Для використання повної потужності тепловоза застосовується друга силова установка. Тому, на відміну від тепловозів ТЕМ14 та ТЕМ33 при роботі двох силових установок є можливість спочатку використати потужність першої силової установки, а потім, при необхідності, використовувати потужність обох силових установок, що дозволить зменшити витрати палива. Тягова характеристика тепловоза ЧМЕ3М представлена на рисунку 2 [1].

© О.О. Шкурпела, С.І. Яцько, І.О. Тукалов, 2015

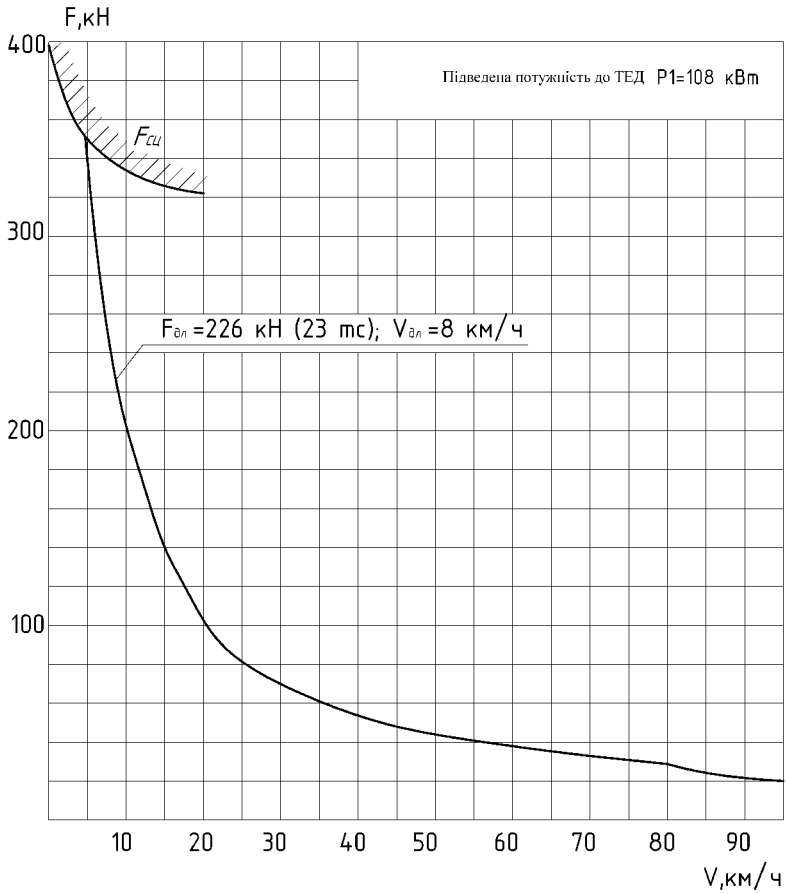


Рис.2 Тягова характеристика тепловоза ЧМЕ3М

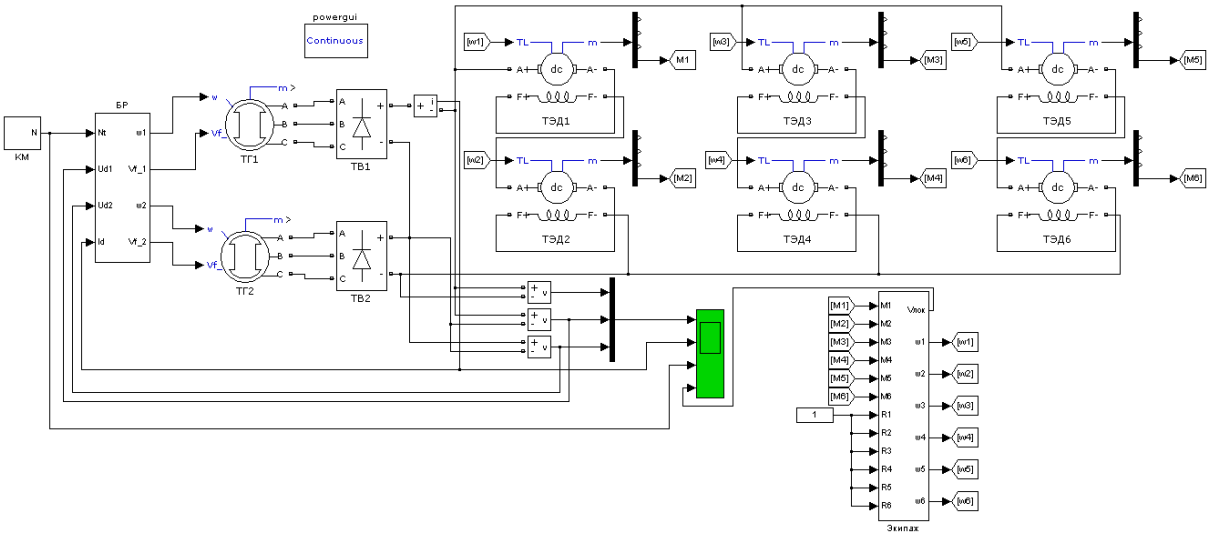


Рис.3 Математична модель ТЕП маневрового тепловозу ЧМЕ3М

Для перевірки роботи ТЕП маневрового тепловозу ЧМЕ3М була розроблена математична модель у програмному середовищі MATLAB [2]. Дана модель має в своєму складі два синхронних тягових генератори (ТГ1, ТГ2), два тягових випрямлячі (ТВ1, ТВ2), шість тягових двигунів (ТЭД1 – ТЭД6), блок, що імітує опір руху маневрового тепловозу (Экипаж) та блок керування (БР). Блок імітації опору руху дозволяє проводити дослідження штатних та аварійних (боксування, юз) режимів роботи ТЕП, імітувати навантаження тепловозу у ви-

гляді грузових чи пасажирських вагонів встановленої маси та кількості, а також імітувати опір від зміни профілю шляху.

У даних дослідженнях розгін тепловозу проводився на прямій ділянці шляху без вагонів. На рисунку 4 представлений процес розгону тепловоза з використанням повної потужності обох силових установок. Для подальшого розгону необхідно застосування режиму послаблення поля. На рисунку 5 представлена випрямлена напруга силових установок при розгоні.

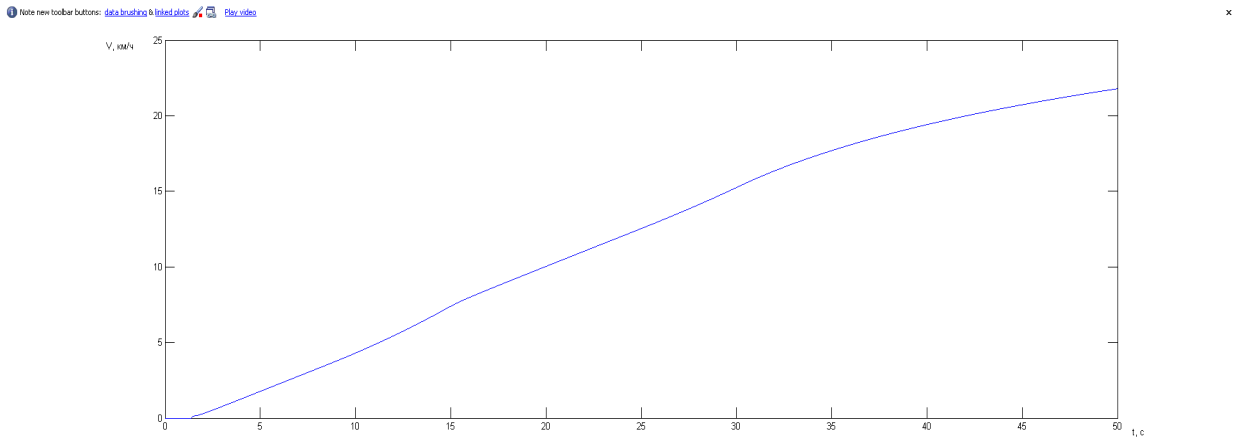


Рис.4 Розгін тепловозу з використанням повної потужності двох силових установок

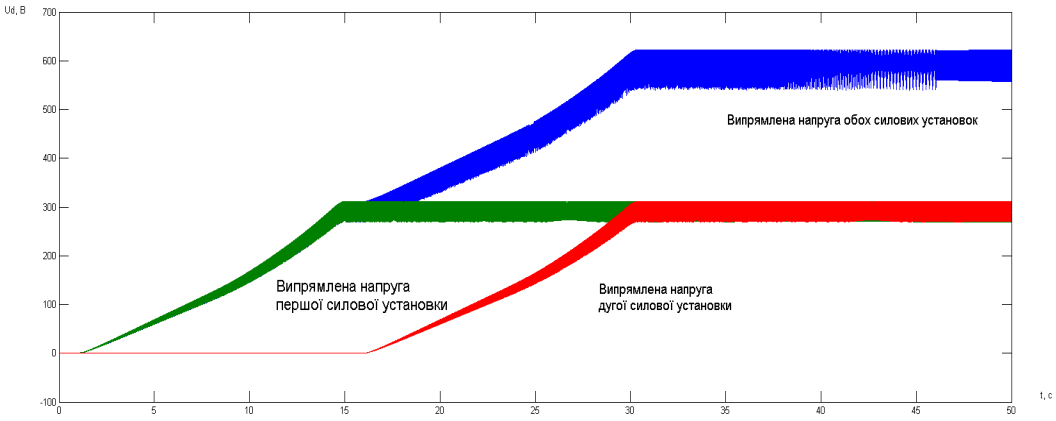


Рис.5 Напруга двох силових установок при розгоні

Висновки. Розроблена математична модель ТЕП модернізованого тепловозу ЧМЕ3М з двома силовими установками. Проведений аналіз роботи обраної системи ТЕП при роботі двох силових установок, а також у автоматичному режимі з роботою на повній потужності тепловоза вказує на відповідність характеристик модернізованого тепловозу вимогам часу. Дана модель може бути використана для уточнення алгоритму системи регулювання з метою забезпечення необхідних динамічних та енергетичних характеристик системи тягової електропередачі модернізованого маневрового тепловозу ЧМЕ3М.

Список використаних джерел: 1. Электрическая передача модернизированого тепловоза ЧМЭ3М с двумя дизель-генераторными агрегетами. Техническое описание., Харьков, 2015. – 18 с. **2.** *Дьяконов В.П.* MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала».-М.:СОЛОН-Пресс, 2005.-576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Elektricheskaya peredacha modernizirovanogo teplovoza CHME3M s dvumja dizel-generatornyumi agregatami. Technicheskoe opisanie., Harkow, 2015. – 18 s. 2. Djakonov V.P. MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6 v matematike I modelirovanii. Serija «Biblioteka profesionala» .-M.:SOLON-Press. 2005.-576 s.

Надійшла (received) 31.07.2015

УДК 621.83

Г. А. СИВЯКОВА, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой КГИУ, Темиртау, Казахстан;
Л. Г.ЛИМОНОВ, канд. техн. наук, главн. специалист ЧАО «Тяжпромавтоматика», Харьков

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСРЕДСТВОМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Введение. Задача резервирования электроприводов возникает при проектировании, внедрении или модернизации электроприводов промышленных механизмов или установок, технологический процесс которых предъявляет повышенные требования к надежности и бесперебойности их функционирования. Примеры таких механизмов можно найти в металлургической, химической, горнодобывающей и других отраслях промышленности, где даже временная потеря работоспособности электропривода отдельного механизма способна привести к большому экономическому ущербу для производства, для экологии или к человеческим жертвам.

Постановка задачи. Одним из наиболее распространенных и эффективных способов повышения надежности электроприводов следует считать резервирование. Способ резервирования и объем резервируемой части промышленного электропривода определяется, в первую очередь, требованиями, предъявляемыми технологическим процессом к допустимому времени возможного простоя оборудования в случае аварийного выхода из строя электропривода, а также требованиями экономичности принимаемых решений.[1, 2]

Как известно, основными составляющими регулируемого электропривода являются электродвигатель, регулирующий источник питания и аппаратура защиты и коммутации. Резервирование приводного электродвигателя в большинстве случаев нецелесообразно и применяется крайне редко по ряду причин: высокая надежность современных электродвигателей, требуемое усложнение конструкции привода, наконец, увеличение стоимости. Поэтому основными объектами резервирования в подавляющем большинстве случаев становятся остальные составные части электропривода. Особое значение приобретает резервирование регулируемых электроприводов с современными источниками питания, оснащенными цифровыми микропроцессорными системами управления. Рассмотрим, как это может быть выполнено для конкретных электроприводов.

Материалы исследования. Основными критериями при оценке эффективности резервируемого электропривода являются время, затрачиваемое на переход от рабочего к резервному варианту работы электропривода, что определяет длительность прерывания технологического процесса, и экономичность, определяемая величиной начальных затрат на оборудование, монтаж, наладку и ввод в действие электропривода.

Электроприводы постоянного тока. На рис. 1 представлены примеры однолинейных схем резервирования однодвигательных электроприводов малой и средней мощности с переключением якорной цепи и цепи обмотки возбуждения.

В первом варианте выполнено резервирование тиристорного преобразователя (рис. 1, а), защитной и коммутационной аппаратуры, а во втором (рис. 1, б) – резервируется только тиристорный преобразователь. Выбор типа коммутирующих устройств (QS2, QS3, QS4), переключающих электродвигатель на резервное питание, имеет большое значение. В первую очередь, это определяется возможным временем, которое по технологическим условиям может быть использовано для перевода электродвигателя на резервную схему питания. При необходимости минимизации этого времени, в качестве коммутирующих устройств необходимо использовать контакторы или другие дистанционно управляемые аппараты, в этом случае переключение производится за минимальное время. Если же время переключения не лимитировано, то переключение может производиться вручную, с использованием обычных переключателей, например, если режим работы резервируемого электропривода - кратковременный.

Следует отметить, что применение управляемых аппаратов для переключения приводит к некоторому снижению надежности электропривода, но такое решение имеет немаловажное преимущество: переключение на резерв производится самим оперативным персоналом промышленной установки, без привлечения работников электрослужбы. Это сокращает время простоя технологического оборудования, но требует некоторого увеличения начальных затрат.

При разработке схемы переключения на резервное питание регулируемого электропривода, в состав которого входят датчики скорости или положения, следует уделить особое внимание вопросу использования этих датчиков (тахогенератор, импульсный датчик скорости, датчик положения) в рабочем и резервном вариантах схемы управления.

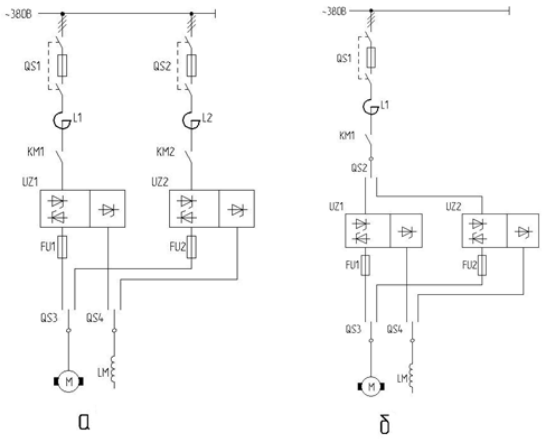


Рис. 1 Резервирование однодвигательного электропривода постоянного тока

© Г. А. Сивякова, Л.Г. Лимонов, 2015

Однодвигательные тиристорные электроприводы постоянного тока большой мощности, как правило, подключены к сети напряжением 6 –10 кВ через индивидуальные понижающие силовые трансформаторы. Соответственно, по аналогии с вышеописанными вариантами, резервирование таких электроприводов может быть выполнено тремя способами: с резервированием только тиристорных преобразователей, с резервированием тиристорных преобразователей, коммутирующей и защитной аппаратуры низкого напряжения и с резервированием тиристорных преобразователей, коммутирующей и защитной аппаратуры низкого напряжения, а также силового трансформатора и высоковольтного выключателя. Описанные варианты отличаются величиной начальных затрат.

Способы и схемы резервирования двухдвигательного электропривода постоянного тока в определенной степени зависят от кинематической схемы электропривода. Так, при работе электродвигателей на один вал или на общий редуктор, в некоторых случаях возможно применение резервирования путем установки электродвигателей заведомо завышенной мощности. Тогда при выходе из строя одного из электродвигателей, второй принимает на себя всю или значительную часть нагрузки, сохраняя полную или частичную производительность механизма. Такое решение используется, например, для двухдвигательных электроприводов механизмов подъема особо ответственных подъемных кранов.

Если же двухдвигательный электропривод выполнен по независимой кинематической схеме, для резервирования может быть использована схема, приведенная на рис. 2. В этой схеме для резервирования используется третий тиристорный преобразователь UZR с комплектом защитной и коммутационной аппаратуры и четыре двухполюсных трехпозиционных коммутатора (QS3, QS4, QS5, QS6).

Возможен вариант схемы, аналогичный схеме резервирования рис.1, б с резервированием только тиристорных преобразователей, но с увеличением количества коммутаторов до шести. Мощность резервного тиристорного преобразователя UZR в схеме рис. 2 выбирается по мощности большего из электродвигателей М1 и М2, если их мощности не равны, в этом случае при подключении одного из электродвигателей к резервному питанию одновременно производится перепараметрирование системы регулирования скорости UZR на параметры подключаемого к UZR электродвигателя.

Схема, аналогичная представленной на рис. 2, может быть использована с различными по объему вариантами резервирования и для двухдвигательного электропривода большой мощности, тиристорные преобразователи которого подключены к сети 6 (10) кВ через силовые трансформаторы. Эти варианты, соответственно, отличаются величиной начальных затрат.

Способы резервирования многодвигательного электропривода постоянного тока зависят от кинематической схемы такого электропривода. Так если, работая на общий вал или общий редуктор, для резервирования электродвигатели приводят во вращение один механизм, применяется метод увеличения суммарной установленной мощности приводных электродвигателей, а резервирование производится путем выведения из работы аварийного электродвигателя с последующим распределением нагрузки между оставшимися в работе электродвигателями.

Такой способ применен, например, при разработке многодвигательных электроприводов механизмов поворота конвертеров и механизмов передвижения роторных экскаваторов большой мощности [3].

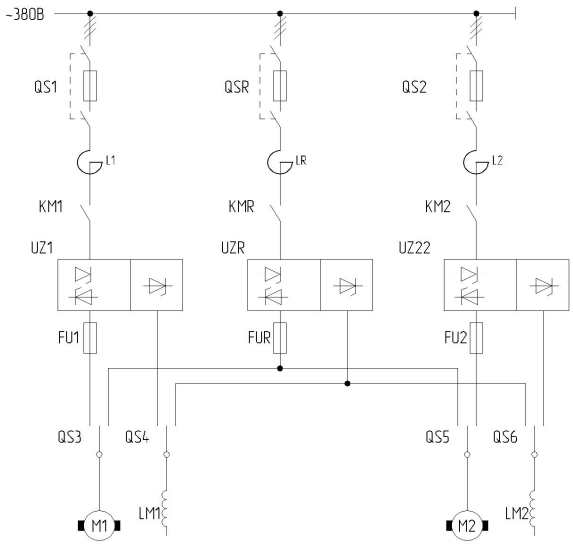


Рис. 2 Резервирование двухдвигательного электропривода постоянного тока

Оригинальные решения вопросов резервирования применены при разработке модернизированных схем управления для электроприводов механизмов перемещения фурм машин подачи кислорода в конвертер [4]. Кроме обычного резервирования двух рабочих электроприводов перемещения фурм здесь используется резервный электрический или пневматический привод перемещения фурм. Он используется для подъема фурмы из горловины конвертера в аварийных ситуациях.

В случаях, когда двигатели многодвигательного электропривода приводят во вращение отдельные механизмы единой технологической установки, для резервирования применяется схема, в которой используется один резервный комплект питания и защиты для всех электроприводов [5, 6]. Такое резервирование, в частности, применено для многодвигательного электропривода главных приводов (клетей и моталок) пятиклетевого стана 1700 бесконечной холодной прокатки, схема которого приведена на рис. 3.

Нужно отметить, что в качестве коммутаторов больших номинальных токов электродвигателей (до 5000 А) в этой схеме использованы специальные шинные накладки с ручным приводом, разработанные НИИ ХЭМЗ, г.Харьков.

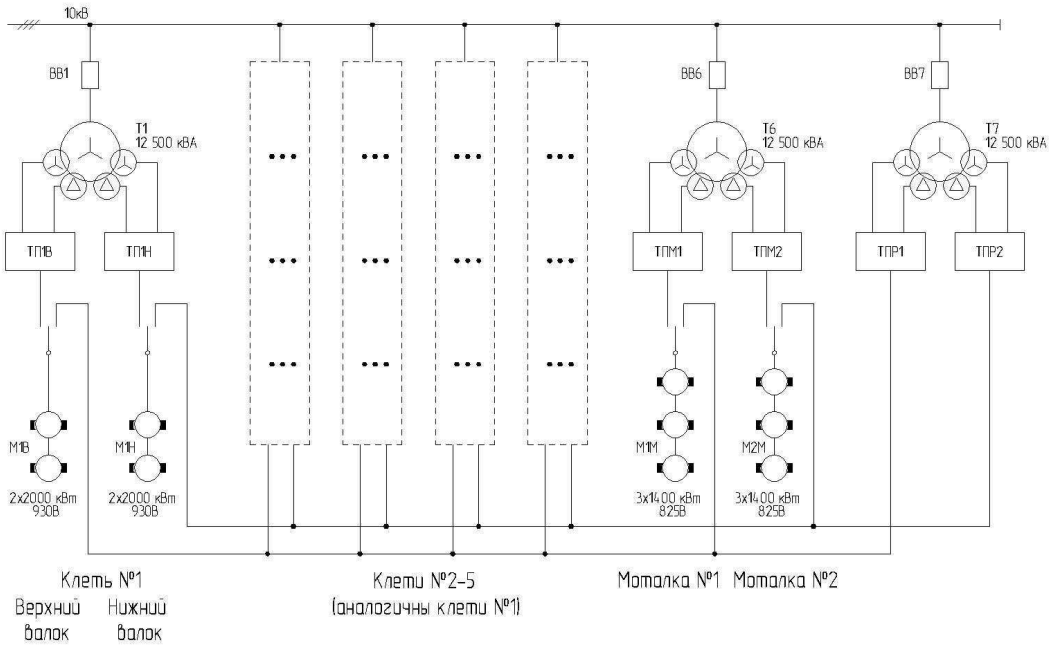


Рис. 3 Резервирование электропривода пятиклетевого стана 1700 бесконечной холодной прокатки

Электроприводы переменного тока. Резервирование однодвигательных и двухдвигательных регулируемых электроприводов переменного тока малой и средней мощности, построенных по схеме преобразователь частоты - асинхронный или синхронный с постоянными магнитами двигатель выполняется на принципах и с использованием схемных решений, аналогичных подобным электроприводам постоянного тока (рис.1). Отличие заключается в снижении требуемого количества коммутаторов для переключения на резерв, благодаря отсутствию необходимости переключать обмотку возбуждения.

Выбор коммутирующих аппаратов и объема резервируемого оборудования определяется в каждом случае конкретными условиями. [7,8]

При увеличении мощности однодвигательного электропривода переменного тока целесообразно применять модульные преобразователи частоты с разделением модулей питания и инвертора. Такие возможности предоставляют серийные преобразователи частоты фирм Siemens и ABB.

В схеме с использованием преобразователей частоты модульной конструкции, можно выполнить резервирование в нескольких вариантах:

резервировать все модули преобразователя частоты, защитную и коммутационную аппаратуру (рис.4а);

резервировать только модули преобразователя частоты при сохранении одного комплекта защитной и коммутационной аппаратуры;

резервировать только модуль инвертора при сохранении одного модуля выпрямителя и одного комплекта защитной и коммутационной аппаратуры (рис.4, б).

Различные варианты резервирования электроприводов сталеплавильного и шахтного оборудования рассмотрены в [9, 10].

Применение модульных преобразователей частоты для двухдвигательных электроприводов повышенной мощности позволяет реализовать схемы с индивидуальным или общим звеном постоянного тока. В таких схемах возможно резервирование отдельных модулей, например, только модулей инверторов, учитывая более высокую надежность модуля выпрямителя (рис. 5).

Резервирование многодвигательного электропривода малой и средней мощности, в котором применены преобразователи частоты комплектной конструкции, может быть выполнено путем использования одного резервного преобразователя частоты с возможностью подключения к нему любого из электродвигателей.

Высокие требования по надежности предъявляются к многодвигательным электроприводам механизмов подъемных кранов, обслуживающих сталеплавильные цеха металлургических заводов, надежности этих ответственных машин уделяется особое внимание.

Система питания многодвигательного электропривода такого крана строится, как правило, по схеме с общим звеном постоянного тока и индивидуальными инверторами. Резервирование электроприводов таких кранов выполняется не только путем применения дополнительного резервного электрооборудования, но и за счет выбора элементов двух- и многодвигательных электроприводов отдельных механизмов.

В этом случае при выходе из строя одного из электродвигателей второй обеспечивает работоспособность механизма, а, значит, и всего крана, возможно иногда и с некоторой потерей производительности.

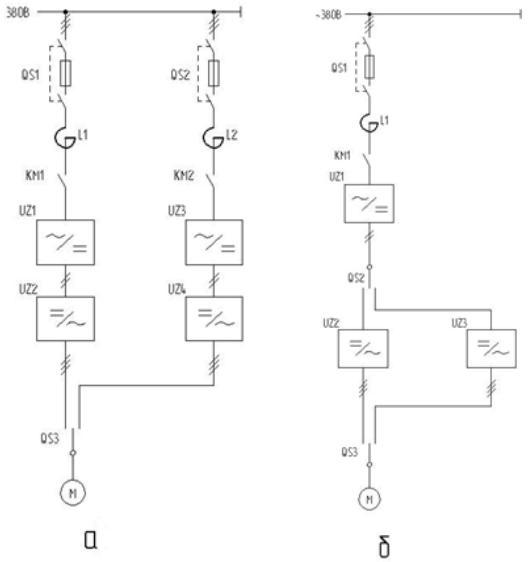


Рис.4 Резервирование однодвигательного электропривода переменного тока

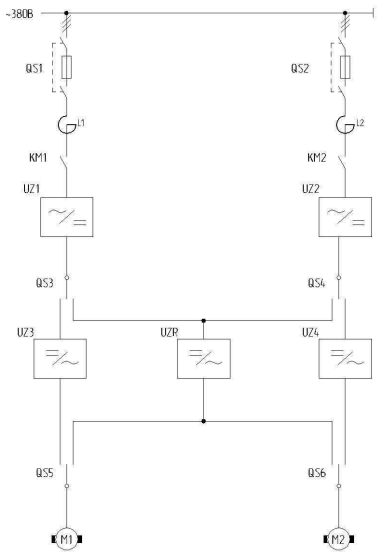


Рис. 5 Резервирование двухдвигательного электропривода переменного тока

Примером может служить решение, принятое при разработке электроприводов скрапозавалочной машины конвертерного цеха, которая оборудована двумя одинаковыми завалочными тележками.

Как видно из однолинейной схемы электроприводов (рис.6) этого крана, электроприводы тележек полностью автономны по питанию, каждая имеет резервируемое общее звено постоянного тока, имеются резервный инвертор для механизмов главного подъема и индивидуальные модули инверторов электродвигателей каждого механизма. При выходе из строя любого из модулей инверторов кран сохраняет работоспособность за счет завышенной мощности электродвигателей.

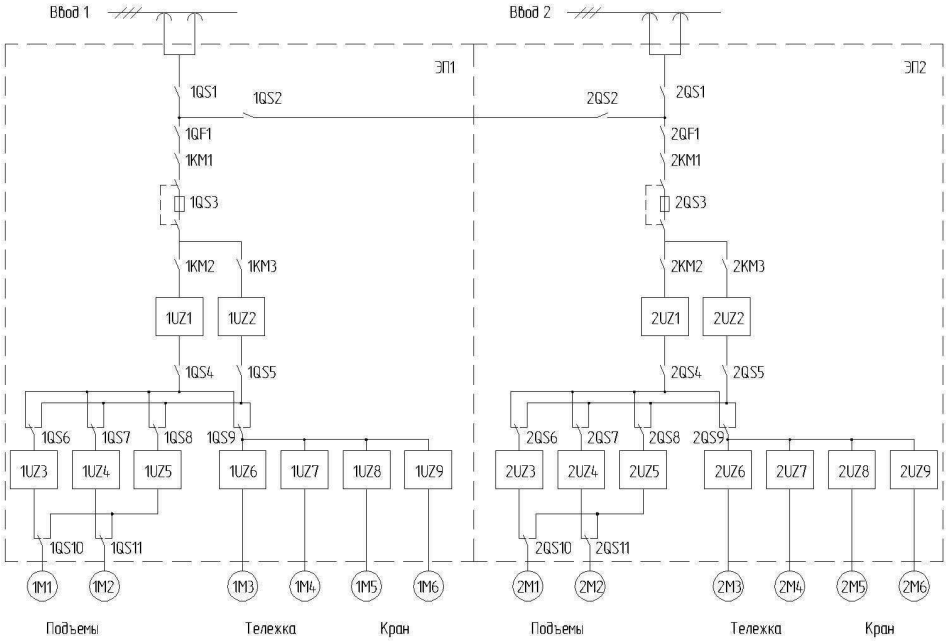


Рис. 6 Однолинейная схема электроприводов скрапозавалочной машины

Если же речь идет о резервировании многодвигательного электропривода большой мощности, выполненного на базе модульных преобразователей частоты, то можно применить различные варианты схемных решений, которые отличаются объемом резервируемого электрооборудования и стоимостью резервирующего.

Другим примером [11, 12] является электропривод литейного крана грузоподъемностью 275/70/16т (введен в эксплуатацию в электросталеплавильном цехе металлургического завода в 2014г.). Однолинейная схема электроприводов такого литейного крана приведена на рис. 7. В этой схеме резервированы модули звена постоянного тока, а электродвигатели питаются от индивидуальных модулей инверторов.

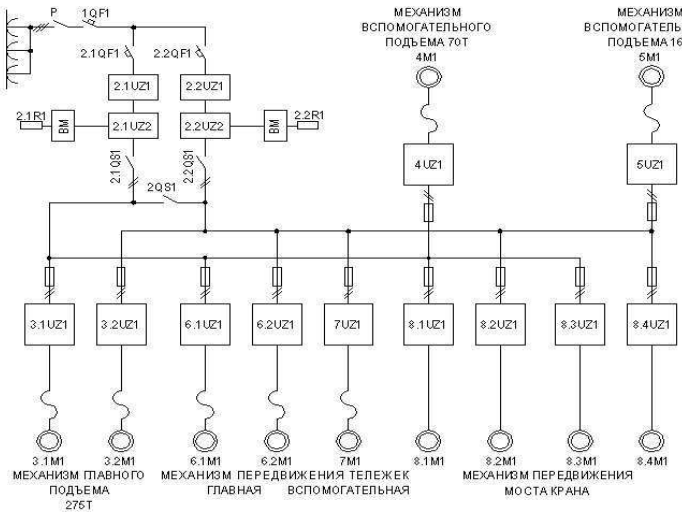


Рис. 7 Однолинейная схема электроприводов литейного крана

Еще одним способом резервирования регулируемых электроприводов переменного тока следует считать переключение электродвигателей на прямое питание от сети («байпас»). Этот способ позволяет сохранить работоспособность электропривода, но с потерей его регулировочных возможностей, что в ряде случаев допустимо и может быть оправдано.

Выводы. Резервирование современных регулируемых электроприводов, в которых используются регулируемые источники питания электродвигателей с цифровым микропроцессорным управлением, представляет собой один из способов существенного повышения надежности подобных электроприводов, а тем самым и повышения производительности соответствующих промышленных механизмов.

Список литературы: 1. Выбор способа резервирования для системы управления электроприводом. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.macro-econom.ru/economs-3588-1.html, свободный. Загл. с экрана. 25.11.2014 **2.** *Цытович Л.И.* Система управления группой асинхронных электроприводов с самодиагностированием и автоматическим резервированием каналов регулирования./*Л. И. Цытович, О. Г. Терешина, М. М. Дудкин* //Электротехника. – 2006. – №11. – С. 38 – 44. **3.** *Лимонов Л. Г.* Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. –Харьков: «Форт», 2009. – 268с. **4.** *Дубенецкий А.С.* Электропривод подъемного механизма фурм сталеплавильного конвертера/ *А. С. Дубенецкий, Л. Г. Лимонов, В. П. Моргулис* // Подъемные сооружения. Специальная техника. – Одесса : ООО «Крантест» – 2013. – № 11(141). – С. 21-23 **5.***Лимонов Л. Г.* Электрооборудование 5-ти клетевого стана бесконечной холодной прокатки/ *Л. Г. Лимонов, А. Н. Питкин, Е. Д. Форшайт* // Тезисы докладов к 4 Всесоюзной научно-технической конференции «Автоматизированный электропривод прокатных станов». – Свердловск: – 1990. **6.** *Шеметова А .А.* Разработка методики анализа надежности автоматизированных электроприводов прокатных станов при реконструкции: Диссертация канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2009. – 151 с. **7.** *Однокопылов Г. И.* Исследование отказоустойчивого электропривода со структурным резервированием / *Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин* //Труды XXIV Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки — от теории к практике», 7 августа 2013 г. - Новосибирск: СибАК, 2013. — С. 141-145 **8.** *Брылина О. Г.* Электропривод автономного объекта с автоматическим диагностированием и резервированием каналов регулирования / *О. Г. Брылина, Л. И. Цытович* // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 63-й науч. конф. / Юж.-Урал. гос. ун-т.- Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ. – 2011. – Т. 2.- С. 158 – 160. **9.** *Кузнецова Л. Н.* Конструирование регулируемых электроприводов дымососов сталеплавильного производства/ *Л. Н. Кузнецова, Л. Г. Лимонов*// «Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит». – Харьков: – 2014. – № 1. – С. 40-46 **10.** *Иванцов В.В.* Резервирование преобразователя частоты в электроприводе шахтной подъемной машины. [Электронный ресурс] / — Электрон. дан. — Режим доступа: http://www.erasib.ru/eraton-vr+npch, свободный. — Загл. с экрана. 19.11.2014 **11.** *Бондаренко С. Н.* О повышении надежности электроприводов крановых механизмов/ *С. Н. Бондаренко, Л. Г. Лимонов* // «Подъемные сооружения. Специальная техника». – Одесса: –2009. – №10. – С.11-12 **12.** *Дубенецкий А. С.* Многодвигательная электромеханическая система литейного крана / *А. С. Дубенецкий, Л. Г. Лимонов, С. В. Потапов* // «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. (Специальный выпуск)»,- Харьков: – 2013. – № 36 (1009). – С. 171-174

Bibliographi (transliterated):1. Vybor sposoba rezervirovaniya dlya sistemi upravleniya elektroprivodom Available at: http://www.macro-econom.ru /economs-3588-1.html, free. (accessed 25.11.2014) **2.** *Tsitovich L.I., Tereshina O.G., Dudkin M.M.* Sistema upravleniya gruppoy asinkhronnykh elektroprivodov s samodiagnostirovaniem i avtomaticheskim rezervirovaniem kanalov regulirovaniya /*Elektrotekhnika*, 2006, №11. PP. 38-44 Print. **3.** *Limonov L.G.* Avtomatizirovannyy elektroprivod promychlennykh mekhanizmov. -Kharkov: "Fort", 2009. – 268p. Print. **4.** *Dubenetsky A.S., Limonov L.G., Morgulis V.P.* Elektroprivod podemnogo mexanizma furm staleplavilnogo konvertera // *Lifting equipment. Special Technique.* - Odessa: "Krantest"- 2013. - № 11 (141). - PP. 21-23. Print. **5.** *Shemetova A.A.* Razrabotka metodiki analiza nadezhnosti avtomatizirovannykh elektroprivodov prokatnykh stanov pri rekonstrukcii: *the dissertation c.t.s./* - Magnitogorsk, 2009. - 151p. Print **6.** *Odnokopylov G.I., Bragin A.D.* Issledovanie otkazoustoychivogo elektroprivoda so strukturnym rezervirovaniem // *Proceedings of the XXIV International extramural scientific-practical conference «Technical sciences - from theory to practice»: a collection of articles based on materials the XXIV International correspondence scientific-practical conference (7 August 2013)*; Novosibirsk: SeebAK, 2013. - PP. 141-145 Print. **7.** *Brylina O.G., Tsitovich L.I.* Elektroprivod avtonomnogo obekta s avtomaticheskim diagnostirovaniem i rezervirovaniem kanalov regulirovaniya // *Science SUSU. Section of Technical Sciences: Proceedings of 63th Scientific. Conf.* / *Sous-Ural. state University.* - Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2011.- T. 2.- PP. 158-160. Print. **8.** *Kuznetsova L.N., Limonov L.G.* Konstruirovanie reguliruemykh elektroprivodov dymososov staleplavilnogo proizvodstva //*"Energetika. Energosberezhenie. Energoaudit"*.- Kharkiv: – 2014. – № 1. – PP. 40-46 Print. **9.** *Ivantcov V.V.* Rezervirovanie preobrazovatelya chastoty v elektroprivode shakhtnoy podemnoy mashiny. Available at: http://www.erasib.ru/eraton-vr+npch, free. (accessed 19.11.2014) **10.** *Bondarenko S.N., Limonov L.G.* O povyshenii nadezhnosti elektroprivodov kranovykh mekhanizmov // *"Lifting equipment. Special Technique"* – Odessa: –2009. – №10. – PP.11-12 Print. **11.** *Dubenetsky A.S., Limonov L.G., Potapov S.V.* Mnogodvigatelnaya elektromekhanicheskaya sistema liteynogo krana // *"Problems of automated electric drive. Theory and practice. (Special Edition)"* - Kharkiv: – 2013. – № 36 (1009). – PP. 171-174 Print.

Поступила(received) 30.06.2015

УДК 621.331: 621.311.4

О. О. МАТУСЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент ДНУЗТ, Дніпропетровськ

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ FMEA

Вступ. Якість ефективності організації процесу експлуатації силового електроустаткування тягових підстанцій (ТП) дистанцій електропостачання залізниць може бути досягнута при отриманні оптимального технічного стану устаткування по відношенню до початкового і надалі забезпечення експлуатаційної надійності устаткування на заданому рівні. Згідно основних положень нормативно технічних документів підтримка необхідного рівня надійності електроустаткування ТП в процесі експлуатації забезпечується, з одного боку за рахунок значного коефіцієнта запасу ресурсу устаткування, закладеного при його створенні, а з іншого боку, системою технічного обслуговування і ремонтів (ТО і Р). Дана система базується на проведенні планових профілактичних робіт (ППР) після напрацювання певного годині (система планово попереджувальних ремонтів) [1]. Проте, іноді таке обслуговування призводить до невиправданих витрат, оскільки реальний технічний стан електроустаткування ТП у момент проведення робіт може і не вимагати технічного обслуговування, а замінювані деталі ще не досягли критичної міри зносу. Також, нині, практично відсутнє необхідне фінансово - технічне забезпечення проведення ППР в повному обсязі, а поступове старіння парку устаткування ТП і зниження запасів міцності гостро ставлять питання оцінки рівня ризику його експлуатації за межами встановленого терміну служби (наприклад, на залізницях України 82,9% ТП і її основне устаткування працюють з терміном служби більше 30 років) [2,3]. Це змушує шукати нові підходи і методи вдосконалення системи ТО і Р силового устаткування ТП дистанцій електропостачання залізниць.

Постановка завдання. Вдосконалення системи ТО і Р ТП, згідно нормативно технічній документації, торкається в основному методів контролю параметрів устаткування в процесі експлуатації і методів розрахунку призначеного ресурсу [1]. Проте відсутність необхідного фінансово-технічного забезпечення проведення ППР вимагає нових підходів до системи технічного обслуговування і ремонту. Нині ефективність експлуатації устаткування ТП електрифікованих залізниць усе більшою мірою стає залежною від діяльності ремонтних служб, покликаних забезпечувати процес підтримки технологічного устаткування в працездатному стані з мінімальними ремонтними витратами [4]. Проте, незважаючи на важливу роль ремонтних служб в забезпеченні якісного ТО і Р устаткування, рівень технічної оснащеності підрозділів дистанцій електропостачання, їх організації і управління поки що не відповідає вимогам нормативних актів. Глибинну основу проблеми складає не стільки само устаткування, скільки система роботи з ним на всіх стадіях його життєвого циклу: від проектування, установки і введення його в дію до експлуатації, технічного обслуговування і утилізації. Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств показує [4,5], що вирішення проблеми вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту технологічного устаткування може здійснюватися також на основі досягнень сучасного менеджменту.

Матеріали дослідження. Підвищення вимог до надійності і безпеки залізничних перевезень зумовили застосування нових методів системного аналізу технічного стану об'єктів системи тягового електропостачання. Як один з таких методів можна запропонувати метод аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу - (Failure Mode and Effects Analysis), далі іменований - метод FMEA, також його різновид, звана FMECA (аналіз причин, наслідків і критичності порушення процесу) що розширює можливості цього методу за рахунок ранжирування тяжкості наслідків порушення процесу (відмов), що дозволяє встановити пріоритетність застережливих дій. У світі накопичений майже 25-річний досвід розробки і успішного застосування FMEA -анализа. Так в США було здійснено перше формалізоване нововведення FMEA (програма Apollo). Головним завданням FMEA/FMECA, для системи ТО і Р ТП, являється менеджмент якості процесів системи і безперервне її вдосконалення при забезпеченні виявлення потенційних невідповідностей (дефектів) і запобігання їх появі на всіх стадіях життєвого циклу електротехнічного устаткування ТП. Нині не менше 80% розробок технічних виробів і технологій проводиться із застосуванням аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей (FMEA -методології) [6,7,8].

Аналіз видів і наслідків потенційних невідповідностей широко застосовується багатьма світовими компаніями як для розробки нових конструкцій і технологій, так і для аналізу і планування якості виробничих процесів і продукції. Методологія FMEA дозволяє оцінити риски і можливий збиток, викликаний потенційними невідповідностями конструкції і технологічних процесів на самій ранній стадії проектування і створення готового виробу або його комплектуючих. Сфера застосування методу охоплює усі етапи життєвого циклу продукції і будь-які технологічні процеси. Найбільший ефект дає застосування FMEA на етапах розробки конструкції і процесів, проте і в діючому виробництві метод може ефективно застосовуватися для аналізу невідповідностей і їх причин, не виявлених при розробці устаткування або обумовлених чинниками мінливості процесів експлуатації [9,10,11].

© О.О. Матусевич, 2015

Метою цього аналізу є виявлення і оцінка потенційних дефектів (відмов) устаткування або процесу, визначення дій, які можуть усунути або зменшити вірогідність виникнення потенційних відмов, і документування усіх цих заходів з метою досягнення надійної, ефективної експлуатації устаткування.

На етапі доопрацювання, наприклад, технологічного процесу системи ТО і Р ТП або при його поліпшенні методом FMEA необхідно вирішити наступні завдання:

• виявлення критичних місць технологічних процесів системи ТО і Р і вживання заходів по їх усуненню при плануванні виробничих процесів дистанції електропостачання;

• ухвалення рішень про придатність запропонованих і альтернативних процесів ТО і Р при розробці технологічних процесів системи обслуговування;

• створення ранжируваного списку видів і причин невідповідностей системи ТО і Р для планування корегуючих і застережливих дій ;

• визначення корегуючих і застережливих дій системи ТО і Р, які могли б усунути або понизити вірогідність виникнення критичних процесів (невідповідностей);

• доопрацювання технологічного процесу до найбільш прийнятного з різних точок зору, а саме: надійності, безпеці для персоналу, виявлення потенційно дефектних технологічних операцій і т. д.;

• документування даних за результатами аналізу для накопичення в базі знань.

Для визначення області оперативного втручання в процес ТО і Р силового електроустаткування ТП, можна запропонувати проведення FMEA - аналізу процесу на рівні наступних підпроцесів : профілактична перевірка (огляд), поточний ремонт, міжремонтні випробування, капітальний ремонт технологічного устаткування, а також фінансування робіт по технічному обслуговуванню (рис. 1).

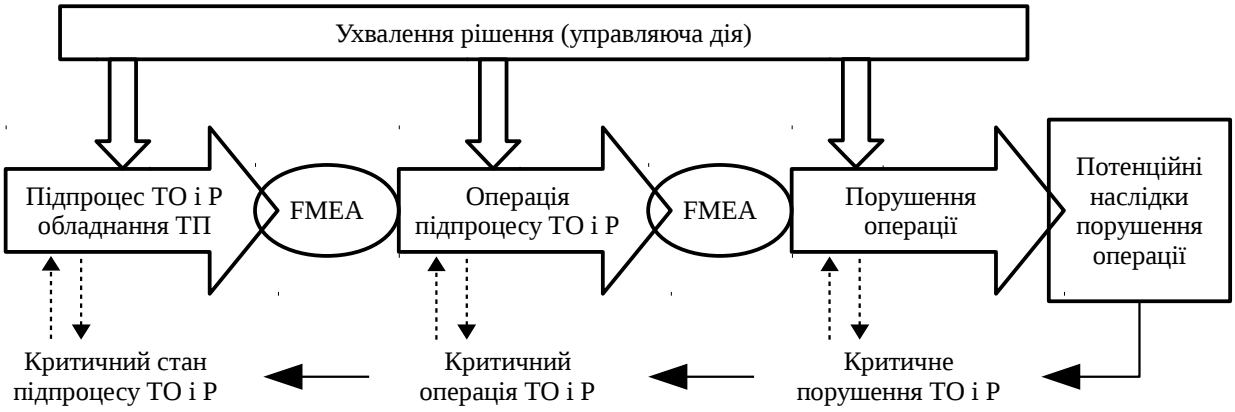


Рис. 1. – Методика FMEA процесу ТО і Р устаткування ТП

Згідно запропонованої методики (рис. 1), для кожного елементу операції вибраного рівня структуризації необхідно скласти перелік потенційних порушень, після чого вивчається вплив кожного порушення на функціонування підпроцесу і процесу ТО і Р в цілому, а також технічного стану устаткування ТП.

Для встановлення критичних операцій процесу ТО і Р - потрібне проведення аналізу можливих небезпек, встановлення причини порушення і потенційних наслідків порушень. Результати аналізу FMEA процесу ТО і Р устаткування ТП заносяться в спеціальну таблицю (таблиця. 1) [10-12].

Таблиця 1 - Аналіз видів і наслідків порушень ТО і Р, відмов устаткування ТП

Система (підпроцеси / операції)	Опис потенційного порушення ТО і Р	Вплив порушення (дефекту)		Причини порушення (дефекту)		Виявлення дефекту		Коеф. ризику	Рекомендації	Відповідальний терміни	Заходи	Результати аналізу			
		опис	K_S	опис	K_O	опис	K_D	K_R				K_S	K_O	K_D	K_R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Опис процесів ТО і Р	2. Аналіз порушень (дефектів)							3. Оцінка ризику	4. Заходи, що проводяться для запобігання порушенням			5. Оцінка результатів аналізу			

Основа запропонованої методики FMEA полягає в ідентифікації усіх потенційно можливих помилок або відмов системи (процесу або устаткування). Цей процес заснований на складанні списку усіх можливих відмов (порушень) з наступним його аналізом і наступною числовою оцінкою. Бальну оцінку коефіцієнтів проводить *експертна група* [4-6], яка може формуватися з представників технічної служби дистанції електропостачання і фахівців ТП.

Для будь-якого потенційного порушення процесу ТО і Р, дефекту або відмови устаткування, згідно методики FMEA, визначаються три показники по трьох критеріях (шкала від 1 до 10) [5-12]:

коефіцієнт тяжкості порушення (K_S), враховує значення наслідків цього порушення і -ої операції ТО і Р (тяжкість наслідків прояву причин порушення (відмов)). Ймовірність P_S того, що вийде з ладу устаткування ТП (маловірогідно =1; майже напевно =10);

коефіцієнт частоти порушення операції (K_O), оцінка частоти (ймовірність P_O відмови) порушення і -ої операції ТО і Р. Небезпека порушення (вплив незначний =1; надзвичайний вплив = 10);

коефіцієнт (K_D), враховує ймовірність P_D , оцінка ймовірності не виявлення порушення і -ої операції ТО і Р до прояву його наслідків (на ранніх стадіях). Можливість виявлення порушення (виявлення ймовірне = 1; виявлення малоймовірне = 10).

Для перших двох критеріїв ця шкала зростає, тобто чим вище значущість або частота появи порушення, тим вище відповідні оцінки. Для третього критерію шкала убуває - чим вище можливість виявлення цього порушення, тим нижче відповідна оцінка.

Для розрахунку критичності порушення операції ТО і Р можна використовувати інтегральну оцінку критичності цього порушення (K_R), так зване (Risk Priority Number - RPN) - пріоритетне число ризику (ПЧР), яку обчислюється як множення розглянутих вище коефіцієнтів:

$$K_R = K_S \cdot K_O \cdot K_D \tag{1}$$

По потенційних відмовах, що мають значення RPN вище критичного, розробляються необхідні заходи щодо мінімізації ризику їх появи. Для проведення FMEA на дистанції електропостачання створюється спеціальна міжфункціональна команда, склад якої визначається видом FMEA. FMEA -команда за допомогою інтелектуального методу (мозкового штурму) визначає потенційні дефекти системи або процесу, складає їх перелік, оцінює по трьох вищезгаданих критеріях, розраховує значення RPN і порівнює їх з критичним значеннями, пропонує рішення по мінімізації впливу аналізованих дефектів (відмов).

Процес вироблення оцінки ризику в основному складається з наступних етапів:

- визначення інтенсивності відмов - λ ;
- оцінка ймовірності $\overline{P_S}$ виникнення порушення (відмови) за допомогою інтенсивності відмов - λ ;
- оцінка тяжкості наслідків K_S виникнення порушення (колонка 4);
- оцінка ймовірності P_D виявлення дефекту;
- розрахунок пріоритетного числа ризику RPN (колонка 9).

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ системи при виникненні порушення (відмови) в період $[t, t+\Delta t]$ після проведення ТО і Р за умови, що система була включена в момент $t=0$ _і в період $[0, t]$ _працювала безвідмовно можна розрахувати по формулі:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = -\frac{\frac{dP_S(t)}{dt}}{P_S(t)} \tag{2}$$

Де $P_S(t)$ - функція розподілу вірогідності безвідмовної роботи системи, яка може визначатися через інтенсивність відмов $\lambda(t)$:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{3}$$

При $t=0$, $P(t=0)=1$.

$F(t)$ - функція розподілу в часі вірогідності відмови $\overline{P_S}$ і $f(t)$ відповідно щільність цього розподілу для випадкової величини (відмова якого-небудь компонента системи), які пов'язані між собою виразами:

$$F(t) = \int_0^t f(t)d(t) \tag{4}$$

за умови, що

$$\int_0^t f(t)d(t) = 1 \text{ і } t \geq 0 \tag{5}$$

Для стаціонарних процесів з постійною інтенсивністю відмов λ часто використовуваними функціями розподілу є експоненціальний розподіл

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{6}$$

і розподіл Вейбулла - Гнеденко

$$F(t)=1-e^{-(\lambda t)\beta} \quad (7)$$

де $\beta=0\ldots\infty$ означає коефіцієнт, що дозволяє точніше визначити реальну зміну функції розподілу.

Ризик R суб' єктивна міра оцінки тяжкості наслідків і вірогідності виникнення відмови за заданий період часу (використовуваний для аналізу). Ризик R визначається як множення щільності вірогідності P настання небезпечної події, яка призводить до виникнення збитку, і міри завданого збитку S (міра тяжкості збитку):

$$R=P\cdot S \quad (8)$$

де, щільність вірогідності P обчислюється за допомогою множення вірогідностей, а саме з вірогідності P_1 що описує вірогідність настання збитку, і умовній вірогідності P_2 настання збитку, який проте не буде виявлений:

$$R=P_1\cdot P_2\cdot S \quad (9)$$

У FMEA теж аналізується міра ризику настання збитку. Проте в FMEA визначається не вірогідність настання збитку, а виробляється оцінка міри небезпеки цього дефекту з допомогою пріоритетного числа ризику RPN (ПЧР). Рівняння (9) видозмінюється шляхом заміщення складових його чинників P_1, P_2 і S чинниками K_O (частота настання), K_D (частота виявлення) і K_S (тяжкість наслідків відмови).

$$RPN=K_O\cdot K_D\cdot K_S \quad (10)$$

Величина RPN може набувати значень від 1 до 1000 і служить оцінкою рівня ризику цієї відмови. Одне з основних завдань проведення FMEA - виявлення відмов з максимальними RPN і їх послідовне зниження. На практиці зазвичай орієнтуються на граничне значення RPN як правило, не вище 100…125 (критичне значення RPN). Це значення проте не є універсальним, оскільки в різних областях як сама верхня межа, так і відповідність критеріїв оцінки на шкалі для K_S, K_O і K_D носять різний характер. Необхідно далі враховувати, що індивідуальні оцінки для для K_S, K_O і K_D не повинні перевищувати 8 балів без того, щоб провести повторну грунтовну перевірку:

K_S > 8 - неприпустимий стан системи / порушення нормативних вимог, ризик для безпеки;

K_O > 8 - дефект з особливо частим виникненням;

K_D > 8 - дефект, що абсолютно не виявляється.

Виявлені «вузькі місця», - системи ТО і Р силового електрооообладнання ТП, для яких RPN буде більше 100...125, - піддаються змінам, тобто розробляються коригувальні заходи [9,12]. У наслідку цього, наступним етапом підвищення ефективності системи ТО і Р ТП являється проведення оцінки результатів аналізу (поліпшення якості) системи.

Для пріоритетних чисел ризику RPN > 100...125 і / або окремих оцінок для K_S, K_O чи K_D > 8 необхідно виробити заходи по поліпшенню системи ТО і Р ТП. Тут виникають різні принципові підходи, які різняться в їх ефективності і мірі дії на оцінки величин K_S, K_O чи K_D :

Недопущення виникнення причин відмови - $K_O=1$;

Створення перешкод на шляху виникнення причин відмови - K_O *зменшується*;

Зменшення впливу наслідків відмов - K_S *зменшується*;

Підвищення вірогідності виявлення відмов - K_D *зменшується*.

Заходам, спрямованим на попередження відмов, виходячи з економічних міркувань, необхідно віддавати перевагу перед заходами щодо виявлення відмов. Хоча заходь щодо виявлення відмов і підвищують вірогідність виявлення, однак сморід не ведуть безпосередньо до поліпшення якості процесу ТО і Р. Також далеко від ідеального рішення зниження тяжкості наслідків відмов, оскільки воно вимагає великих витрат. Як правило, тяжкість наслідків в основному знижують конструктивними заходами, наприклад резервуванням. Тому зниження кількості можливих відмов (дефектів) устаткування ТП, за рахунок вдосконалення системи ТО і Р, має бути першочерговим завданням заходів по поліпшенню якості системи обслуговування. При цьому важливо чітко прояснити розподіл відповідальності і контролю сторін, що беруть участь в системі ТО і Р. Розроблені заходи по поліпшенню якості мають бути зафіксовані в плані реалізації з прив'язкою за часом з урахуванням тривалості їх реалізації і очікуваної вартості.

У оцінці результатів мають бути документовані наслідки заходів по поліпшенню якості системи ТЕ і Р. Для цього повторно проводитися оцінка міри ризику. Поліпшення якості вважається досягнутим, якщо нове пріоритетне число ризику RPN після удосконалення системи має менше значення чим раніше. Після реалізації запланованных заходів параметри оцінок нового поліпшеного стану системи ТЕ і Р тягових підстанцій електрифікованих залізниць переносяться в актуальний опис і вносяться до формуляру FMEA.

Практичне застосування цієї методики FMEA з метою вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій дистанцій електропостачання буде опубліковано в наступних статтях.

Висновки. На сьогодні методика FMEA/FMECA застосовується у всьому світі в різних галузях промисловості і стає невід'ємною частиною систем забезпечення якості. Особливо необхідно проводити FMEA/FMECA при створенні нових виробничих процесів для перевірки забезпечення ними необхідної якості продукції. До основних завдань вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій по забезпеченню якості відносяться - виявлення і попередження функціональне слабких і критичних відносно надійності і безвідмовності устаткуван-

ня місць і створення документації по забезпеченню якості. Поліпшення якості вважається досягнутим, якщо нове пріоритетне число ризику RPN після удосконалення системи має менше значення чим раніше.

Запропонована методика безперервного вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій дозволяє здійснювати аналіз критичності операцій і підпроцесів системи, а також визначати область оперативного втручання в процес технічного обслуговування і ремонту устаткування при експлуатації, упродовж життєвого циклу. Згідно цієї методики мають бути розроблені напрями дії на вдосконалення процесу обслуговування устаткування, реалізація яких приведе до підвищення надійності і ефективності тягового електропостачання залізниць.

Список літератури: 1. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць / Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниці, К., 2013. – 27с. **2.** Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році / – К.: Видавництво ТОВ «Девалта», 2014. - 251 с. **3.** *Матусевич, О.О.* Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць / *О.О. Матусевич, Д.В. Міронов* // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. - № 1(55). - С. 62-77. **4.** *Матусевич, О.О.* Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій / *О.О. Матусевич.* - Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2015. - 295 с. **5.** ISO/ IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques, 2015. **6.** North American Aviation, Space and Information System Division, SID-62-203-R-1, Apollo reliability Program Plan, 15 May 1963. **7.** *McDermott, Robin E.; Mikulak, Raymond J.; Beauregard Michael R.* The Basics of FMEA [Електронний ресурс]. - Productivity Press, 1996. - 80 p. Режим доступу: http://www.academia.edu/5343417/Reliability_Study_on_Spark_Plugs_Using_Process_FailureMode_and_Effect_Analysis. **8.** National Aeronautics and Space Administration, NASA/SP–2000–6110, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). A Bibliography, July 2000. **9.** *Розно М.И.* Как научиться смотреть вперед? Внедрение FMEA-методологии. Методы менеджмента качества, 2000, № 6, с.25-28. **10.** *Долин, А. П.* Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов / *А.П. Долин, Н Ф. Першина, В В. Смекалов* // Электрические станции. 2000. - № 6.- С. 46-52. **11.** *Годлевский, В.Е.* Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции / *В.Е. Годлевский, А.Я. Дмитриев, Г.Л. Юнак.* - Самара: Перспектива. 2002. - 160 с. **12.** *Качалов, В.А.* Метод FMEA : Анализ видов потенциальных дефектов и их влияния / *В.А. Качалов* // TQM-XXI. Проблемы, опыт, перспективы. Вып.2. Москва: ИздАТ.- 1997. - с.226 - 286.

Bibliography (transliterated): 1. Instruktsiya z tekhnichnogo obslugovuvannya i remontu obladnannya tyagovikh pidstantsiy, punktiv zhivlennya i sektsionuvannya elektrifikovanikh zaliznits. Kyiv, 2013, 27 p. **2.** Analiz roboti gospodarstva elektrifikatsiї ta elektropostachannya v 2013 rotsi. Kyiv: LLC "Devalta", 2014, 251 p. **3.** Matusevich, O. O., Mironov, D. V. Doslidzhennya ekspluatatsiї silovogo obladnannya sistemi tyagovogo elektropostachannya zaliznits'. Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana. No. 1 (55), 2015, pp. 62-77. **4.** Matusevich, O. O. Udoskonalennya metodologiї sistemi tekhnichnogo obslugovuvannya i remontu tyagovikh pidstantsiy. Dnipropetrovsk: Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 2015, 295 p. **5.** ISO/ IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques, 2015. **6.** North American Aviation, Space and Information System Division, SID-62-203-R-1, Apollo reliability Program Plan, 15 May 1963. **7.** McDermott, Robin E.; Mikulak, Raymond J.; Beauregard Michael R. The Basics of FMEA. Productivity Press, 1996. - 80 p. **8.** National Aeronautics and Space Administration, NASA/SP–2000–6110, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). A Bibliography, July 2000. **9.** Rozno, M.I. Kak nauchit'sya smotret' vpered? Vnedrenie FMEA-metodologii. Metody menedzhmenta kachestva. 2000, No. 6, pp. 25-28. **10.** Dolin, A. P., Pershina, N. F., Smekalov, V. V. Opyt provedeniya kompleksnykh obsledovaniy silovykh transformatorov. Elektricheskie stantsii, 2000, No. 6. pp. 46-52. **11.** Godlevskiy, V.E., Dmitriev, A. Ya., Yunak, G.L. Primenenie metoda analiza vidov, prichin i posledstviy potentsial'nykh nesootvetstviy (FMEA) na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla avtomobil'noy produktsii. Samara: Perspective, 2002. 160 p. **12.** Kachalov, V.A. Metod FMEA : Analiz vidov potentsial'nykh defektov i ikh vliyaniya. TQM-XXI. Problemy, opyt, perspektivy. Moscow: IzdAT, 1997. Iss. 2. pp. 226-286.

Надійшла (receiveid) 28.08.2015

УДК 621.331

Д. А. БОСЫЙ, канд. техн. наук, доц., докторант ДНУЖТ, Днепропетровск

УЧЕТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Введение. Эффективность функционирования электроэнергетических систем принято оценивать уровнем технологических потерь, которые, безусловно, возникают при передаче электрической энергии к потребителю. Системы тягового электроснабжения не являются исключением, но из-за специфических особенностей их устройства достаточно сложно создать коммерчески точную систему учета потерь. Либерализация рыночных отношений в электроэнергетике и реформирование отрасли железнодорожного транспорта, кроме того, заостряют нерешенную проблему взаимодействия различных хозяйств – локомотивного и электрификации в части разделения потерь электрической энергии. До настоящего времени на железных дорогах Украины разницу электроэнергии, отпущенной тяговыми подстанциями и потребленной электроподвижным составом, определяют неавтоматизированным способом, существенную погрешность в которых вызывает ряд объективных и человеческих факторов.

Анализ последний достижений и литературы. Практически с начала массовой электрификации ученым и специалистам стало понятно, что точное измерение потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения невозможно через стохастический характер нагрузки [1-2]. Определенное разрешение в проблеме позволяли выполнить непрямые способы определения потерь, основанные на аппаратном интегрировании квадрата кривой токов фидеров тяговых подстанций, т.н. метод «ампер-квадрат-часов» [3-4]. Этот метод, по сути, был позаимствован из стационарной энергетики, которым достаточно удобно определять потери для объектов с постоянными характеристиками, такими как трансформаторы, преобразователи, воздушные или кабельные линии. При адаптации метода к системам тягового электроснабжения, в ряде работ исследованы зависимости коэффициента для настройки счетчиков потерь в зависимости от целого ряда факторов – уравнительных токов, количества нагрузок на межподстанционной зоне, схемы питания и т.п. Указанные факторы составляли погрешность метода на уровне 7,5 %. Дальнейшие исследования были направлены на выявлении этих закономерностей и оперативное изменение настройки счетчиков потерь в процессе эксплуатации. Так, в работе [5], получены эмпирические зависимости в виде уравнений нелинейной регрессии на примере участков постоянного и переменного тока. Учет факторов в совокупности по данным работы позволил добиться повышения точности учета потерь на 6,9 % по отношению к расчетам по действующей методике. К недостаткам следует отнести человеческий фактор, который все же присутствует при настройке счетчиков и выборе регламентов изменения этих параметров настройки.

Существуют так же разработки коммерческих способов учета электроэнергии, потребляемой непосредственно электроподвижным составом. Актуальность данных попыток обусловлена тем, что существующую систему учета электроэнергии при действующих условиях невозможно считать коммерческой. Объективными причинами являются – низкий класс точности измерительных приборов, подключение приборов учета к силовой обмотке трансформатора для большинства электровозов переменного тока, низкая чувствительность при шунтовой схеме подключения, недостатки работы системы учета при рекуперации электроэнергии на постоянном токе. Кроме того, и в электровозах постоянного и переменного тока не исключается человеческий фактор воздействия на точность работы системы учета. Ввиду того, что при выполнении поездок по технологическим причинам необходимо полностью отключать силовые цепи существует вероятность вмешательства в цепи учета с целью «экономить» расход электроэнергии на тягу. Кроме того, при ручном съеме показаний учета возможны случаи некорректного соотношения расхода на разные участки обслуживания, с той же целью вписаться в установленные нормы расхода электроэнергии.

Постановка проблемы. Проведенный анализ показывает, что есть необходимость в создании автоматизированной системы учета потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения, которая полностью исключит человеческий фактор и позволить соотнести затраченную электроэнергию между расходами на перевозки и обслуживание перевозочного процесса.

Проведение исследований. Для проведения исследований создана математическая модель измерительной системы потерь в зависимости от расстояния между установкой измерительных устройств. Модель представляет собой дополнение к пространственно-временному представлению процессов в системах тягового электроснабжения. Дополнение заключается в том, что для каждого момента времени, с шагом, равным интервалу расстановки приборов (рис. 1), определяется кривая распределения напряжения в контактной сети для заданной в этот момент времени расположения нагрузки. На основании того, что известны расстояния между приборами и известно удельное сопротивление контактной сети, определяется ориентировочное значение токов на каждом из участков, получаемых между приборами. Векторное произведение получаемых таким образом функций распределения потерь напряжения и токов в контактной сети определит значение потерь с погрешностью. Погрешность в данном случае будет обусловлена в периоды времени нахождения движущейся нагрузки между точками измерения напряжения. В конечном итоге точность предложенного способа будет зависеть от частоты расположения таких датчиков на участке.

© Д.А. Босый, 2015

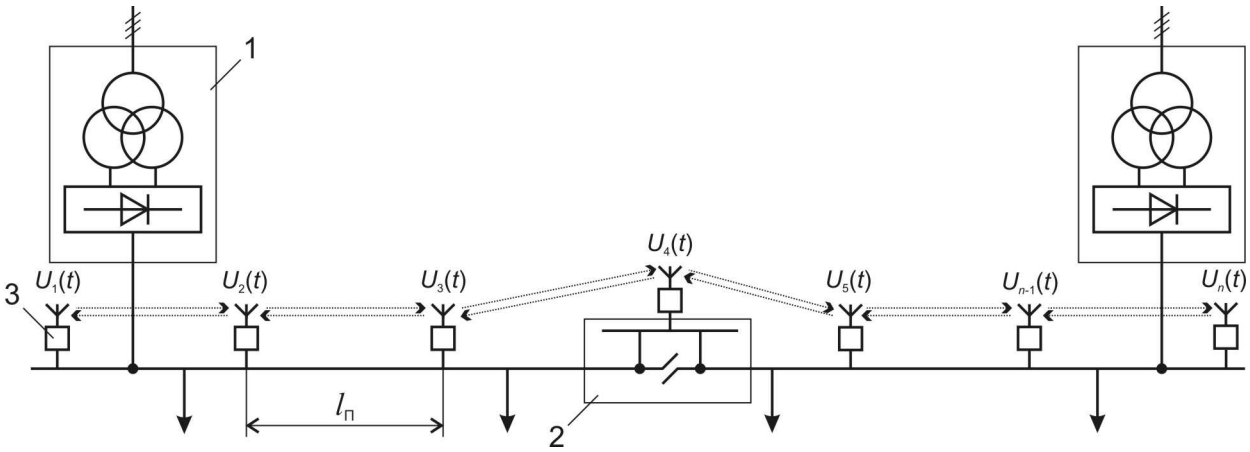


Рис. 1. Схема расположения измерительных устройств с беспроводной передачей данных:
1 – тяговая подстанция; 2 – пост секционирования; 3 – измерительное устройства

С целью удешевления возможно в данном случае использование новой технологии беспроводной передачи данных с возможностью построения ячеистой топологии сети ZigBee стандарта IEEE 802.15.4. Известны и доступны на рынке аппаратные реализации данной технологии в виде модулей и устройств с гарантированной дальностью передачи до 3 км в условиях прямой видимости, которые вполне пригодны для реализации описанной системы измерения в условиях действующих участков железной дороги.

Для расчета погрешностей измерения, вызванной моментами времени расположения нагрузки между контрольными точками, использованы характеристики поездов с сопоставимыми весами, на одном и том же участке с привязкой к координате. Вопреки распространенному мнению, что реализации тяговой нагрузки являются случайными функциями и требуют специальных методов расчета, анализ токовых нагрузок с привязкой к координате пути показывает наличие явно выраженных детерминированных составляющих, удельная часть которых составляет не менее 90 %. Различия в приведенных характеристиках определяются техническими особенностями ведения поезда, действующими ограничениями скорости на участке, техническими возможностями применения рекуперативного торможения.

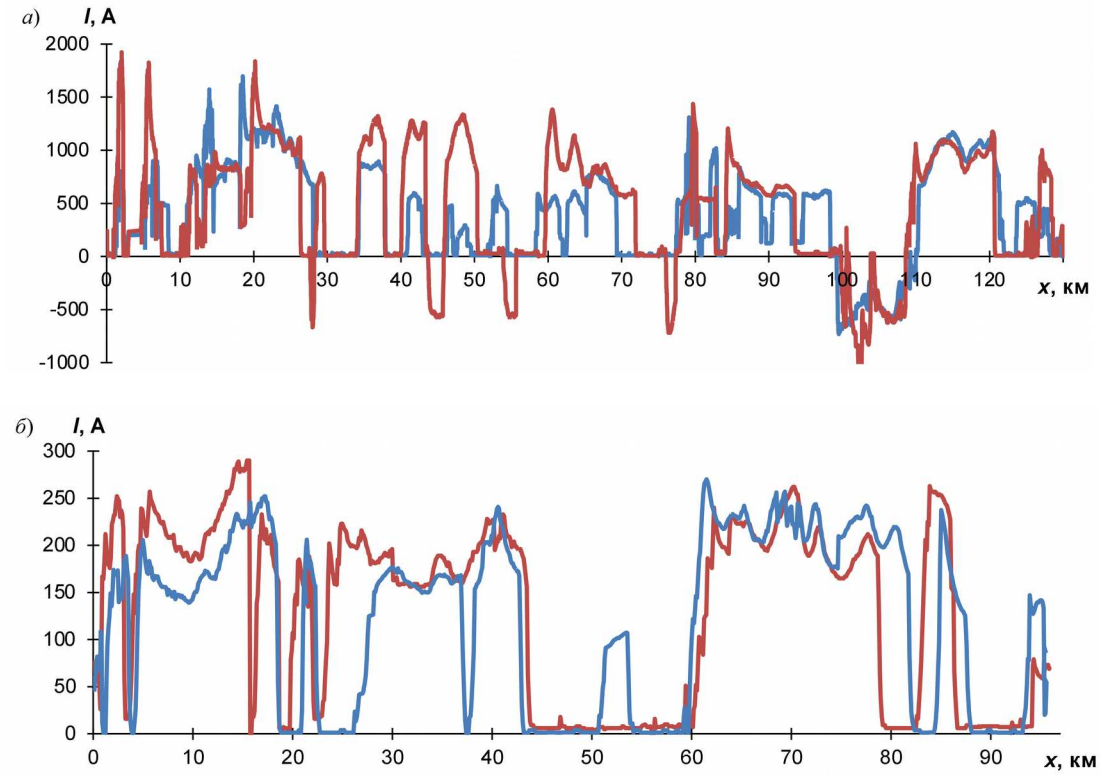


Рис. 2. Токовые характеристики поездов на участке постоянного (*а*) и переменного (*б*) тока

На основании результатов измерения параметров электроснабжения тягово-энергетической лабораторией, выполнены расчеты удельного электропотребления на приграничных участках двух железных дорог в связи с проблемой соотнесения расходов на тягу поездов. При этом, использованы зафиксированные величины потребления электроэнергии с привязкой к координате пройденного пути для 7-ми поездов в четном и нечетном направлении.

Используя полученные результаты, определено потребление электроэнергии, которое приходится на каждый перегон между станциями граничащих дорог. Определены также и удельные показатели расхода электроэнергии на единицу перевозной работы (10^4 ткмбр) с последующим приведением относительно длин выбранных участков. Используя полученное таким образом распределение частей электроэнергии при известной схеме питания можно определить соотношение потребленной энергии на тягу между разными дорогами. Для этого за 100 % принимается суммарная потребленная электроэнергия, а результат получается в виде суммы соответствующих частей для каждой дороги до их границы.

Такие расчеты были выполнены для Одесской и Южной железных дорог Украины при нормальной схеме питания. Результирующее распределение частей приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношение частей потребления электроэнергии

№ поезда	Вес, т	Части электроэнергии, %	
		Южная ж.д.	Одесская ж.д.
2973	6012	70,38	29,62
2967	4895	74,88	25,12
2968	1383	74,92	25,08
2969	4819	69,15	30,85
2973	5960	68,43	31,57
2971/2	1380	72,72	27,28
в среднем		71,75	28,25

Из данных таблицы видно, что распределение удельных частей электроэнергии между железными дорогами представляет собой устойчивую величину, которое с определенной ошибкой может использоваться для соотнесения между соседними железными дорогами.

Анализ результатов. На рис. 3 приведены полученные характеристики погрешности предложенной системы учета потерь в зависимости от расстояния между установкой измерительных устройств. Зависимость имеет сложный характер, в общем случае с уменьшением количества приборов на длине участка погрешность возрастает. Максимальное значение может достигать 21 % (рис. 3, *а*). В более узком диапазоне расположения приборов (рис. 3, *б*) интервалы изменения погрешностей составляют 1 – 3 %.

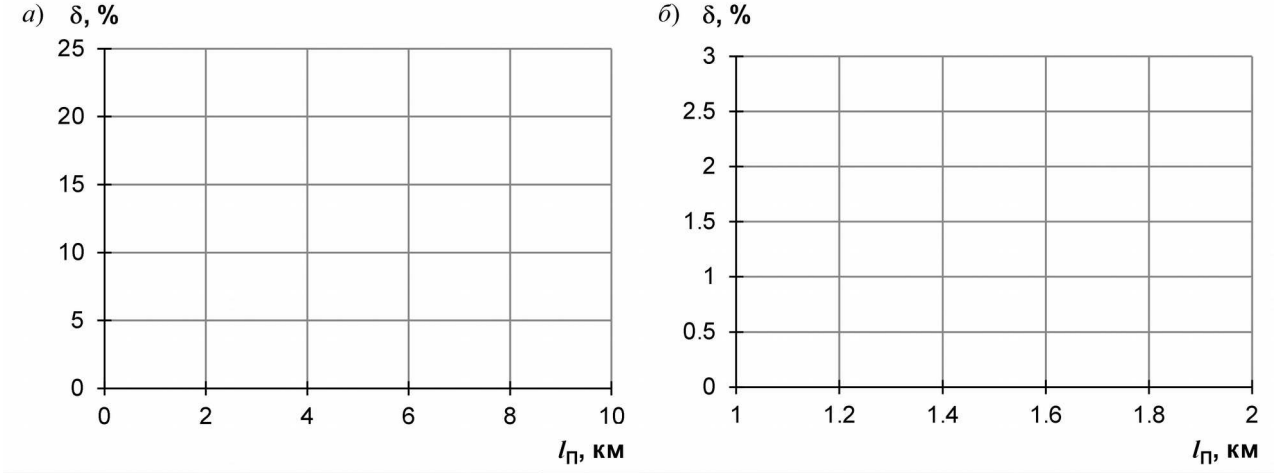


Рис. 3. Зависимости погрешности измерения потерь электроэнергии в контактной сети от расстояния между измерительными приборами

Проведенный анализ результатов показал, что для предложенной системы измерения потерь в контактной сети не может быть достигнут коммерческий класс точности 0,2 – 0,5 %. Тем не менее, при интервалах расположения от 1,0 до 2,0 возможно существенное снижение погрешности существующих непрямых способов определения потерь до 1,0 – 2,5 %, что может быть приемлемо в качестве системы аппаратного технического учета. Причиной возникновения погрешности при прочих равных условиях являются расхождения в приближенных и реальных распределениях тока и падения напряжения в контактной сети (рис. 4), которые в интегральном исчислении на периоде исследования составляют указанные погрешности.

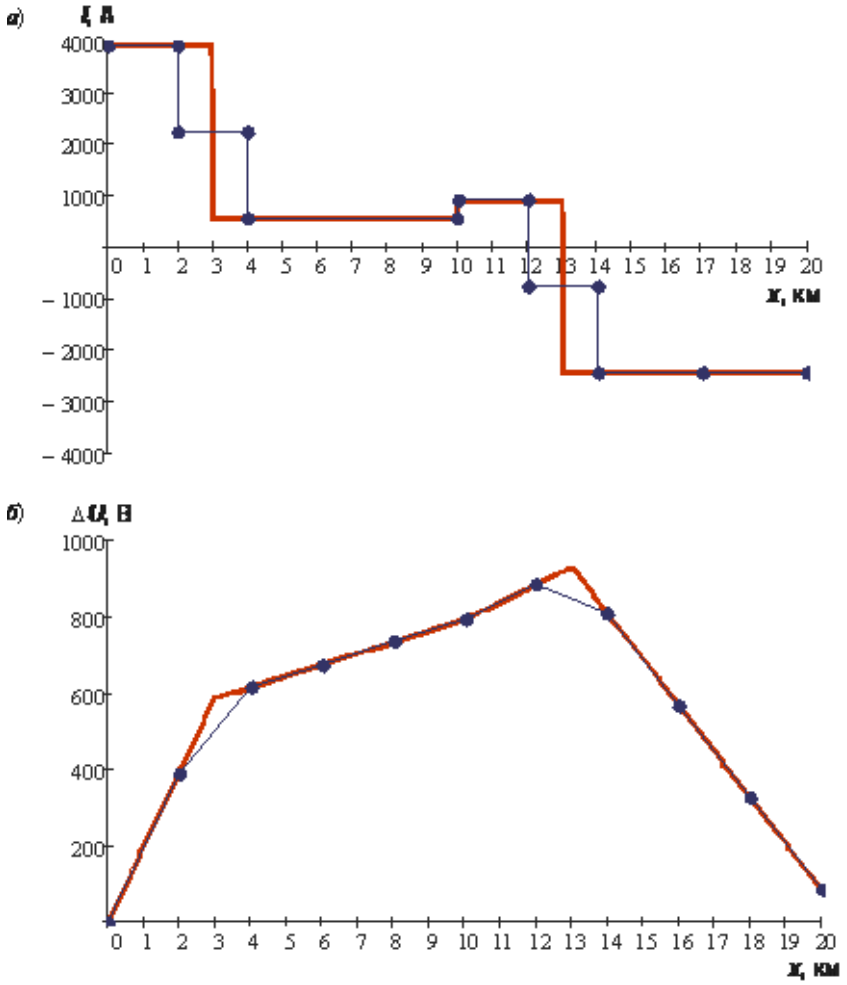


Рис. 4. Расхождения между реальным распределением (толстая линия) и приближенным распределением (тонкая линия с точками): *а* – ток в контактной сети; *б* – падение напряжения в контактной сети

Выводы. Уровень технологических потерь, которые возникают при передаче электрической энергии к потребителю, определяет эффективность функционирования электроэнергетических систем.

Для систем тягового электроснабжения необходима автоматизированная система учета потерь электроэнергии, которая полностью исключит человеческий фактор и позволить соотнести затраченную электроэнергию между расходами на перевозки и обслуживание перевозочного процесса.

Предложенная система, которая состоит из расположенных на участке железной дороги измерительных устройств с беспроводным обменом данными, позволяет достичь точности в 1,0 – 2,5 % при размещении приборов от 1 до 2 км.

Список литературы: 1. *Кузнецов В. Г.* Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / *В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006. – Вип. 12. – С. 36-40. **2.** *Власьевский С. В.* Влияние различных факторов на потери электрической энергии в тяговой сети при работе электровозов переменного тока / *С. В. Власьевский, О. А. Клинкова* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2007. – Вип. 14. – С. 30-34. **3.** *Кузнецов В. Г.* Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом / *В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2012. – Вип. 42. – С. 103-109. **4.** *Босий Д. О.* Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / *Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 35-39. **5.** *Кирилюк Т. І.* Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць: авт. дис. к. т. н. / *Т. І. Кирилюк*. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 22 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kuznetsov V. G., Mytsko R. S., Bosiy D. A. *Otsenka poter elektroenergii v tyagovoy seti magistral'nykh zheleznykh dorog.* Bulletin of the Dnipropevsk National University of Railway Transport, 2006, No. 12, pp. 36-40. **2.** Vlas'evskiy S. V., Klinkova O. A. *Vliyanie razlichnykh faktorov na poteri elektricheskoy energii v tyagovoy seti pri rabote elektrovozov peremennogo toka*. Bulletin of the Dnipropevsk National University of Railway Transport, 2007, No. 14, pp. 30-34. **3.** Kuznetsov V. G., Bosiy D. O., Kirilyuk T. I. *Oblik vtrat elektrichnoї energiї v tyagoviy merezhi nepryamim sposobom*. Bulletin of the Dnipropevsk National University of Railway Transport, 2012, No. 42, pp. 103-109. **4.** Bosiy D. O., Kirilyuk T. I. *Udoskonalennya nepryamogo metodu obliku vtrat elektrichnoї energiї v kontaktniy merezhi*. East European Journal of advanced technologies, 2012, No. 5/8 (59), pp. 35-39. **5.** Kirilyuk T. I. *Udoskonalennya metodu kontrolyu vtrat elektroenergiї v kontaktniy merezhi elektrifikovanikh zaliznits'*. Dnipropetrovsk: DNURT Publ., 2013, 22 p.

Поступила (received) 28.08.2015

УДК 62-868-551.43-58(045)

В. В. ОСАДЧИЙ, к.т.н., доц. ЗНТУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННОГО МОМЕНТА ОТДЕЛЬНОГО ДЕБАЛАНСА РЕГУЛИРУЕМОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ

Введение. В ходе исследований по созданию замкнутой системы управления регулируемого дебалансного вибровозбудителя [1] при решении задачи совместного управления взаимным расположением 4-х вращающихся дебалансов, оси которых жестко связаны с подвижной платформой, выделена подзадача регулирования углового положения единичного дебаланса, вращающегося вокруг подвижной оси. Предложена структура системы управления, обеспечивающая вращающемуся дебалансу заданный фазовый сдвиг относительно прямолинейных колебания его оси [2]. Указанное решение позволяет добиться требуемого взаимного расположения вращающихся дебалансов многодебалансного вибровозбудителя за счет поддержания заданных угловых положений каждого вращающегося дебаланса с помощью однотипных контуров регулирования. В результате математического моделирования 4-х дебалансного вибровозбудителя [3], система управления которого построена по описанному выше принципу, установлено, что при регулировании амплитуды колебаний платформы механическая мощность приводных двигателей дебалансов зависит от режима работы. Причем, максимальным значениям мощности отдельных двигателей соответствуют промежуточные значения амплитуды возмущающей силы. Данное обстоятельство следует учитывать при выборе электродвигателей и силовых преобразователей. Поэтому установление зависимостей, определяющих требования к электроприводу регулируемого вибровозбудителя, является актуальной задачей.

Цель. Получение аналитического выражения зависимости вибрационного момента отдельного дебаланса от параметров и режимов работы регулируемого вибровозбудителя.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим 4-х дебалансный регулируемый вибровозбудитель [1] при расположении осей вращения дебалансов в вершинах квадрата, диагонали которого пересекаются в центре масс подвижной платформы (рис.1.). В случае равных масс дебалансов $m_{деб}$ и эксцентриситетов ϵ регулирование амплитуды прямолинейной возмущающей силы обеспечивается при движении дебалансов в соответствии с выражениями

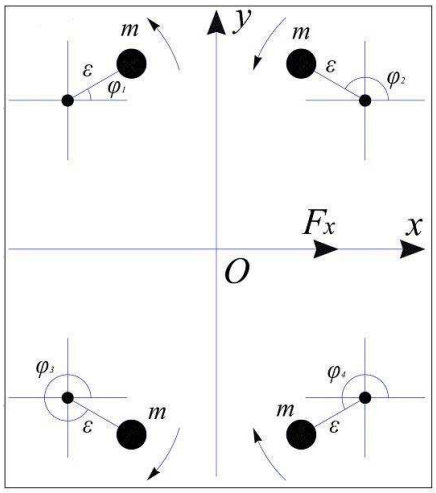


Рисунок 1 – Четырехдебалансный виброовозбудитель

$$\begin{cases} \varphi_1 = \omega_c t + \beta \\ \varphi_2 = \omega_c t - \beta + \pi \\ \varphi_3 = -\omega_c t - \beta \\ \varphi_4 = -\omega_c t + \beta - \pi \end{cases}, \qquad (1)$$

где $\varphi_1 \ldots \varphi_4$ - заданное угловое положение соответствующего дебаланса; ω_c - синхронная скорость вращения дебалансов β - параметр, обеспечивающий регулирование амплитуды колебаний вдоль оси x.

Учитывая то, что при движении дебалансов в соответствии с (1) сумма проекций возмущающих сил отдельных дебалансов на ось Y и сумма вращательных моментов указанных сил относительно центра масс подвижной платформы равны нулю будем рассматривать механические процессы для системы с одной степенью свободы – движение по оси X (Рис.2). При этом амплитуда суммарной возмущающей силы F_x, изменяющейся по гармоническому закону, с учетом (1) определяется выражением

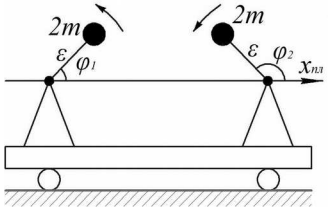


Рисунок 2 – Вибровозбудитель с одной степенью свободы

$$A_F = 4\, m_{деб}\, \epsilon\, \omega_c^2 \sin\beta \,. \qquad (2)$$

Амплитуда колебаний подвижной платформы, движение которой описывается дифференциальным уравнением

$$m_{пл}\ddot{x}_{пл} + k_x \dot{x}_{пл} + c_x x_{пл} = F_x \,, \qquad (3)$$

© В.В. Осадчий, 2015

где $m_{пл}$ - масса платформы, $x_{пл}$ - координата центра тяжести платформы, k_x - коэффициент вязкого трения,

c_x - коэффициент жесткости, с учетом (2) определяется выражением

$$A_X = \frac{4\, m_{деб}\, \epsilon\, \omega_{c^2} \sin\beta}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\,\omega_{c^2})^2 + k_x^2\,\omega_c^2}} \qquad (4)$$

Фазовый сдвиг между суммарной возмущающей силой F_Σ, равной F_x при условии (1), и колебаниями подвижной платформы определяется выражением

$$\varphi_\omega = -arg(c_x - m_{пл}\,\omega_{c^2} + jk_x\,\omega_c) \qquad (5)$$

В соответствии с векторной диаграммой (Рис.3.), отражающей на фазовой плоскости взаимное расположение возмущающих сил отдельных дебалансов (F_1 , F_2) и координаты центра масс подвижной платформы ($x_{пл}$), фазовые сдвиги между колебательным движением платформы и вращательными движениями дебалансов определяются для первого дебаланса выражением

$$\Delta_1 = -\varphi_\omega + \beta - \frac{\pi}{2} \qquad (6)$$

для второго дебаланса - выражением

$$\Delta_2 = -\varphi_\omega - \beta + \frac{\pi}{2} \qquad (7)$$

Учитывая выражения (5-7) и выражение для среднего вибрационного момента дебаланса, полученное в [2]

$$M_{деб.ср} = \frac{1}{2} m_{деб} \cdot \omega_c^2 \cdot \epsilon \cdot r \sin\Delta \qquad (8)$$

где r - радиус кривошипа, определяющий амплитуду колебаний оси дебаланса, которая в нашем случае не постоянна, а зависит в соответствии с (4) как от параметра β , так и от параметров вибровозбудителя, запишем вибрационные моменты отдельных дебалансов

$$\begin{cases} M_{деб.ср.1} = -\dfrac{2\, m_{деб}^2 \epsilon^2 \omega_c^4 \sin\beta \sin\left(-\varphi_\omega + \beta - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\omega_c^2)^2 + k_x^2 \omega_c^2}} \\ M_{деб.ср.2} = -\dfrac{2\, m_{деб}^2 \epsilon^2 \omega_c^4 \sin\beta \sin\left(-\varphi_\omega - \beta + \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\omega_c^2)^2 + k_x^2 \omega_c^2}} \end{cases} \qquad (9)$$

С учетом того, что в установившемся режиме выполняется равенство

$$M_{дв} + M_{деб.ср.} - k_{деб}\,\omega_c = 0 \,, \qquad (10)$$

где $M_{дв}$ - момент двигателя, приводящего в движение дебаланс, $k_{деб}$ - коэффициент вязкого трения при вращении дебаланса, определим зависимость механической мощности приводных двигателей от параметра регулирования β .

$$\begin{cases} P_{дв.1}(\beta) = \dfrac{m_{деб}^2 \epsilon^2 \omega_c^5 (\sin(\varphi_\omega - 2\beta) - sin\varphi_\omega)}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\omega_c^2)^2 + k_x^2 \omega_c^2}} + k_{деб}\,\omega_c^2 \\ P_{дв.2}(\beta) = \dfrac{m_{деб}^2 \epsilon^2 \omega_c^5 (\sin(\varphi_\omega + 2\beta) - sin\varphi_\omega)}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\omega_c^2)^2 + k_x^2 \omega_c^2}} + k_{деб}\,\omega_c^2 \end{cases} \qquad (11)$$

На Рис.4. представлены полученные зависимости при ω_c = 188.5 с$^{-1}$ и значениях параметров системы, приведенных в таблице 1. Абсолютная максимальная и минимальная механические мощности приводных двигателей, являющиеся экстремумами функций (11), определяются выражениями

$$\begin{cases} P_{max} = \dfrac{m_{деб}^2 \epsilon^2 \omega_c^5 (1 - sin\varphi_\omega)}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\omega_c^2)^2 + k_x^2 \omega_c^2}} + k_{деб}\,\omega_c^2 \\ P_{min} = \dfrac{m_{деб}^2 \epsilon^2 \omega_c^5 (-1 - sin\varphi_\omega)}{\sqrt{(c_x - m_{пл}\omega_c^2)^2 + k_x^2 \omega_c^2}} + k_{деб}\,\omega_c^2 \end{cases} \qquad (12)$$

Таблица 1 – Параметры системы

Параметр	Значение	Единицы измерения
$m_{пл}$	40	кг
k_x	1000	(Н·с)/м
c_x	355300	Н/м
$m_{деб}$	4.44	кг
ε	0.015	м
$k_{деб}$	0.005	(Н·м·с)/рад

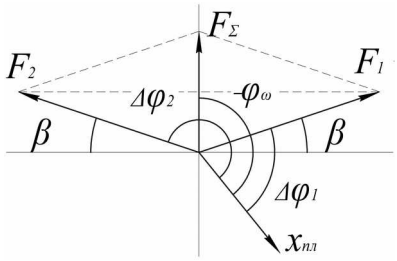


Рисунок 3 – Векторная диаграмма

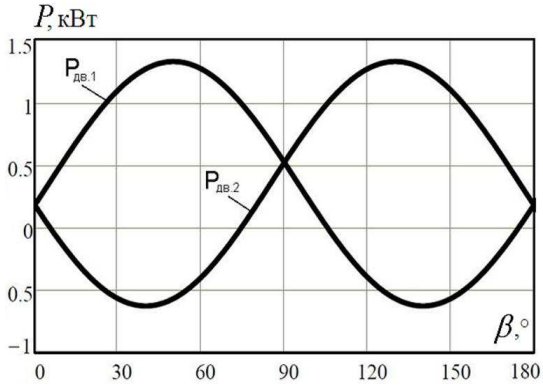


Рисунок 4 – Зависимость мощности двигателей от параметра регулирования

и для указанных ранее значений параметров системы составляют 1.32 кВт и -0.63 кВт соответственно.

Выводы:

1. Зависимости (11), графически представленные на рис.4., совпадают с аналогичными зависимостями, полученными путем математического моделирования [3].

2. Аналитические выражения (9), (11), (12), связывающие моменты и мощности приводных двигателей с параметрами системы и режимами ее работы, могут быть использованы для определения требований к элементам электропривода при создании регулируемого дебалансного вибровозбудителя.

3. С целью подтверждения полученных зависимостей необходимо создание на их основе механической части вибровозбудителя, выбор электропривода, программно-аппаратная реализация предложенных законов управления [2] и, в конечном итоге, проведение физического эксперимента.

Список литературы: 1. *Осадчий В.В., Батраченко И.В., Мыкытюк Д.В.* Регулируемый электропривод дебалансного вибровозбудителя // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2012. – Вип. 3 (19). – С. 194–197. **2.** *Осадчий В.В.* Регулирование углового положения дебаланса, вращающегося вокруг подвижной оси // Спецвыпуск Вестника НТУ «ХПИ» – Харьков: ХПИ. – 2013. – № 36– С. 213-214. **3.** *Осадчий В.В.* Математическая модель регулируемого дебалансного вибровозбудителя при плоскопараллельном движении // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2015. – Вип. 2 (30). – С. 17–23.

Bibliography (transliterated): 1. Osadchiy, V.V., Batrachenko, I.V. and Mykytyuk, D.V. (2012) Reguliruyemy elektroprivod debalansnogo vibrovozbuditelya [Adjustable electric drive of unbalance vibro-exciter"]. Electromekhanichni I energozberigayuchi systemy – Ukraina, Kremenchuk:, 2012, Vol. 3, no. 19, pp. 194–197. (in Russian).

2. Osadchiy V.V. Regulirovanie uglovogo polozheniya debalansa, vraschayushegosya vokrug podvizhnoy osi [Regulation of the angular position of the unbalance of the rotating around movable axis]. *Spetsvipusk Vestnika NTU "HPI"* - Ukraina, Kharkiv: KhPI, 2013, vol.36, pp. 213-214 (In Russian). **3.** Osadchiy V.V. Matematicheskaya model reguliruyemogo debalansnogo vibrovozbuditelya pri ploskoparallelnom dvizhenii [A math model of adjustable unbalanced vibroexciter by plane-parallel motion]. Electromekhanichni I energozberigayuchi systemy – Ukraina, Kremenchuk:, 2015, Vol. 2, no. 30, pp. 17–23. (in Russian).

Поступила (received) 23.08.2015

УДК 621.311.4.031

О. М. СІНЧУК, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет»
С. М. БОЙКО, канд., техн. наук, Кременчуцький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОВОЇ МІНІЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА БАЗІ КОМБІНОВАНОГО КОНТРОЛЕРА ПРИ ФУНКЦІОНУВАННІ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Вступ. У зв'язку з непривабливою, але реальною перспективою вичерпності традиційних видів палива та водночас продовженням росту потреби у використанні електроенергетичних ресурсів, значної загальнодержавної актуальності набуває проблема використання альтернативних відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕЕ) [1-3].

Постановка проблеми. Важливо, що очікуваний ефект від впровадження ВДЕЕ можливо досягти лише при масовому використанні та впровадженні їх в тому числі в промисловості та побуті. Тому актуальним, для впровадження ВДЕЕ є вітчизняні підприємства гірничо-металургійної галузі. В цьому аспекті, в свою чергу, привабливо бачити використання ВДЕЕ в вигляді вітрових мініелектростанцій (ВМЕ), котрі можуть бути розміщеними в підземних рудничних виробках шахт, де згідно технології ведення робіт постійно присутній штучно створюваний потік повітря з його сталими параметрами [4-7].

Між тим, для досягнення достатньої ефективності функціонування ВМЕ необхідне створення відповідної конструкції комплексу та алгоритму керування його електромеханічною частиною, що в свою чергу можливо лише при адекватній оцінці реальних можливостей даного виду ВМЕ для конкретних умов експлуатації. В свою чергу останнє можна отримати в потрібному обсязі лише моделюванням вищенаведених процесів [7].

Ціль дослідження. Оцінка та встановлення реальнодосяжних параметрів ВМЕ шляхом моделювання режимів їх функціонування в умовах залізорудних шахт.

Матеріал та результати досліджень. Першим кроком при виконанні даного етапу досліджень виберемо структуру ВМЕ. Для цього розглянемо ідеологію побудови системи керування вертикально-осьовою ВМЕ, яка працює автономно на шахтну електричну мережу. За даних умов шахт необхідно підтримувати оптимальну швидкість обертання вітрового колеса і максимум потужності, що відбирається від ВМЕ на базі асинхронного генератора (АГ), шляхом керування ємнісним струмом та баластним навантаженням ВМЕ. Якщо не будуть сталими ці основні параметри ВМЕ, то буде змінюватись амплітуда вихідної напруги установки, що за даних умов забезпечить зміни струму навантаження, а це в свою чергу впливатиме на зміну моменту навантаження вітрового колеса аж до забезпечення оптимальної швидкості обертання вітрового колеса. Така система дасть змогу автоматично підтримувати кутову частоту обертання вітроколеса, шляхом регулювання моменту навантаження ВМЕ. Важливою складовою розв'язання поставленої задачі є особливість конструктивного виконання ВМЕ, що проектується для експлуатації в умовах підземних виробок залізорудних шахт (ЗРШ).

Встановлено, що енергоефективним варіантом структури енергетичного комплексу таких ВМЕ є система з асинхронним генератором [5]. Однією з найбільш важливих проблем, що виникають при використанні АГ з конденсаторним збудженням в автономних системах електропостачання, є стабілізація напруги при змінній частоті обертів ротора та змінному навантаженні. Частота обертання генераторів може бути регульованою за умови сталості частоти генерованих коливань або залишатися постійною. У загальному випадку можлива робота генератора зі змінною частотою обертання ВК і змінною частотою ротора АГ.

Важливою умовою підвищення техніко-економічних показників ВМЕ є відповідність характеристик вітроагрегату вітровому режиму. На даний час існує багато систем керування ВМЕ, які, дозволяють працювати ВМЕ із нерегульованою швидкістю, забезпечуючи при цьому відбір максимальної потужності від вітроколеса, шляхом регулювання моменту навантаження генератора, однак при проектуванні системи керування ВМЕ, для експлуатації в умовах ЗРШ, необхідно також враховувати особливості технологічного процесу та середовища експлуатації [5].

Необхідність розробки системи керування полягає, головним чином, у тому, щоб забезпечити споживачів стабільною напругою з постійною частотою незалежно від зміни параметрів у будь-якій ланці системи.

На рис. 1 представлена структурна схема автоматизованої системи керування ВМЕ на базі асинхронного генератора до складу якої входять: ВК – вітрове колесо; АГ – асинхронний генератор з короткозамкненим ротором; БЗК – батарея збуджуючих конденсаторів; ЕМГ – електромагнітне гальмо; ДН – датчик напруги; ДЧ – датчик частоти обертів ВК; ДЧМ – датчик частоти напруги мережі; АЗП – автоматичний зарядний пристрій; АКБ – акумуляторна батарея; ПК – пристрій контролю стану АКБ; І – інвертор; БДК – батарея додаткових конденсаторів; БН – баластне навантаження; БС1, БС2 – блок симісторів; МКБ – мікропроцесорний блок; К1-К3 – керовані комутатори; Н – навантаження.

© О.М. Сінчук, С.М. Бойко, 2015

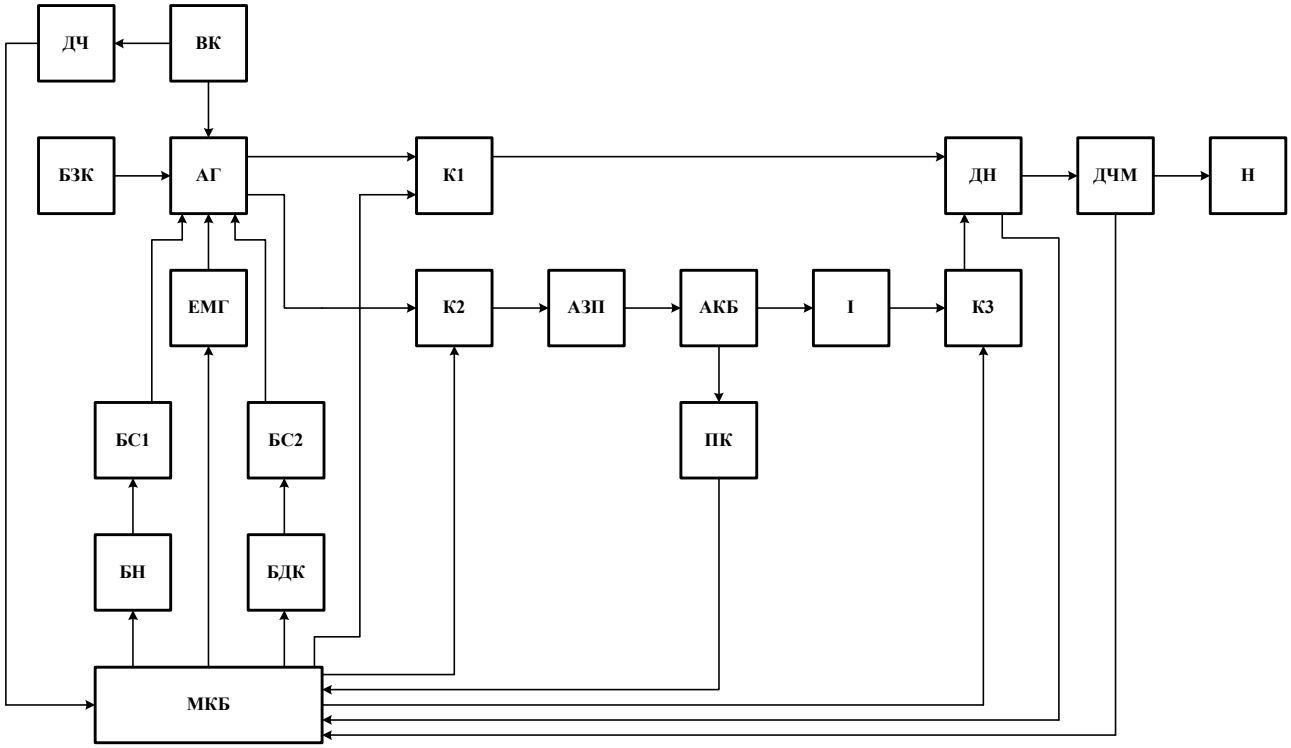


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи керування ВМЕ на базі асинхронного генератора

При нормальній роботі ВМЕ, відбувається електропостачання споживачів і заряд акумуляторних батарей. При аварійній ситуації, за допомогою відключення керованого комутатора, відбувається відключення навантаження від генератора, а за допомогою комутатора відбувається підключення навантаження до акумуляторної батареї через інвертор. Заряд акумуляторної батареї через комутатор відбувається до того часу, поки пристрій контролю стану акумуляторної батареї не виявить несправності або повного заряду акумуляторної батареї або автоматичний зарядний пристрій, в результаті невідповідності параметрів струму або напруги заряду, відключить акумуляторну батарею від генератора.

Під час обертання вітрового колеса та валу генератора, мікроконтролер аналізує величину сигналів, що надходять до нього, і робить висновок про величину заданої напруги для блоків симісторів. До того часу, поки ємність додаткових конденсаторів дозволяє регулювати величину вихідної частоти та напруги, ці параметри регулюються батареєю робочих конденсаторів. Якщо ж керування ємністю не приносить бажаного результату, а частота та напруга продовжують зростати, то напруга завдання подається на другу групу симісторів, які підключать баластне навантаження, яке регулює вихідну напругу та частоту.

Спираючись на наукові результати досліджень в роботах ряду авторів вхідними величинами для системи керування було визначено: частота обертання вітрового колеса $\omega_{ВК}$, швидкість вітрового вентиляційного потоку $u_{ВК}$, похідна від змінного значення швидкості вітрового вентиляційного потоку $du_{ВК}/dt$, струм навантаження ВМЕ $I_н$, вихідна напруга ВМЕ $U_{вих}$.

Структура регулятора побудована за каскадним принципом, таким чином, що внутрішній контур є контур регулювання напруги, а зовнішній контур є контур підтримання кутової швидкості вітрового колеса.

Використовуючи підхід та результати досліджень в роботах [4, 5], математичну модель контуру підтримання заданої кутової швидкості вітрового колеса ВМЕ можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \Delta\omega = \begin{cases} \left|\omega(t) - \omega_{опт}\right| - k_{\text{u}} \cdot u_{в.п.}(t), \text{ якщо } \dfrac{du_{\text{в.п.}}}{dt} < 0, \\ \left|\omega(t) - \omega_{опт}\right| + k_u \cdot u_{\text{в.п.}}(t), \text{ якщо } \dfrac{du_{\text{в.п.}}}{dt} > 0, \end{cases} \\ U_{завд}(t) = k_\omega \cdot \Delta\omega + \int\limits_0^{2T} \Delta\omega dt. \end{cases} \quad (1)$$

де $\Delta\omega$ – різниця між заданим і поточним значенням кутової швидкості; $\omega_{опт}$ – значення оптимальної швидкості обертання; $\omega(t)$ – значення кутової швидкості в поточний момент часу; k_v – коефіцієнт передачі по швидкості вентиляційного повітряного потоку; $u_{ВК}(t)$ – значення швидкості вентиляційного повітряного потоку в поточний момент часу; $u_{ВК}$ – змінне за 2Т значення швидкості вентиляційного повітряного потоку (усереднення за 2Т); $du_{ВК}/dt$ – похідна від ковзного за 2Т значення швидкості вентиляційного повітряного потоку; $U_з(t)$ –

завдання напруги ВМЕ в поточний момент часу; k_ω – коефіцієнт передачі по кутовій швидкості обертання колеса; Т – період обертання вітрового колеса.

Зовнішній контур представлений контуром регулювання напруги, вхідним сигналом для якого є $U_з(t)$. Його математичну модель запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \Delta U = U_{завд.}(t) - \left(U(t) - k_I I_н(t)\right), \\ I_{упр.сигн.}(t) = k_{роб} \cdot \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right), де \begin{bmatrix} \Delta U > 0, то\ I_{ємн} \\ \Delta U < 0, то\ I_{БН} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

де ΔU – різниця між заданим і поточним значенням напруги; k_I – коефіцієнт передачі по струму навантаження; $I_н$ – поточне значення струму навантаження ВМЕ, А; $I_{ємн}$ – поточне значення ємнісного струму ВМЕ, А; k_u – коефіцієнт передачі по напрузі, $k_{роб}$ – дискретна величина, при якій можлива генерація електричної енергії при мінімально допустимій швидкості обертання ВК ω_{min}, причому $k_{роб} = 1$, якщо $\omega(t) \geq \omega_{min}$ і $k_{роб} = 0$, якщо $\omega(t) < \omega_{min}$ [4].

При використанні запропонованого закону регулювання, що адаптований до умов роботи ВМЕ з асинхронним генератором до умов ЗРШ, є можливість автоматично регулювати ємнісний струм ВМЕ для підтримки оптимального значення швидкості обертання вітрового колеса та отримання якісної згенерованої електричної енергії.

Так як при керуванні ВМЕ вхідними параметрами системи керування є невизначені дані, то ВМЕ працює по некерованому графіку. Характерною особливістю системи керування ВМЕ є те, що вона в умовах ЗРШ являється нелінійним та нестаціонарним об'єктом керування, так як вона знаходиться під впливом динамічних вентиляційних повітряних навантажень, які мають непередбачувані зміни енергетичних параметрів повітряного потоку [3].

Недостатнє врахування всіх факторів, які впливають на різницю між відносними значеннями швидкості повітряного вентиляційного потоку в виробках ЗРШ та швидкості обертання вітрового колеса ВМЕ, є істотним недоліком, щодо використання існуючих законів керування, що в свою чергу призводить до погіршення стійкості систем автоматичного керування, відхилення напруги на виводах ВМЕ. До вказаних факторів відносяться показники мікроклімату ЗРШ, де експлуатується ВМЕ. Врахування наведених факторів, які в свою чергу можуть змінюватися за складними залежностями та за великої кількості умов протягом певного часу, передбачає можливість зробити висновок щодо застосування математичного апарату нечітких множин для побудови моделі автоматичного регулятора.

В результаті аналізу роботи ВМЕ можна зробити висновок про те, що системи автоматичного керування для вітрових енергетичних установок, на основі нечітких регуляторів, довели свою ефективність шляхом покращення якості регулювання для одержання менших похибок в стаціонарних та перехідних режимах роботи [3]. Таким чином, вдосконалення закону керування можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить покращити якість регулювання вихідних параметрів згенерованої електричної енергії ВМЕ, що працює в умовах ЗРШ.

Враховуючи вище викладене, сигнали з датчиків передаються на регулятор, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування ємнісним струмом чи баластним навантаженням, для підтримки ємнісного струму, а отже і моменту навантаження, при якому встановиться оптимальна швидкість обертання вітроколеса ВМЕ, що сприяє максимальному відбору потужності необхідної якості.

Структурну схему каналу регулювання системи керування можна схематично представити у схематичному вигляді зображеному на рис. 2 [4].

Як видно з рис 2, на вхід нечіткого регулятора подаються такі сигнали – кутова швидкість обертання вітрового колеса $\omega_{ВК}$, швидкість вітрового потоку $u_{в.п.}$, похідна від змінного значення швидкості вітрового потоку $du_{з.в.п.}/dt$, та його похідної, оптимальне значення кутової швидкості $\omega_{опт}$. Вихідним сигналом каналу нечіткого регулятора системи керування є сигнал $U_{завд.}$ відпирання, який надходить до регулятора, який через блок керування змінює значення ємнісного струму та баластного навантаження.

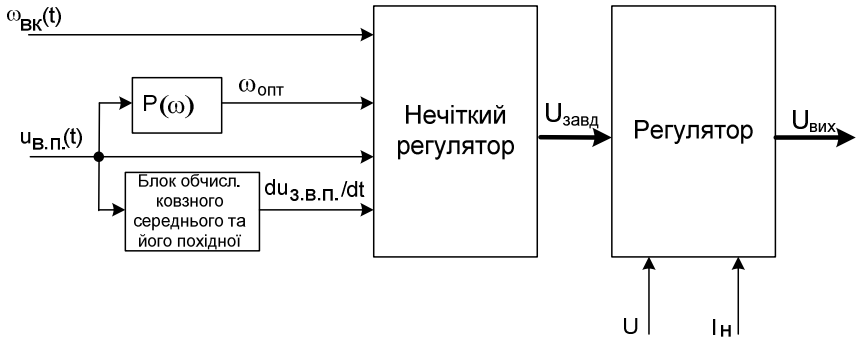


Рис. 2 Структурна схема каналу регулювання системи керування вітроенергетичною установкою

Структурну схему блоку нечіткого логічного висновку про значення величини заданої напруги керування, можна подати у вигляді (рис. 3).

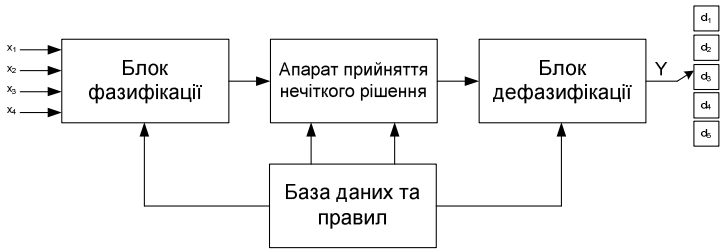


Рис. 3 Структурна схема блоку нечіткого логічного висновку системи керування ВМЕ

Автоматичне керування ємнісним струмом передбачається здійснювати в два прийоми, застосування кожного з них залежить від швидкості обертання вітрового колеса. А отже, при швидкості обертання вітрового колеса, що входить в діапазон швидкостей для генераторного режиму роботи асинхронного генератора пропонується використовувати математичну модель регулятора з використанням нечіткої логіки, при інших швидкостях, що не входять до згадуваного діапазону достатньо використовувати ПІ-закон регулювання [5].

Таким чином, використавши запропонований закон [4-6] з врахуванням умов роботи ВМЕ в умовах підземних виробок ЗРШ із застосуванням асинхронного генератора, закон керування ВМЕ буде мати наступний вигляд:

$$
\begin{cases}
\Delta\omega = \begin{cases} |\omega(t) - \omega_{опт}| - k_{\text{u}} \cdot u_{в.п.}(t),\ якщо\ \dfrac{du_{\text{в.п.}}}{dt} < 0, \\ |\omega(t) - \omega_{опт}| + k_u \cdot u_{\text{в.п.}}(t),\ якщо\ \dfrac{du_{\text{в.п.}}}{dt} > 0, \end{cases} \\
U_{завд.}(t) = \begin{bmatrix} k_\omega \cdot \Delta\omega + \int\limits_0^{2T} \Delta\omega dt;\ якщо\ \omega_{ВК} \in [0;0{,}9\omega_н] \cup [1{,}1\omega_н;2\omega_н], \\ fuzzy\,(\text{f}_н, \omega_н, U_н, u_{в.п.}),\ якщо\ U_{вих} \in [0{,}7U_н;0{,}9U_н] \cup [1{,}1U_н;1{,}3U_н], \end{bmatrix} \\
\Delta U = U_{завд.}(t) - (U(t) - k_I I_н(t)), \\
I_{упр.сигн.}(t) = k_{роб} \cdot \left(k_u \cdot \Delta U + \int\limits_0^T \Delta U dt \right), де \begin{bmatrix} \Delta U > 0, то\ I_{ємн} \\ \Delta U < 0, то\ I_{БН} \end{bmatrix}.
\end{cases}
$$

$$
k_{роб} = 1,\ якщо\ \omega(t) \ge \omega_{\min} \qquad (3)
$$

$$
k_{роб} = 0,\ якщо\ \omega(t) < \omega_{\min}
$$

З метою збільшення надійності функціонування системи керування ВМЕ у всьому діапазоні зміни швидкостей повітряного вентиляційного потоку пропонується застосування комбінації чіткого та нечіткого законів, у вигляді двох каналів керування регулятора з переключенням між ними у функції швидкості обертання вітроколеса.

У зв’язку з тим, що використання класичних критеріїв стійкості у даному випадку не є можливим, тому для дослідження системи автоматичного регулювання на стійкість буде застосоване комп'ютерне моделювання

в середовищі MatLab 6.5. Застосування комп'ютерної моделі дозволить провести пошук оптимальних параметрів налаштування регулятора на роботу з ВМЕ.

Під час моделювання роботи ВМЕ із системою керування на базі нечітких правил були одержані графіки, які ілюструють особливості роботи ситеми керування (рис. 4-9).

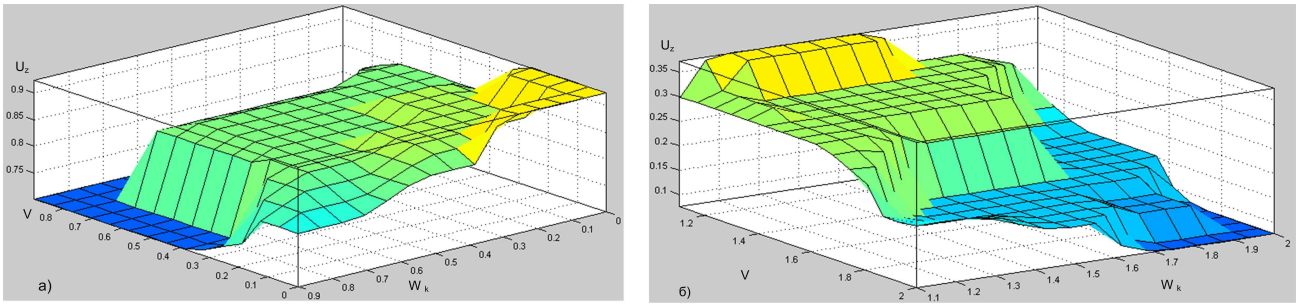


Рис. 4 Залежність напруги завдання: а) для блоку додаткових конденсаторів від вихідної частоти та напруги генератора, швидкості повітряного потоку та обертання вітрового колеса; б) для баластного навантаження від вихідної частоти та напруги генератора, швидкості повітряного потоку та обертання вітрового колеса

На рисунку 5 представлений графік зміни швидкості повітряного потоку протягом 50 с.

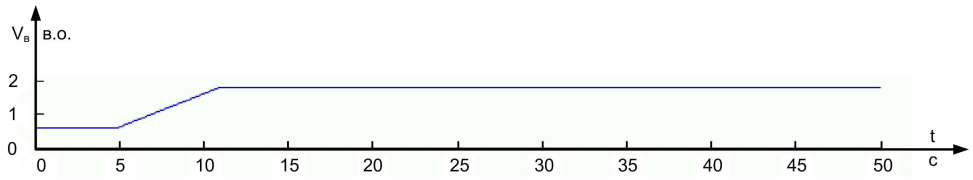


Рис. 5 Графік зміни швидкості повітряного потоку протягом 50с.

На рисунку 6 представлений графік зміни частоти обертання вітрового колеса зі зміною швидкості повітряного потоку

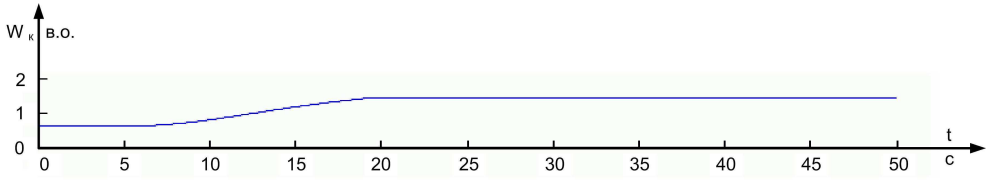


Рис. 6 Графік зміни частоти обертання вітрового колеса зі зміною швидкості повітряного потоку

Як видно із графіка, частота обертання вітрового колеса змінюється повільніше та більш плавно, ніж зростає швидкість повітряного потоку.

На рисунку 7 представлений графік зміни вихідної напруги генератора за певний проміжок часу зі зміною швидкості повітряного потоку.

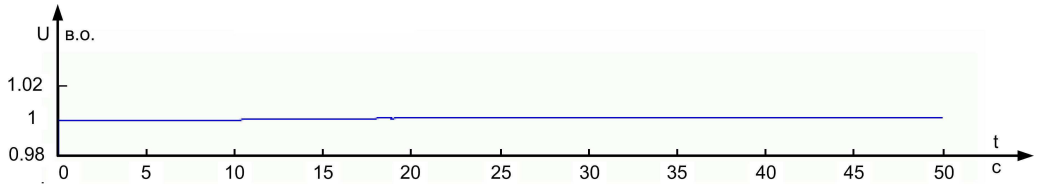


Рис. 7 Графік зміни вихідної напруги генератора за певний проміжок часу зі зміною швидкості повітряного потоку

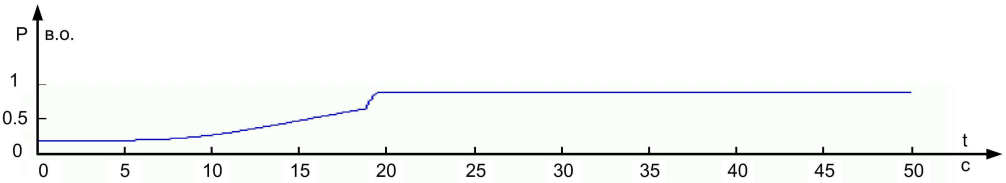


Рис. 8 Графік зміни виробленої генератором потужності

Як видно із отриманого графіка, значення згенерованої напруги залишається близькою до номіналу, незважаючи на зміну швидкості повітряного потоку.

На рисунку 8 представлений графік залежності виробленої генератором потужності від зміни швидкості повітряного потоку протягом певного проміжку часу.

Як видно із данного графіка (рис. 8), величина виробленої потужності збільшується при зростанні швидкості повітряного потоку та обертання ВК.

На рисунку 9 представлений графік зміни споживання реактивної потужності асинхронного генератора зі зміною швидкості повітряного потоку.

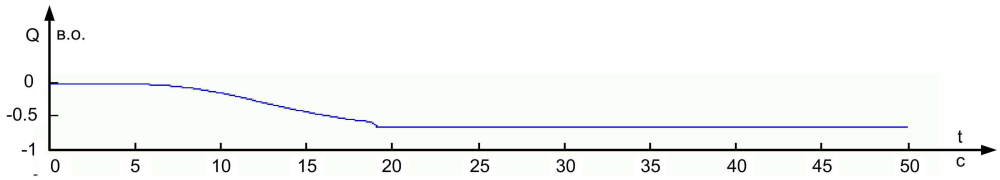


Рис. 9 Графік зміни споживання реактивної потужності асинхронного генератора

Як видно із графіку, асинхронний генератор зменшує споживання реактивної потужністі із збільшенням кількості обертів вітрового колеса ВМЕ.

Такий варіант програмування дозволяє системі керування реагувати на будь-які зміни в ланках ВМЕ і відповідно до цих змін регулювати вихідні параметри асинхронного генератора.

Запропонована структура ВМЕ і система управління ним дозволяють збільшити надійність і якість електропостачання споживачів, збільшити термін служби батарей, забезпечувати своєчасні заміни елементів, що вийшли з ладу, і знизити витрати на їх експлуатацію, а також підтримувати безперебійність електропостачання споживачів ЕЕ [7].

Висновки. 1. В результаті використання вентиляційних повітряних потоків підземних виробок залізорудних шахт, з перетворенням вітрової енергії в електричну є реальна можливість генерувати і використовувати ЕЕ для власних потреб підземних підприємств, заощадивши при цьому засоби на її закупівлю.

2. Розроблену математичну модель та закон керування ємнісним струмом та баласним навантаженням ВМЕ, а також структуру системи автоматичного керування рекомендовано для використання при проектуванні ВМЕ в умовах підземних виробок ЗРШ.

3. Моделювання режимів роботи ВМЕ в умовах ЗРШ, показало що запропонована система керування ВМЕ скорегована із врахуванням мікроклімату підземних виробок ЗРШ, оскільки запропоновано використовувати адаптовану систему автоматичного керування ВМЕ з комбінованим регулюванням.

Список літератури: **1.** Шидловский А.К. Геоекономіка та геополітика України / А.К. Шидловский, Г.Г. Півняк, М.В. Рогоза, С.І. Випанасенко// навч. посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. – 282 с. **2.** G. Moor and H. Beukes, “Power point trackers for wind turbines,” Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004. **3.** T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, “Optimum control of ipmsg for wind generation system,” Power Conversion Conference (PCC), vol. 3, pp. 1435–1440, 2002. **4.** Q. Wang and L.-C. Chang, “An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1242–1249, September 2004. **5.** E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, April 2006. **6.** Сінчук О.М. Електромеханічний комплекс вітроенергетичної установки для використання в підземних виробках залізорудних шахт / О.М. Сінчук, С.М. Бойко // Восточно-европейский журнал передовых технологий – Харків, 2013. – № 1/8 (67). – С. 13-21. **7.** Сенько В.І. Математична модель системи керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної установки на базі fuzzy контролера / В.І. Сенько, С.М. Бойко, М.А. Щербак, А.О. Жуков // Електротехнічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук, КрНУ, 2013. – Вип. 3/2013 – 103-111 с.

Bibliography (transliterated): 1. Shidlovskij A.K., Pivnyak G.G., Rogoza M.V., Vipanasenko S.I. *Geoekonomika ta geopolitika Ukraïni*. Dnipropetrovs'k, 2007. Print. **2.** G. Moor and H. Beukes, “Power point trackers for wind turbines,” Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004. Print. **3.** T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, “Optimum control of ipmsg for wind generation system,” Power Conversion Conference (PCC), vol. 3, pp. 1435–1440, 2002. Print. **4.** Q. Wang and L.-C. Chang, “An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1242–1249, September 2004. **5.** E. Koutroulis and K Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, April 2006. Print. **6.** Sinchuk O.M., Bojko S.M. "Elektromehanichnij kompleks vitroenergetichnoï ustanovki dlya vikoristannya v pidzemnih virobkah zalizorudnih shaht." *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovih tehnologij*, № 1/8 (67) (2013): 13-21. Print. **7.** Sen'ko V.I., Bojko S.M., Scherbak M.A., Zhukov A.O. "Matematichna model' sistemi keruvannya elektrotehnichnim kompleksom vitroenergetichnoï ustanovki na bazi fuzzy kontrolera." *Elektrotehnichni i energozberigayuchi sistemi. Tematichnij vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya j praktika» naukovo-virobnichogo zhurnalu*. 3/2013 (2013): 103-111. Print.

Надійшла (received) 25.08.2015

УДК 622.625.28-83

И. О. СИНЧУК, канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «Криворожский национальный университет»;
А. В. ОМЕЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «Криворожский национальный университет»;
В. А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РУДНИЧНЫХ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ

Введение. Практически на всех отечественных горнодобывающих предприятиях, с подземным способом добычи железорудного сырья (ЖРС), для его доставки используется около 20-ти видов и типов двухосных электровозов, классифицируемые как рудничные виды [1]. К сожалению, ухудшение условий добычи ЖРС, в связи с понижением уровней ведения горных работ до глубин 1500-2000м, отрицательно сказывается на показателях транспортировки ЖРС [2-4]. В силу этого, из года в год доля затрат на доставку ЖРС в общей его себестоимости добычи увеличивается, что негативно сказывается на конкуренции выпускаемой продукции на мировом рынке сырья [2-3]. Т.е. доставка ЖРС, а точнее – электровозный транспорт, должен иметь естественную тенденцию постоянного совершенствования путем модернизации основной тяговой единицы – электровоза, а точнее его тяговой электромеханической системы (ТЭМС) [4-6].

На железорудных шахтах, в отличие от угольных шахт, где используется смешанная циклично-поточная система доставки полезных ископаемых (ПИ) вида: конвеер – электровозосоставов ведомый аккумуляторными типами электровозов, используется циклическая доставка ПИ при помощи контактных электровозов со сцепной массой 14 т и, реже, 10 т. Именно технология транспортирования сырья определяет режимы функционирования ТЭМС, систем управления ими, способ управления уровнем напряжения на зажимах тяговых электрических двигателей, выбор параметров последнего и вид исполнения электрооборудования электровозов [7].

Постановка задачи. Совершенствование конструкции рудничных электровозов с точки зрения ожидаемого повышения эффективности функционирования электровозосоставов в подземных выработках железорудных шахт напрямую зависит от вида применяемой ТЭМС и системы управления ею. Безусловно, это должно быть связано с энергоэффективностью, надежностью, долговечностью и возможностью автоматического управления комплексом внутришахтного электровозного транспорта (ВШТ).

Опыт эксплуатации контактных типов электровозов в условиях рудных шахт показывает, что недостаточное внимание специфики этих предприятий, с точки зрения функционирования ВШТ, снижает прогнозируемый положительный результат применения нового оборудования, в т.ч. систем управления (ВШТ) и их тяговыми системами.

Связано это с тем, что, во-первых, конструкционные усовершенствования рудничных типов электровозов в нашей стране носят пока явно условное содержание – они практически мало чем отличаются от первых образцов эксплуатируемых более 100 лет тому назад. Во – вторых, при конструировании анализируемых типов электровозов, а точнее их электромеханических систем (тяговых электроприводов) не учитывается специфика железорудных шахт и отличие этой специфики, например, от угольных [8].

Под спецификой следует понимать, что для выяснения ее качественной стороны необходимо основываться на горногеологических особенностях месторождения и на технологическом процессе производства. Эти слагаемые необходимо учитывать с целью получения положительных результатов – основы для создания требуемоэффективного электровозного парка по всем показателям всего комплекса ВШТ.

К горногеологическим особенностям относятся: ограниченность размеров поперечного сечения откаточных выработок, обводнение и повышенная влажность, отсутствие естественного (дневного) света, наличие в воздухе абразивной пыли, относительное постоянство температуры, движение воздуха, коэффициент сцепления колёс с рельсами.

К особенностям технологического процесса доставки ПИ относятся: схема транспортировки руды и породы, путевое хозяйство шахты, цикличный характер откатки, скорость движения электровозов, коэффициент сцепления.

Технико-экономические причины обуславливают прохождение подземных выработок оптимальных размеров, в которых совмещается работа электровозов и перемещение людей. Для обеспечения безопасности людей это значительно сказывается на технологии движения электровозосоставов и, следовательно, на режиме функционирования их ТЭМС.

Постоянное осаждение пыли и влаги значительно ухудшает работу электрических контактных групп электровозов, а также снижает качество изоляции. Сама по себе запыленность воздуха не представляет специфических свойств подземных выработок по сравнению с поверхностью, но непрерывно действуя совместно с прочими факторами, еще более усугубляет непростые рудничные условия эксплуатации ВШТ.

Рельсовые пути ВШТ подразделяют на магистральные, ортовые и маневровые. Каждый вид пути характеризуется своей особенностью заключающейся в строении и соответствующем состоянием.

© А.В. Омельченко, В.А. Федотов, 2015

При этом следует отметить, что рельсовые пути в ортах, содержатся в неудовлетворительном состоянии: балласт не подбивается, путь не отрихтован и часто засыпан рудной мелочью, значительно увеличивая сопротивление движению. Указанное выше положение реально существует в отечественных шахтах и не может не учитываться при рассмотрении условий работы электровозосоставов и, естественно, их электромеханических систем.

Важным показателем, определяющим режимы функционирования ТЭМС, особенно при пуско-тормозных режимах, является коэффициент сцепления колес электровоза с рельсами, который в рудных шахтах значительно выше, чем в угольных. По данным [10] он достигает значения 0,22-0,24, вместо 0,13 для угольных шахт. В связи с этим тяговые возможности электровозов одного сцепного веса в рудных шахтах выше, чем в угольных, что должно соответственно отражаться на обосновании в выборе мощности тяговых электрических двигателей (ТЭД) [9].

Материал исследования. Режимы функционирования электровозного ВШТ для рудных шахт исследовались в разные временные периоды Рысьевым В.П., Рентгевичем А.А., Гузовым Э.С., Кордаковым В.Н., Карагаевым В.П., Оатом Г.П., Синчуком О.Н, Синчуком И.О. и др.

Все эти исследования имеют значительный срок давности: 25-50 лет. Условия шахт после этих сроков изменились и значительно. С увеличением глубины разработки сокращаются рудные площади и одновременно, увеличивается длина транспортных магистралей. Это обусловлено как ухудшением горногеологических условий (выклиниванием залежей) с понижением уровня ведения горных работ, так и спецификой вскрытия железорудных месторождений – вертикальными стволами в лежачем боку залежей. Так если в 1981 г. эксплуатационные площади шахт ПАО «Криворожский железорудный комбинат» по сравнению с 1975 г. сократились на 12%, то в 2007 году уже на 52% [2-3]. При существующей интенсивности разработки понижение горных работ составляет 18-20 м в год. Эти факторы отрицательно сказываются на показателях работы предприятия в целом и откатки в частности.

Для уяснения специфики динамики ВШТ в современных железорудных шахтах авторами в течение 2011-2014 годов были проведены «точечные» экспериментальные исследования в шахтах ПАО «Криворожский железорудный комбинат». Было установлено, что структура транспортировки ПИ осталась неизменной. Однако изменились длины откаточных горизонтов и их участков. С точки зрения режимов функционирования электровозов и их ТЭМС это существенно, т.к. изменилась пропорция режимов – установившиеся или переходные. Доля переходных уменьшилась в объеме цикла на 7-10%. Однако по прежнему эта доля весьма значима и является определяющей с точки зрения влияния на долговечность слагаемых ТЭМС.

Для наглядности оценки режимов работы приводов рудничных электровозов было произведено осциллографирование основных параметров ТЭМС электровозов в различных условиях и в различных железорудных шахтах. В ходе исследований фиксировались ток тяговых двигателей и скорость движения электровозосостава (рис. 1 – 5).

Из анализа осциллограмм установлено, что при расположении состава под уклон (рис. 1, 3), разгон происходит с плавным нарастанием скорости. Реализуемые при этом ускорения – около 0,1 м/с^2. При тяжелых условиях пуска – разгон того же электровозосостава 235 т на подъем (рис. 2, 4) работа системы управления, а следовательно, и вид погрузочной диаграммы другие, т.е. очевидно, что режимы функционирования ТЭД ныне эксплуатируемых электровозов и их ТЭМС, в силу «бросков» токов и напряжения, динамичнонеустойчивы.

При этом, в очередной раз, следует констатировать факт того, что контакторно-резисторное управление уровнем напряжения на зажимах ТЭД, как ступенчатый вид регулирования, является далеко не оптимальным как по электроэффективности, так и по динамике ТЭМС (рис. 5).

Более того, в очередной раз констатируем, в т.ч. исходя из осциллограмм (рис. 1 – 5), что существующие структуры ТЭМС эксплуатируемых контактных электровозов (К10, К14) являются носителями массы технических и экономических недостатков, главным из которых является необоснованно большие потери электрической энергии в пуско-регулировочных реостатах, броски тока и напряжения при пуске-торможении, и низкая надежность (рис. 6).

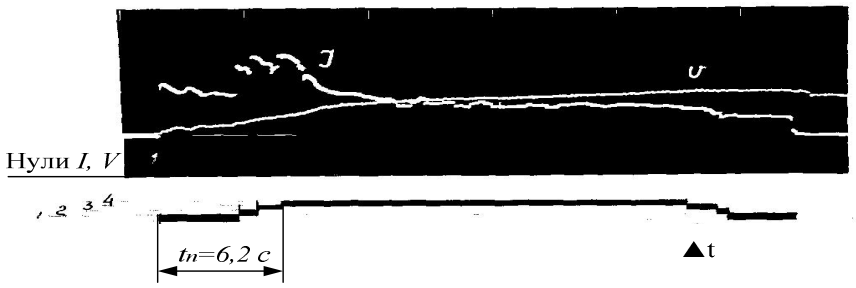


Рис. 1. Осциллограмма тока и напряжения тягового двигателя при пуске и движении с пониженной скоростью груженого электровозосостава весом 235 т (ш. Родина, горизонт 1320м): ▲1 – сработало РТ, фиксируя превышение скорости V=5,6 км/ч; масштабы тока M_I=13,5 А/мм, скорости M_V=0,615 (км/ч)/мм; времени M_t=0,333 с/мм.

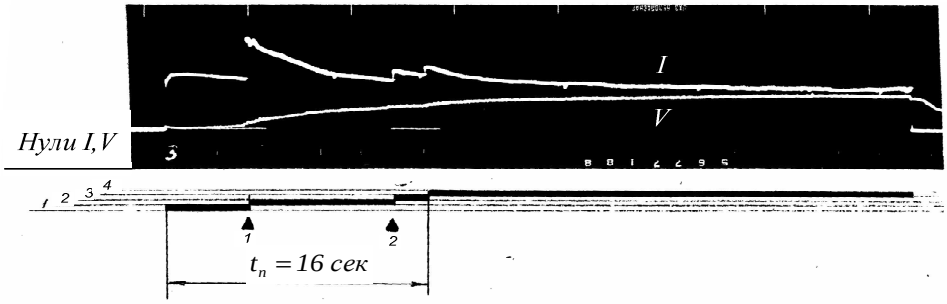


Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения тягового электрического двигателя при пуске и движении электровозосостава с пониженной скоростью на подъеме (ш. Гвардейская, горизонт 1342м): ▲1 – сработало РТ, I=262 A; ▲2 – отпускание РТ, I=348 A.

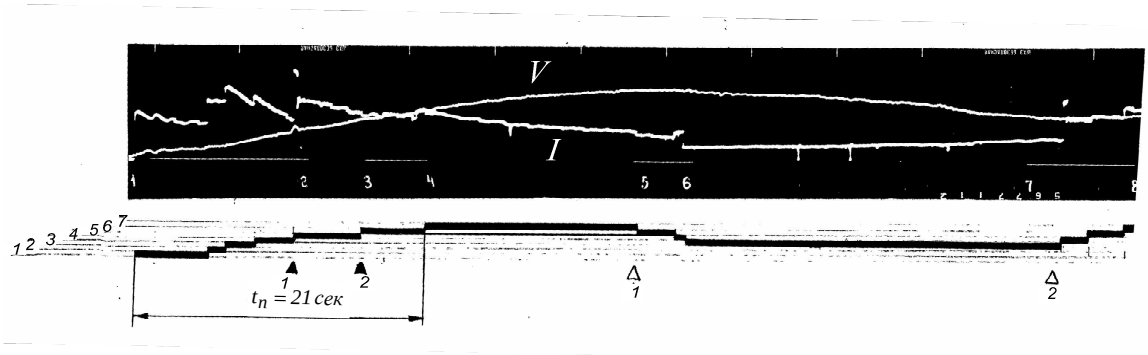


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения тягового электрического двигателя при пуске и движении с полной скоростью груженого состава весом 235 т (ш. Гвардейская, горизонт 1342м): ▲1 – срабатывание РТ, Δ1 – превышение скорости V=16,1 км/ч; ▲2 – отпускание РТ, Δ2 – снижение скорости V=6,76 км/ч.

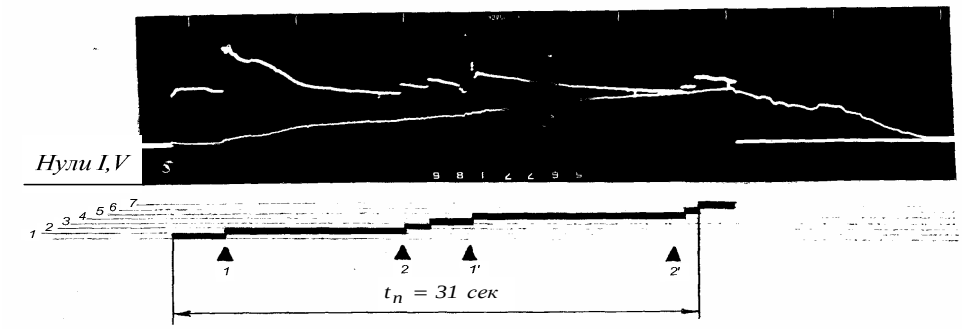


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения тягового электрического двигателя при пуске до полной скорости груженого состава весом 235 т на подъем (ш. Гвардейская, горизонт 1342м): ▲1, ▲1′ – срабатывание РТ; ▲2, ▲2′ – отпускание РТ.

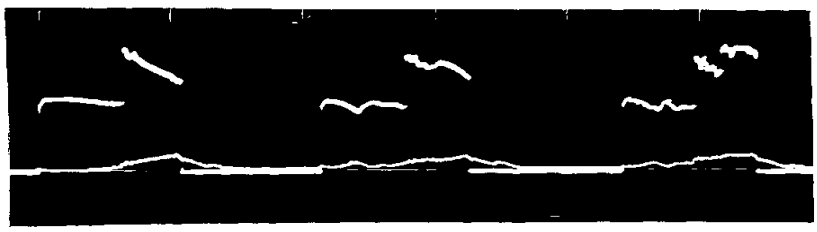


Рис. 5. Осциллограмма электрических параметров тягового двигателя в пусковых режимах при погрузочной операции в орт-заезд (ш. Родина, горизонт 1320м).

С целью устранения одного из вышеперечисленных параметров – бросков тока и напряжения, авторами были предложены модификации существующих схем (рис. 7), которые обеспечивают улучшенные показатели функционирования ТЭМС при пуске (торможении).

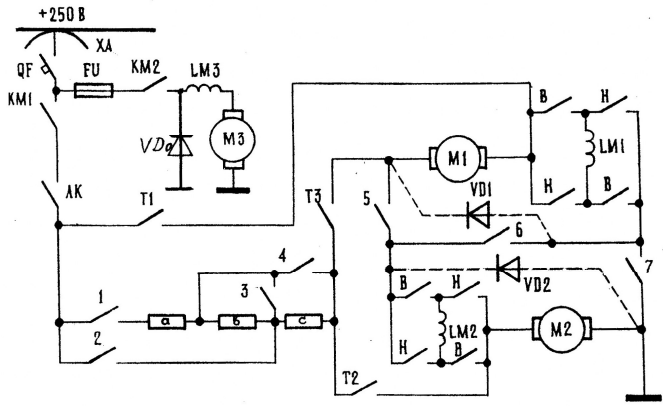
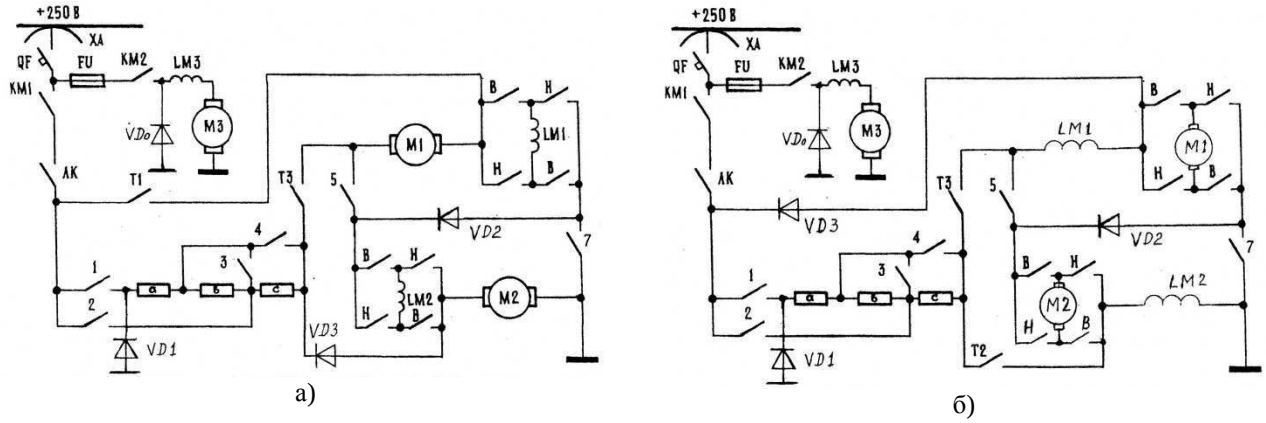


Рис. 6. Принципиальная схема шахтного контактного электровоза

Но и этого недостаточно при современной трактовке требований к ТЭМС и техническим возможностям их реализации существующими техническими возможностями аппаратной реализации. Более того, в последние годы были разработаны варианты электроэнергоэффективных ТЭМС с IGBT инверторами и тяговыми асинхронными двигателями в двух и трехфазном исполнении. [4-6, 8], рис. 8. В данных вариантах каждый тяговый двигатель М1 и М2 получает питание от своего инвертора Инв.1 и Инв.2, что обеспечивает их независимую работу. Это позволяет максимально использовать тяговые возможности электровоза, как в двигательном, так и в тормозном режимах с учетом расхождения характеристик двигателей и нагрузок на оси, и достичь ожидаемой энергоэффективности всего комплекса ВШТ.



а) б)

Рис. 7. Скорректированная схема контактного электровоза: а) с реверсом обмоток возбуждения; б) с реверсом обмоток якорей

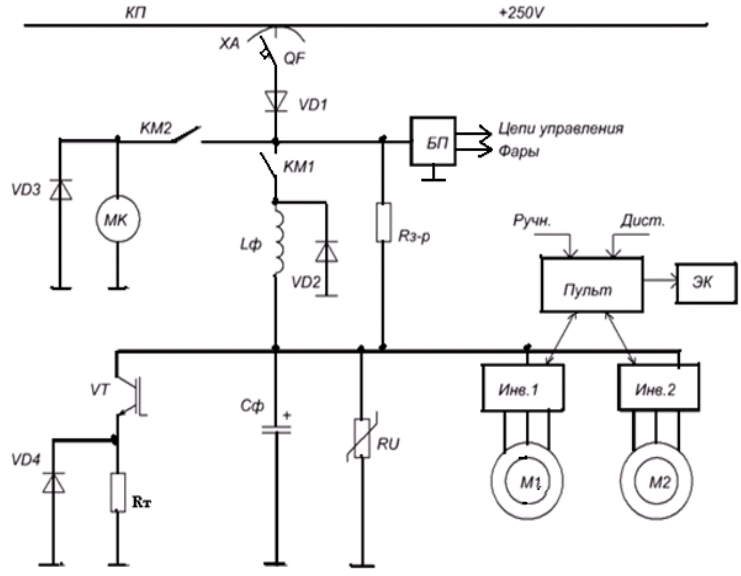


Рис. 8. Упрощенная схема контактного электровоза с асинхронным приводом

На рис. 9 представлены машинограммы механических характеристик тягового асинхронного электропривода с векторным управлением при неравномерной нагрузке тяговых двигателей. С представленных графиков видно, что разгон электропривода под нагрузкой до установившегося значения составляет 0,0334с и 0,074с, отработка сброса загрузки потребовала 0,003с и 0,006с, наброс нагрузки не отразился на скорости и был отработан за 0,03с. Перерегулирование при пуске составило 0,16% и 0,13%, при сбросе нагрузки 0,096% и 0,048%, при набросе нагрузки практически отсутствует. Все это подтверждает эффективность функционирования данных типов ТЭМС, а, следовательно, электровозов в целом.

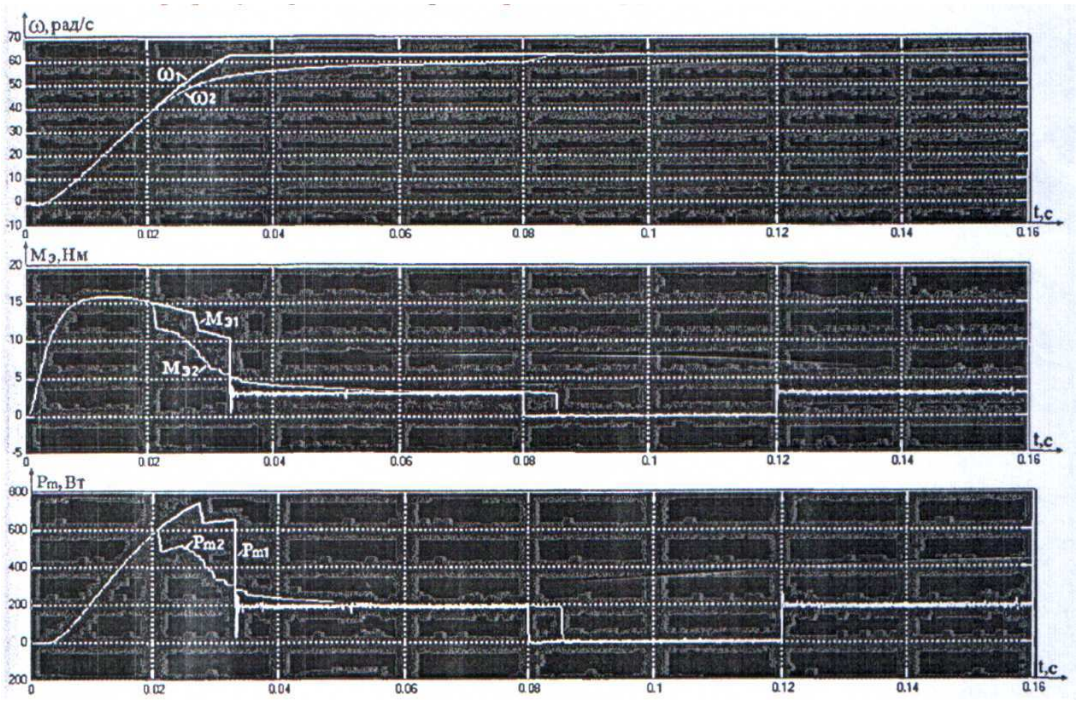


Рис. 9. Машинограммы механических характеристик двухдвигательного тягового асинхронного электропривода с векторным управлением

Выводы. 1. Существующие контакторно-резисторные системы управления тяговым электроприводом рудничных электровозов не могут обеспечить достаточно эффективные режимы функционирования последних.

Предлагаемые варианты тяговых электровозов типа IGBT-тяговые асинхронные электрические двигатели позволяют достичь требуемого уровня эффективности функционирования ТЭМС рудничных электровозов, особенно в пуско-тормозных условиях.

Список литературы: **1.** *Дебелый В. Л.* Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / *В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А.Мельников* // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31. **2.** Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009-2010 гг. : Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004-2011 гг. / *Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик* [и др.]. – Кривой Рог : Видавничий дім, 2011. – 329 с. **3.** Комплекс ресурсо- та енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв / *А. А. Азарян, Ю. Г. Вілкул, Ю. П. Капленко* [та ін.]. – Кривий Ріг : Мінерал, 2006. –219 с. **4.** О варианте энергоэффективной структуры управления тяговым электромеханическим комплексом двухосных электровозов / *О. Н. Синчук, И. О. Синчук, А. Ю. Давыдов* [и др.] // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2010. – №3/(11). – С. 27-29. **5.** *Коржев А. А.* Повышение тяговых свойств рудничных электровозов за счет применения комбинированного привода: автореф. дис. к.т.н. – Санкт-Петербург, 2004. – 21 с. **6.** *Шокарев Д. А.* Асинхронный тяговый электротехнический комплекс двухсистемного рудничного электровоза / *Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчуг, 2011. – №4/(16) – С. 45-48. **7.** *Волотковский С. А.* Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления / *С. А. Волотковский, Ю. С. Ремха, В. Х. Пироженко* [и др.] // Горный журнал. – 1976. – №7. – С. 51 - 53. **8.** К вопросу стратегии создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза для рудных шахт / *О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук* [и др.] // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 95(1). – С. 139-143. **9.** *Оат Г. П.* Исследование нагрузок тяговых двигателей электровозов горных шахт: автореф. дис. к.т.н. – Ленинград, 1962. – 18 с. **10.** *Ренгевич А. А.* Показатели рейсовой работы рудничных контактных электровозов / *А. А. Ренгевич* // Вопросы рудничного транспорта – 1961. – Вып. 5. – С. 118-124.

Bibliography (transliterated): **1.** Debelyj, V. L., Debelyj, L. L., S. A.Melnikov "Osnovnye napravleniya razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta." *Ugol Ukrainy.* No. 6. 2006. 30-31. Print. **2.** Babets E. K., Shtanko L. A., Salganik V. A. [i dr.]. *"Analiz mirovoy konyunktury rynka ZhRS 2004-2011 gg. "*. Krivoy Rog : Vidavnichiy dim, 2011. – 329. Print. **3**. Azaryan A. A., Vilkul Y. G., Kaplenko Y. P. [ta in.]. *"Kompleks resurso- ta energozberigayuchih geotehnologiy vidobutku ta pererobki mineralnoyi sirovini, tehnichnih zasobiv yih monitoringu iz sistemoyu upravlinnya i optimizatsiyi girnichorudnih virobnitstv*". Kriviy Rig : Mineral, 2006. –219. Print. **4**. Sinchuk O. N., Sinchuk I. O., Davydov A. Y. [i dr.]. "O variante energoeffektivnoy struktury upravleniya tyagovym elektromehanicheskim kompleksom dvuhosnyh elektrovozov". *Kremenchuk,* No №3/(11). 2010. 27-29 Print. **5**. Korzhev A. A. "*Povyshenie tyagovyh svoystv rudnichnyh elektrovozov za schet primeneniya kombinirovannogo privoda*". Sankt-Peterburg, 2004. – 21. Print. **6**. Shokarev D. A., Skapa E. I. "Asinhronnyy tyagovyy elektrotehnicheskiy kompleks dvuhsistemnogo rudnichnogo elektrovoza". *Kremenchug*, No. №4/(16). 2011. 45-48. Print. **7**. Volotkovskiy S. A. Remha Yu. S., Pirozhenko V. H. [i dr.]. "Opyt ekspluatatsii rudnichnyh kontaktnyh elektrovozov s impulsnoy sistemoy upravleniya". No. 7. 1976. 51 - 53. Print. **8**. Sinchuk O. N., Guzov E. S., Sinchuk I. O. [i dr.]. "K voprosu strategii sozdaniya energoeffektivnogo i bezopasnogo v ekspluatatsii dvuhosnogo elektrovoza dlya rudnyh shaht". No. 95(1). 2012. 139-143. Print. **9**. Oat G. P. "*Issledovanie nagruzok tyagovyh dvigateley elektrovozov gornyh shaht*". Leningrad, 1962. 18. Print. **10**. Rengevich A. A. "Pokazateli reysovoy raboty rudnichnyh kontaktnyh elektrovozov". No. 5. 1961. 118-124.Print.

Поступила (received) 24.08.2015

УДК 621.316

И. И. ПЕРЕСУНЬКО, асп., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»;
А. О. АНТОНЕНКО, асп., ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА РАБОТУ АСИНХРОНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.

Введение. Обеспечение надёжности уровня электроснабжения реализуется, в том числе, за счёт подержания показателей качества электроэнергии питающей сети на уровне значений, указанных в нормативных документах (ГОСТ). Для реализаций выше поставленной задачи необходимо обратить внимание на работу наиболее распространённых типов электрических двигателей в условиях конкретного железорудного комбината с учётом изменения значения показателей качества электроэнергии. В данном случай наиболее массовыми является асинхронные электродвигатели.

Постановка задачи. Решение проблем электроснабжения горных предприятий является, обеспечения оптимальной надежности в схемах, обеспечение электроприемников (ЭП) необходимым качеством питающего напряжения во всех режимах работы старого и нового горнотранспортного оборудования и, кроме того, используемая система электроснабжения должна быть экономически наиболее выгодна.

Материалы исследования. Использование электрической энергии определяется не только показателями качества электроэнергии питающей сети, но и заданным потреблением электроэнергии электротехническим оборудованием объектов нагрузки, а также их влиянием на качество электроэнергии.

Изменение потребления электроэнергии объектов нагрузки происходит беспрерывно – включается и выключается технологическое оборудование, варьируется его потребляемая мощность – это обуславливает необходимость контроля над распределением электрической энергии и формированием нагрузки [1].

Проведённый анализ основных типов электрических приводов применяемых на железорудных комбинатах Украины показывает, что асинхронные двигатели занимают долю более трети всех эксплуатируемых двигателей, что показано на графике (рис.1).

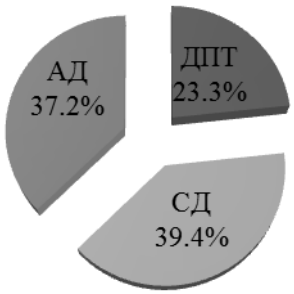


Рис.1 Диаграмма соотношений установленных мощностей по видам электрических двигателей. (ПАО « Криворожский железорудный комбинат » , 2014 год)

Актуальности вопроса влияния показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на асинхронный электропривод подтверждается значительной распространённостью последнего.

Снижение качества электроэнергии приводит к отрицательным последствиям электрического и технического характера.

Среди них следует отметить:

- Увеличение потерь активной и реактивной мощности;
- Сокрощение срока службы электрооборудывания;
- Нарушение условий нормального функционирования электроприемников и потребителей в целом;
- Нанесение вреда окружающей среде и здоровью человека.

Для предотвращения таких последствий или их ограничния необходимо контролировать и управлять качеством электроэнергиих [2].

Одним из основных, фиксируемым показателем КЭ является отклонение напряжения питающей сети от номинального значения, нормирование которого регламентируется ГОСТ 32144 – 2013[3].

Медленные изменения напряжения электропитания (как правило, продолжительностью более 1 мин) обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального согласованного значения, %:

© И.И. Пересунько, А.О. Антоненко, 2015

$$\delta U_{(-)} = \left[\left(U_0 - U_{m(-)}\right)/U_0\right]\cdot 100; \quad (1)$$

$$\delta U_{(+)} = \left[\left(U_{m(+)} - U_0\right)/U_0\right]\cdot 100. \quad (2)$$

где $U_{m(+)}$, $U_{m(-)}$ - значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12;

U_0 - напряжение, равное стандартному номинальному напряжению *Unom* или согласованному напряжению U_c.

В электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания *U*nom равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (между фазными проводниками для трех и четырехпроводных трех фазных систем).

В электрических сетях среднего и высокого напряжений вместо значения номинального напряжения электропитания принимают согласованное напряжение электропитания U_c - согласованное напряжение электропитания, В, кВ.

Для указанных выше показателей КЭ установлены следующие нормы: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Допустимые значения положительного и отрицательного отклонений напряжения в точках общего присоединения должны быть установлены сетевой организацией с учетом необходимости выполнения норм настоящего стандарта в точках передачи электрической энергии. [3]

В электрической сети потребителя должны быть обеспечены условия, при которых отклонения напряжения питания на зажимах электроприемников не превышают установленных для них допустимых значений при выполнении требований настоящего стандарта к КЭ в точке передачи электрической энергии.

Для определения отрицательного и положительного напряжения, % U_{din} измеряют среднеквадратические значения напряжения $U_{rms\text{-}200ms}$ на остальных интервалах времени (10/12 периодов).

Значение отрицательного отклонения напряжения $U_{rms\ under\_i}$ и положительного отклонения напряжения $U_{rms\ over\_i}$ в i – м основном интервале времени определяют с использованием выражений (3),(4),(5),(6). [4]

Для определения значения отрицательного отклонения напряжения в *i* – м основном интервале времени $U_{rms\ under\_i}$ применяют следующее правило:

$$\text{если } U_{rms\,200,i} > U_{din}, \text{ то } U_{rms\_under,i} = U_{din}, \quad (3)$$

$$\text{если } U_{rms\,200,i} \le U_{din}, \text{ то } U_{rms\_under,i} = U_{rms\,200,i}. \quad (4)$$

где $U_{rms\,200,i}$ - результат измерения напряжения в *i* – м основном интервале времени.

Для определения значения положительного отклонения напряжения в *i* – м основном интервале времени $U_{rms\ over\_i}$ применяют следующее правило:

$$\text{если } U_{rms\,200,i} < U_{din}, \text{ то } U_{rms\_over,i} = U_{din}, \quad (5)$$

$$\text{если } U_{rms\,200,i} \ge U_{din}, \text{ то } U_{rms\_under,i} = U_{rms\,200,i}. \quad (6)$$

Значения отрицательного отклонения напряжения на объединенном интервале времени U_{under}, % U_{din}, определяют по формуле:

$$U_{under} = \frac{U_{din} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} U^2_{rms\_under,i}}{n}}}{U_{din}}, \quad (7)$$

где n – число основных интервалов времени в объединенном интервале.

Значения отрицательного отклонения напряжения на объединенном интервале времени U_{over}, % U_{din}, определяют по формуле:

$$U_{over} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} U^2_{rms\_over,i}}{n}} - U_{din}}{U_{din}}. \quad (8)$$

Каждый приемник электроэнергии имеет наилучшее технико – экономические показатели при определенном оптимальном напряжении на его зажимах. Отклонение напряжения от оптимального приводит к изменению технико – экономических показателей приемников электрической энергии. При изменении напряжения меняются также показатели самой сети, в основном за счет изменения потерь мощности и энергии. Таким образом, отклонения напряжения в отдельных точках сети оказывают влияние на всю систему электроснабжения предприятия.

В настоящее время наиболее распространенными приемниками электрической энергии в подземных выработках шахт горнорудной промышленности являются асинхронные двигатели, которые используются для привода самых разнообразных механизмов. В табл. 1 приведены данные по влиянию отклонений напряжения в пределах от – 10 % до + 10% на характеристики асинхронных электродвигателей.

Таблица 1 - Влияние отклонения напряжения в пределах от – 10 % до + 10% на характеристики асинхронных электродвигателей.

Характеристики двигателей	Изменение характеристики при изменении напряжения	
	– 10 %	+10 %
Пусковой и максимальный вращающий момент	– 19%	+ 21 %
Синхронная частота вращения		
Скольжение, %	+ 23 %	– 17 %
Частота вращения при номинальной нагрузке	– 1,5 %	+ 1 %
Коэффициент полезного действия:		
При номинальной нагрузке	– 2 %	+ 1 %
При нагрузке 75 %		
При нагрузке 50 %	– 1 % / – 2 %	+ 1% / + 2 %
Коэффициент мощности при нагрузке :		
100 %	+ 1 %	– 3 %
75 %	+ 2 % / + 3 %	– 4 %
50 %	+ 4 % / + 5 %	– 5 % / – 6 %
Ток ротора при номинальной нагрузке	+ 14 %	– 11 %
Ток статора при номинальной нагрузке	+ 10 %	– 7 %
Пусковой ток	+ 10 % / + 12%	– 10 % / – 12 %
Прирост температуры обмотки при номинальной нагрузке	+ 5 % / + 6 %	Практически без изменения

Рассмотрим влияние отклонений напряжения на работу асинхроного двигателя. Электромагнитный момент, создаваемый вращающимся полем статора АД, описывается функцией $M_э = f(U)$ (рис.2). На этом рисунке приведена зависимость вращающего момента рабочего механизма $M_{мех}$ от его скорости вращения. Точка 1 соответствует работе двигателя при номинальной нагрузке, при этом скольжение равно $s_1 = s_{ном}$. При понижении напряжения, определяемого положением характеристики в точке 1, до напряжения, определяемого положением характеристик в точке 3 ($U_{ном} > U_2 > U_3$), скольжение увеличивается $s_{ном} < s_2 < s_3$, а электромагнитный момент снижается $M_{ном} > M_2 > M_3$, т.е. производительность механизма, приводимого во вращение электродвигателем, снижается. Запуск двигателя при пониженном напряжении, когда s → 1, невозможен, так как $M_{эл} < M_{мех}$.

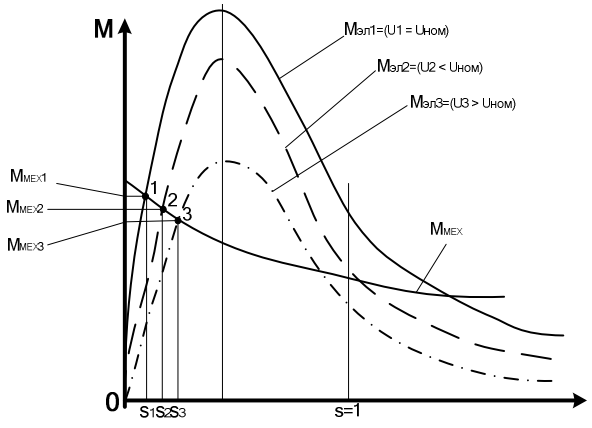


Рис. 2 Влияние изменений напряжения на электромеханические характеристики асинхронного двигателя

Известно, что при снижении напряжения на зажимах двигателя на 15% номинального его электромагнитный момент снижается до 72% номинального.

При уменьшении напряжения снижается амплитуда характеристик $M_{эл} = f(U)$, увеличивается его скольжение s и снижается скорость вращения. При остановке АД, например при глубоком провале напряжения, s = 0,9 ÷1, исключается возможность само запуска, что может быть очень необходимо для некоторых технологических процессов. Асинхронный двигатель не запускается в тех случаях, когда $M_{эл} < M_{мех}$. Уменьшение

коэффициента запаса устойчивости АД $K = M_{эл\ max} / M_{эл\ ном}$ может привести к его опрокидыванию при $K < 1$. При увеличении скольжения возрастает ток, что приводит к дополнительному нагреву АД. При длительном режиме работы при $U = 0{,}9U_{ном}$ срок службы АД сокращается вдвое.

При изменении напряжения сети по сравнению с номинальным активная мощность на валу асинхронного двигателя остается практически постоянной, однако изменяются потери активной мощности в нем, что может вызвать перерасход или получить экономию электрической энергии. Реактивная мощность при этом существенно меняется. Для приближенных расчетов можно принять, что для двигателей единой серии А мощность от 20-100 кВт повышение напряжения на 1% приводит к росту реактивной мощности на 3%, а для двигателей меньшей мощности на 5-7%.

Значительный ущерб промышленным предприятиям наносит сокращение срока службы асинхронных двигателей, работающих с большой загрузкой и пониженным напряжением. Расчеты показывают, что наивыгоднейшим с точки зрения увеличения срока службы двигателей является номинальное напряжение или напряжение выше номинального.

Частота вращения асинхронных двигателей меняется в зависимости от подведенного напряжения.

Вывод. Отклонение напряжения существенно влияет на работу асинхроного привода.

Необходимость проведения мероприятий по улучшению качества напряжения в электрических сетях. При отклонениях напряжения у приемников электроэнергии выше нормы целесообразно не устанавливать средства регулирования напряжения, которые увеличивают капитальные затраты на сеть и потери электроэнергии, а радикально перестроить систему электроснабжения, осуществить переход на более высокий уровень напряжения распределительных сетей. Повышение напряжения, как правило, улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения предприятия, одновременно улучшается и качество электроэнергии у потребителей.

Список литературы: 1. Жежеленко И.В. Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. / И.В. Жежеленко, Саенко Ю.Л. – М.: Энергоатомиздат, 2000 – 252 с. 2. Карташев И.И. Управление качеством электроэнергий / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с. 3. ГОСТ 32144 – 2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ) – М. Стандартинформ 2014. – 20 с. 4. ГОСТ 30804.4.30 – 2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М. Стандартинформ 2014. – 57 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zhezhelenko I. V. Saenko, Y. L. The power quality and control in industrial enterprises. / V. I. Zhezhelenko, Saenko, Y. L. – M.: Energoatomizdat, 2000 – 252 p. 2. Kartashev I. I. Quality management of electricity / I. I. Kartashev, V. N. Tula, R. G. Simonov and others – M.: MPEI Publishing house, 2006. – 320 p. 3. GOST 32144 – 2013 Norms of quality of electric power supply systems of seneral purpose (to EN 50160:2010, NEQ). Standartinform 2014. – 20 p. 4. GOST 30804.4.30 – 2013 (IEC 61000-4-30:2008) Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Methods of measurement of indicators of quality of electric energy. – M. Standartenfuhrer 2014. – 57 p.

Поступила (received) 24.08.2015

УДК 621.314.5:537.523:661.666.4

Д. В. ВІННИЧЕНКО, м.н.с.; Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України;
Н. С. НАЗАРОВА, канд.техн.наук, доцент, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Вступ. Спосіб електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) із вуглецевовмісних газів, який розвинуто в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України [1], має високі показники продуктивності і якості отриманих ВНМ [2], що можливо за стабілізацією і керуванням електричних характеристик процесу синтезу. Оптимальними режимними параметрами за якими досягаються екстремуми критеріїв ефективності цільових технологічних параметрів є довжина міжелектродного проміжку і вихідний середньоквадратичний струм електротехнічної системи [3]. В промисловості широко використовуються системи незмінного синусоїдального струму [4], але задача керування величиною вихідного струму інвертору із послідовним резонансним контуром вперше постала для розроблюваної системи для запезпечення екстремуму критерію ефективності технологічного процесу. Тому розвиток принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу нановуглецю є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка принципу керування вихідним середньоквадратичним струмом інвертору напруги з послідовним резонансним контуром для забезпечення оптимальних режимних параметрів електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів.

Материали дослідження.

Дослідження процесу електророзрядного синтезу дозволило сформулювати ключові вимоги для створення ефективної системи живлення [5]. Вони полягають в тому, що система повинна забезпечувати стабілізацію величини розрядного струму при багатократній зміні електричного опору технологічного навантаження та напруги розрядних імпульсів. В [5] обґрунтована можливість використання інвертора напруги з резонансним послідовним контуром в якості джерела живлення електророзрядної системи зі стабілізацією струму у навантаженні. Показано, що така електротехнічна система дозволяє реалізовувати нестабільність струму не більше 1 % при багатократному зміненні вихідної напруги.

Обгрунтовано, що створення нерівноважної плазми, необхідної для синтезу нановуглецю, доцільно забезпечувати створенням умов для тліючого газового розряду за рахунок високої частоти імпульсів в діапазоні від 1 до 100 кГц.

Наступним етапом досліджень постала задача запезпечення екстремуму критерію ефективності технологічного процесу, яка може бути розв'язана за допомогою керування величиною вихідного струму електротехнічної системи, тобто інвертору із послідовним резонансним контуром.

В роботі запропоновано використовувати принцип частотозалежності реактивного опору індуктивних елементів, або керування зміною частотозалежних параметрів срумоформуючої схеми на базі резонансного контуру. Перевага такого підходу полягає в задійснюванні принципу параметричної стабілізації струму, що є найбільш простим і надійним в технологіях побудови силових пристроїв.

Для аналізу схеми інвертора напруги з послідовним резонансним контуром (рис.1), математичну модель якої наведено в [5] введемо такі позначення. Відношення реактивних опорів за частотами відмінними від резонансної:

$$q^* = \frac{\omega_1}{\omega_0}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \omega_0^2 = \frac{\omega_1^2}{q^{*2}}; \frac{\omega_1^2}{q^{*2}} = \frac{1}{LC}; \omega_1 L = q^{*2}\frac{1}{\omega_1 C}; X_C = \frac{X_L}{q^{*2}}, \quad (1)$$

де q^* - приведена до резонансної безрозмірна частота комутації силових вентилів інвертора.

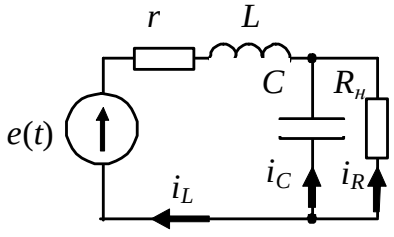


Рис. 1

Для аналізу використуємо рівняння для струму на частоті резонансу [5] (X_C=X_L, синусоїдальна вхідна напруга):

$$i_R = e(t)\frac{jX_L}{X_L^2 + jR(X_L - X_C)} = \frac{e(t)\cdot j}{X_L} \quad (2)$$

Звідки отримуємо:

© Д.В. Вінниченко, Н.С. Назарова, 2015

$$i_R = \frac{\Delta_{i_R}}{\Delta} = \frac{e(t)\cdot jX_C}{X_C X_L + jR(X_L - X_C)}, \tag{3}$$

Для гармонійного випадку:

$$i_R = \frac{U_m \cos(q\omega_0 t)}{q\omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \tag{4}$$

$$u_R = \frac{U_m \cos(q^*\omega_0 t)R}{q^*\omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \tag{5}$$

Амплітуда напруг на навантаженні:

$$U_{Rm} = \frac{U_m R}{q^*\omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \tag{6}$$

Передатна функція контуру

$$W(q) = \frac{U_{Rm}}{U_m} = \frac{R}{q^*\omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \tag{7}$$

Із [5] для негармонійного випадку

$$i_R = \frac{4\cdot U_m}{\pi}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(n\omega t)}{n\sqrt{(n\omega L)^2+(k\omega L)^2(n^2-1)^2}} = = \frac{4\cdot U_m}{\pi\omega L}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(n\omega t)}{n\sqrt{n^2+k^2(n^2-1)^2}}, n = 1,3,5,\ldots. \tag{8}$$

отримуємо на виході резонансного контуру

$$I_{RES\_OUT} = i_R = \frac{4\cdot U_m}{\pi q^*\omega_0 L}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(nq\omega\ t)}{n\sqrt{n^2+k^2(q^{*2}n^2-1)^2}}, n = 1,3,5,\ldots. \tag{9}$$

$$U_R = \frac{4\cdot U_m R}{\pi q^*\omega_0 L}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(nq\omega\ t)}{n\sqrt{n^2+k^2(q^{*2}n^2-1)^2}}, n = 1,3,5,\ldots. \tag{10}$$

$$U_{Rm} = \frac{4\cdot U_m R}{\pi q^*\omega_0 L}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n\sqrt{n^2+k^2(q^{*2}n^2-1)^2}}, n = 1,3,5,\ldots. \tag{11}$$

$$\frac{U_{Rm}}{U_m} = \frac{4R}{\pi q^*\omega_0 L}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n\sqrt{n^2+k^2(q^{*2}n^2-1)^2}}, n = 1,3,5,\ldots. \tag{12}$$

Використання (9) дозволяє задавати вихідний струм, змінюючі частоту комутації силових вентилів інвертора за законом

$$q^* = \frac{4\cdot U_m}{\pi\omega_0 L I_{RES\_OUT\_OPT}}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(nq\omega\ t)}{n\sqrt{n^2+k^2(q^{*2}n^2-1)^2}}, n = 1,3,5,\ldots. \tag{13}$$

Закон регулювання вихідного середньоквадратичного струму (9) може бути представлено в безрозмірному виді, приведеному до базової величини

$$I^*_{RES\_OUT} = \frac{i_R}{I^*_{RES\_OUT\_\max}} \tag{14}$$

Математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти

Керування вихідним струмом за допомогою частоти комутації силових ключів (9) призводить до відходу від резонансного режиму, при якому може порушитися стабілізація сердньоквадратичного вихідного струму. Тому проведено математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти.

Вихідними даними моделювання є емпіричні залежності. Середньовадратичний розрядний струм, за яким здійснюється продуктивний синтез нановуглецю $I^*_{RES\_OUT} = I^*_{CH\_RMS\_OPT}$, повинен підтримуватися відповідно до системи базових величин, в діапазоні від 0,87 до 1,0, напруга U^*_{CH} - в діапазоні від 0,8 до 1,0. Еквівалентний опір навантаження R^* при цьому складає від 0,92 до 1.

Проведемо розрахунок діапазону струмообмеження, необхідного для отримання середньовадратичного розрядного струму, за яким здійснюється продуктивний синтез нановуглецю.

Напруга на вході резонансного контуру, приведена до вторинної обмотки трансформатора, відповідно до системи базових величин, дорівнює $U'^*_{in} = k_T U^*_{in} = k_T$, де k_T - коефіцієнт трансформації. Необхідне струмообмеження визначається за формулою $\omega L'^* = \frac{U'^*_{in}}{I^*_{CH\_RMS\_OPT}}$ і дорівнює від $\omega L'^* = k_T$ до

$$\omega L'^* = \frac{k_T}{I^*_{CH\_RMS\_OPT}} = \frac{k_T}{0{,}87}.$$

Коефіцієнт навантаження, приведений до вторинної обмотки трансформатора, який використовується в математичній моделі резонансного контуру і визначається як $k=R/\omega L'$, буде знаходитися в діапазоні від $1/k_T$ до $0{,}8/k_T$.

Використання підвищуючого трансформатора з коефіцієнтом трансформації вище 50 зумовлює діапазон k від 0,16 до 0,2.

Задаємо значення відносної частоти комутації силових ключів $q^*=f/f_{\text{рез}}$ і засобами MathCad проводимо розрахунок відхилення вихідного струму для різних q^* від його розрахункового значення, що відповідає $q^*=1$ в умовах зміни навнаження (коефіцієнта навантаження).

По-перше, розрахунок проведемо за формулою для першої гармоніки (4), який дає високу точність в умовах резонансного режиму і характеризується спрощеним записом.

Результати розрахунку наведено на рис. 2, де показано залежність коефіцієнту стабілізації вихідного середньоквадратичного струму для першої гармоніки від навантаження k. Для зручності аналізу значення струмів приведені до їх значення в точці k=0. Аналіз результатів показав, що для найбільшого навантаження k=0,2, відхилення струму від його розрахункового значення, виконаного за формулою для першої гармоніки (4) відрізняється від очікуваного значення, зумовленого стабілізацією середньоквадратичного струму, менше ніж на 0,3%.

В таблиці 1 наведено прийняті позначення, які використовуються на рисунках, де наведено результати моделювання.

По-друге, розрахунок проведемо за формулою для суми десяти гармонік (9), який дає високу точність в будь-яких умовах. Результати розрахунку наведено на рис. 3, де показано залежність коефіцієнту стабілізації вихідного середньоквадратичного струму для десяти гармонік від навантаження k. Позначення, які використовуються на рисунках, де наведено результати моделювання, наведено в таблиці 1. Для зручності аналізу значення струму приведені до їх значення в точці k=0. Аналіз результатів показав, що для найбільшого навантаження k=0,2 відхилення струму від його розрахункового значення, виконаного за формулою (9) для суми десяти гармонік відрізняється від очікуваного значення, зумовленого стабілізацією середньоквадратичного струму менше ніж на 1%.

Таблиця 1.

Позначення	Q							
	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,5	2
Середньоквадратичний струм першої гармоніки Irrqrms(k) для навантаження *k*	Irrqrms0(k)	Irrqrms1(k)	Irrqrms2(k)	Irrqrms3(k)	Irrqrms4(k)	Irrqrms5(k)	Irrqrms6(k)	Irrqrms7(k)
Відношення Irrqrms(k)/ Irrqrms(0)	kst0(k)	kst1(k)	kst2(k)	kst3(k)	kst4(k)	kst5(k)	kst6(k)	kst7(k)
Середньоквадратичний струм перших десяти гармонік Irkk(k) для навантаження *k*	Irkk0(k)	Irkk1(k)	Irkk2(k)	Irkk3(k)	Irkk4(k)	Irkk5(k)	Irkk6(k)	Irkk7(k)
Відношення Irkk(k)/ Irkk(0)	kstk0(k)	kstk1(k)	kstk2(k)	kstk3(k)	kstk4(k)	kstk5(k)	kstk6(k)	kstk7(k)
Середньоквадратичний струм в колі RL Irrls(k) для навантаження *k*	Irrls0(k)	Irrls1(k)	Irrls2(k)	Irrls3(k)	Irrls4(k)	Irrls5(k)	Irrls6(k)	Irrls7(k)
Відношення Irrls(k)/ Irrls (0)	krrls0(k)	krrls1(k)	krrls2(k)	krrls3(k)	krrls4(k)	krrls5(k)	krrls6(k)	krrls7(k)

Фрагмент лістингу

$$Irrqrms0(k) := \sqrt{\frac{q\cdot\omega 0}{2\cdot\pi}\cdot\int_0^{\frac{2\cdot\pi}{q\cdot\omega 0}}\left[\frac{Um}{q\cdot\omega 0\cdot Lg}\cdot\frac{\cos(q\cdot\omega 0\cdot t)}{\sqrt{1+k^2\cdot\left(q^2-1\right)^2}}\right]^2 dt} \qquad kst0(k) := \frac{Irrqrms0(k)}{Irrqrms0(0)}$$

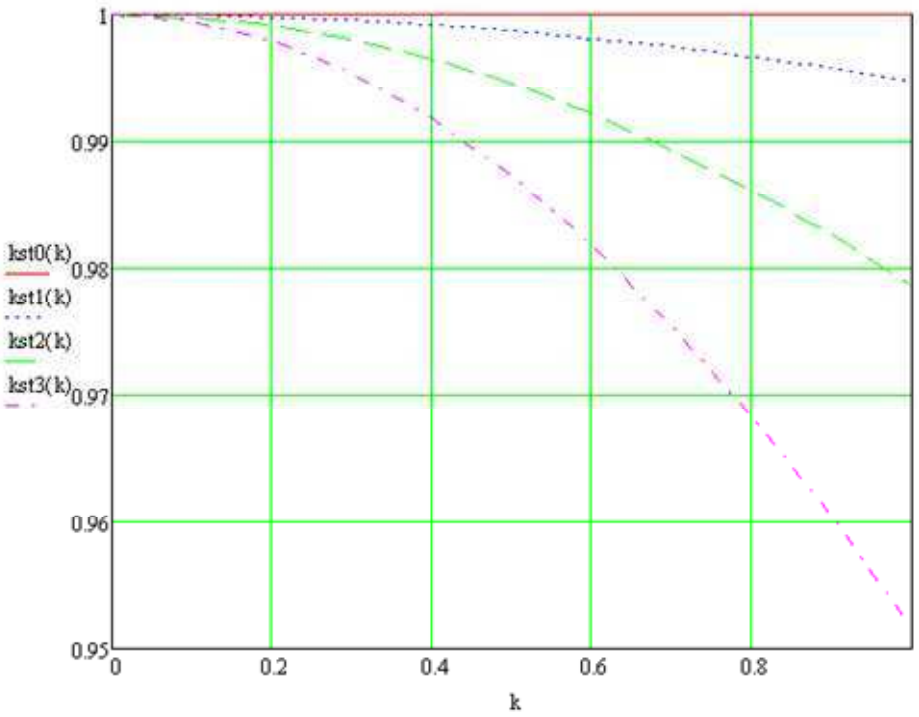


Рис. 2

Фрагмент лістингу

$$q:=1 \qquad k:=0,0.1..\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \qquad Tp:=\frac{2\cdot\pi}{q\cdot\omega 0}=6.283\times 10^{-4}$$

$$Irkk0(k):=\sqrt{\frac{1}{Tp}\cdot\int_0^{Tp}\left[\frac{2\cdot Um\cdot Tp\cdot q}{\pi^2\cdot Lg}\cdot\sum_{n=1}^{10}\frac{\cos[(2\cdot n-1)\cdot q\cdot\omega 0\cdot t]}{(2\cdot n-1)\cdot\sqrt{(2\cdot n-1)^2+k^2\cdot\left[q^2(2\cdot n-1)^2-1\right]^2}}\right]^2 dt} \qquad kstk0(k):=\frac{Irkk0(k)}{Irkk0(0)}$$

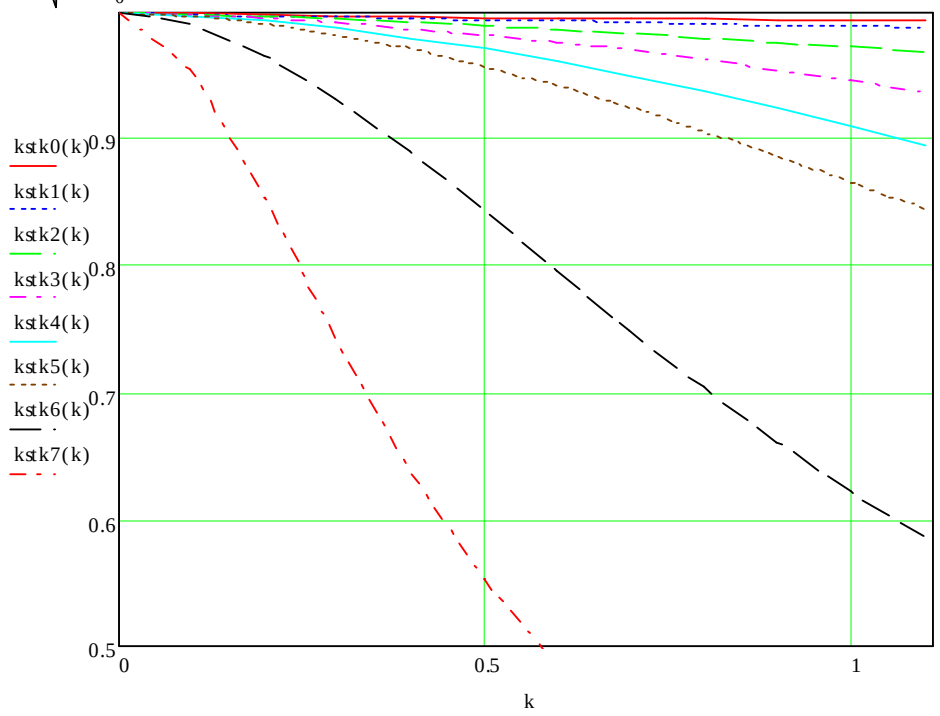


Рис. 3

Тобто розрахунок вихідного струму можна виконувати для частоти першої гармоніки при відхиленні частоти комутації силових ключів інвертора до 15% в кожну сторону. За перевищенням частотою межі в 15% доцільно змінити вільну частоту коливань резонансного контуру, наприклад перемиканням дроселів.

Для порівняння з отриманими результатами проведено розрахунок струму при індуктивному струмообмеженні, тобто при використанні *RL*-кола.

На рис.4. показано залежності коефіцієнта стабілізації вихідного середньоквадратичного струму для резонансного контуру kstk2(k) і *RL*-кола krrls2(k). Позначення, які використовуються на рисунках, де наведено результати моделювання, наведено в таблиці 1. Порівняння результатів показує, що за використанням резонансного контуру, стабілізація вихідного струму значно краща і відрізняється від очікуваного значення, зумовленого стабілізацією середньоквадратичного струму, менше ніж на 1%.

Проведене комп'ютерне моделювання чисельними методами вихідного струму в околі резонансної частоти показало високу точність (до 1%) і коректність розроблених принципів і способів регулювання режимних параметрів електротехнічної системи.

В пакеті прикладних програм LTSpice також проведено комп'ютерне моделювання імітаційної моделі високовольтної системи живлення, яке показало високий ступінь стабілізації вихідного середньоквадратичного струму (відхилення до 1%) за багатократною зміною навантаження.

Таким чином, вперше розроблено принципи і способи регулювання режимних параметрів електротехнічної системи для ефективного синтезу нановуглецю. Вперше отримано закон регулювання вихідного середньоквадратичного струму за допомогою зміни частоти розрядних імпульсів $I^*_{RES\_OUT}=F(q^*)$, де q^* - приведена частота комутації силових вентилів інвертора, що дозволить здійснювати плавне регулювання вихідного струму для забезпечення його оптимального значення відповідно до стану процесу синтезу.

Фрагмент лістингу

$$Irrls0(k) := \sqrt{\frac{1}{Tp}\cdot\int_0^{Tp}\left[\frac{2\cdot Um\cdot Tp\cdot q}{\pi^2\cdot Lg}\cdot\sum_{n=1}^{10}\frac{\sin[(2\cdot n-1)\cdot q\cdot\omega 0\cdot t]}{(2\cdot n-1)\cdot\sqrt{k^2+\left[q^2\cdot(2\cdot n-1)^2\right]}}\right]^2 dt}$$

$$krrls0(k) := \frac{Irrls0(k)}{Irrls0(0)}$$

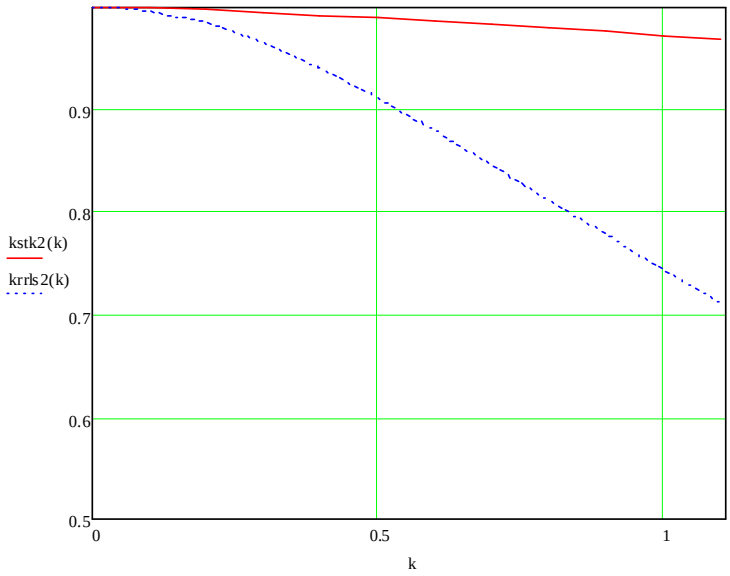


Рис. 4

Висновки. Розроблено принцип керування вихідним середньоквадратичним струмом інвертора напруги з послідовним резонансним контуром для забезпечення оптимальних режимних параметрів, який базується на керуванні частотозалежними параметрами струмоформуючої схеми на базі резонансного контуру. Перевага такого підходу полягає в здійснюванні принципу параметричної стабілізації струму, що є найбільш простим і надійним. Математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти за допомогою зміни частоти комутації ключів інвертору показало високий коефіцієнт стабілізації середньоквадратичного струму на виході електротехнічної системи для навантаження, характерного для синтезу вуглецевих наноматеріалів (відхилення не перевищує 1%).

Список літератури: 1. Пат. 95543 Україна МПК C01B 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів (варіанти)/ *Л.З.Богуславський, Д.В.Вінниченко, Н.С.Назарова* (Україна); заявник і патентовласник ІІПТ НАН України. - № a 2010 01186; заявл. 05.02.2010; Опубл. 10.08.2011 р., Бюл.№ 15. -9 с. **2.** Структурное состояние углеродных наноматериалов, полученных методами электроразрядной обработки углеродсодержащих газов / *А.Д.Рудь, И.М.Кирьян, Л.З.Богуславский* и др. // Нанотехнологии и наноматериалы (Материалы III Международной научно-технической конференции) - М.: Издат. МГОУ, 2012. - С.255-258. **3.** *Вінниченко, Д.В.* Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю / *Д.В. Вінниченко* // Технічна електродинаміка. 2014. №4. - С. 129-131. **4.** *Милях А.Н* Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. / *А.Н. Милях., И.В. Волков* // К.- Наукова Думка. - 1974. -216 с. **5.** *Щерба А.А.* Стабілізація та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для електроімпульсного синтезу нановуглецю / *А.А. Щерба, Д.В. Вінниченко* // Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 21 (1064) - С.141-151.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 95543 Ukrayina MPK C01V 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Sposib oderzhannya vugletsevih nanomaterialiv (varianty)/ L.Z.Boguslavskiy, D.V.VInnichenko, N.S.Nazarova (Ukrayina); zayavnyk i patentovlasnyk IIPT NAN Ukrayiny. - No a 2010 01186; zayavl. 05.02.2010; Opubl. 10.08.2011 r., Byul. No. 15. -9 c. **2.** Strukturnoe sostoyanie uglerodnyih nanomaterialov, poluchennyih metodami elektrorazryadnoy obrabotki uglerodsoderzhaschih gazov / A.D.Rud, I.M.Kiryan, L.Z.Boguslavskiy i dr. // *Nanotehnologii i nanomaterialy (Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii) - M.: Izdat. MGOU*, 2012. - S.255-258. **3.** VInnichenko, D.V. Vyznachennya optymalnyh harakteristyk visokovoltnoyi elektrorozryadnoyi sistemy dlya realizatsii tehnologii elektroimpulsnogo sintezu nanovugletsyu / D.V. VInnichenko // *Tehnichna elektrodynamika.* 2014. No. 4. - S. 129-131. **4.** Milyah A.N Sistemy neizmennogo toka na osnove induktivno-emkostnyh preobrazovateley. / A.N. Milyah., I.V. Volkov // K.- *Naukova Dumka.* - 1974. -216 s. **5.** Scherba A.A. Stabilizatsiya ta regulyuvannya rezhimnih parametriv vysokovoltnoyi elektrorozryadnoyi sistemy dlya elektroimpulsnogo sintezu nanovugletsyu / A.A. Scherba, D.V. VInnichenko // *Visnyk NTU «HPI».* 2014. No. 21 (1064) - S.141-151.

Надійшла (received) 27.08.2015

Элементы автоматизированного электропривода

УДК: 621.313.004

А.А. СЁМИН, асс. ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск

ВЫБОР ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ СНЯТИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АД

Введение. Дискретизация сигнала по времени является крайне распространенной процедурой в системах сбора и обработки информации. В частности она используется при идентификации параметров схемы замещения АД, работающих в составе приводов переменного тока при снятии экспериментальных данных. Важным вопросом при этом является выбор частоты дискретизации.

Постановка задачи. Слишком большая частота дискретизации приводит к повышению требований к оборудованию и, как следствие, к его удорожанию. С другой стороны, недостаточная величина частоты дискретизации влечет за собой снижение точности результатов измерений. Поэтому, актуальным является вопрос выбора ее величины, удовлетворяющей обоим приведенным выше требованиям.

Материалы исследований. Обоснование частоты дискретизации опирается на теорему Котельникова, которая распространяется на любые сигналы с ограниченным спектром. Смысл ее заключается в том, что для восстановления сигнала без потерь информации необходимо, чтобы частота отсчетов была в 2 раза выше частоты *fmax*, которой ограничивается спектр сигнала. Однако, существует ряд факторов благодаря которым на практике частота дискретизации выбирается в несколько раз выше [1]. В частности, это обусловлено невозможностью использования импульсов бесконечно малой длительности; тем фактом, что реальные сигналы имеют неограниченный частотный спектр и т.д.

В виду сложности аналитического представления, подходящим способом для решения поставленной задачи является численное моделирование с помощью специализированных программ, например MathCAD.

Рассмотрим широко распространенные в настоящее время электроприводы, в состав которых входит двухзвенный преобразователь частоты с ШИМ с неуправляемым выпрямителем напряжения в звене постоянного тока.

При высокой частоте ШИМ и активно-индуктивной нагрузке, какой является обмотка статора, ток нагрузки оказывается практически синусоидальным [2]. Поэтому сосредоточим внимание на выборе частоты дискретизации при вычислении амплитуды и фазы гармоники напряжения.

Существует несколько разновидностей ШИМ. Рассмотренный ниже подход может быть применен к любой из них. Широкое применение в промышленности нашла синусоидальная ШИМ, принцип которой подробно изложен в литературе [2,3]. Управляющие сигналы $u_i^*(i=A,B,C)$, представляющие собой синусоиды, сравниваются с пилообразным опорным напряжением (в данном случае используется симметричное пилообразное напряжение). В зависимости от их соотношений, будут замкнуты те или иные ключи инвертора. Кратковременную задержку между размыканием одного ключа и замыканием другого для восстановления запирающих свойств транзистора учитывать не будем.

Изменение амплитуды u_i^* приводит к изменению амплитуды первой гармоники напряжений на выходе инвертора.

Поскольку инвертор при проведении идентификации будет формировать напряжение частотой 5Гц [4], амплитуда управляющего сигнала должна быть пропорционально уменьшена во избежание насыщения магнитной системы машины. Так, положим: $\frac{u_i^*}{U_{ОПМ}}=\frac{5\,Гц}{50\,Гц}$. Согласно [3], первая гармоника ряда Фурье для фазного напряжения при соединении обмоток в звезду равна

$$\frac{mUd}{2}\sin(\omega t+\varphi)\ .$$

Здесь: *m* – отношение амплитуды управляющего напряжения к амплитуде опорного напряжения;
Ud – напряжение, подаваемое на инвертор.

Частоту опорного напряжения примем 1 кГц (в преобразователях частоты обычно имеется возможность изменения этого параметра в ограниченном диапазоне). Для исследования была принята величина отношения амплитуды первой гармоники напряжения, рассчитанное при данной частоте дискретизации к ее теоретическому значению. Амплитуда и фаза первой гармоники напряжения вычисляется с помощью коэффициентов Фурье, которые, с использованием дискретного преобразования Фурье, находятся как:

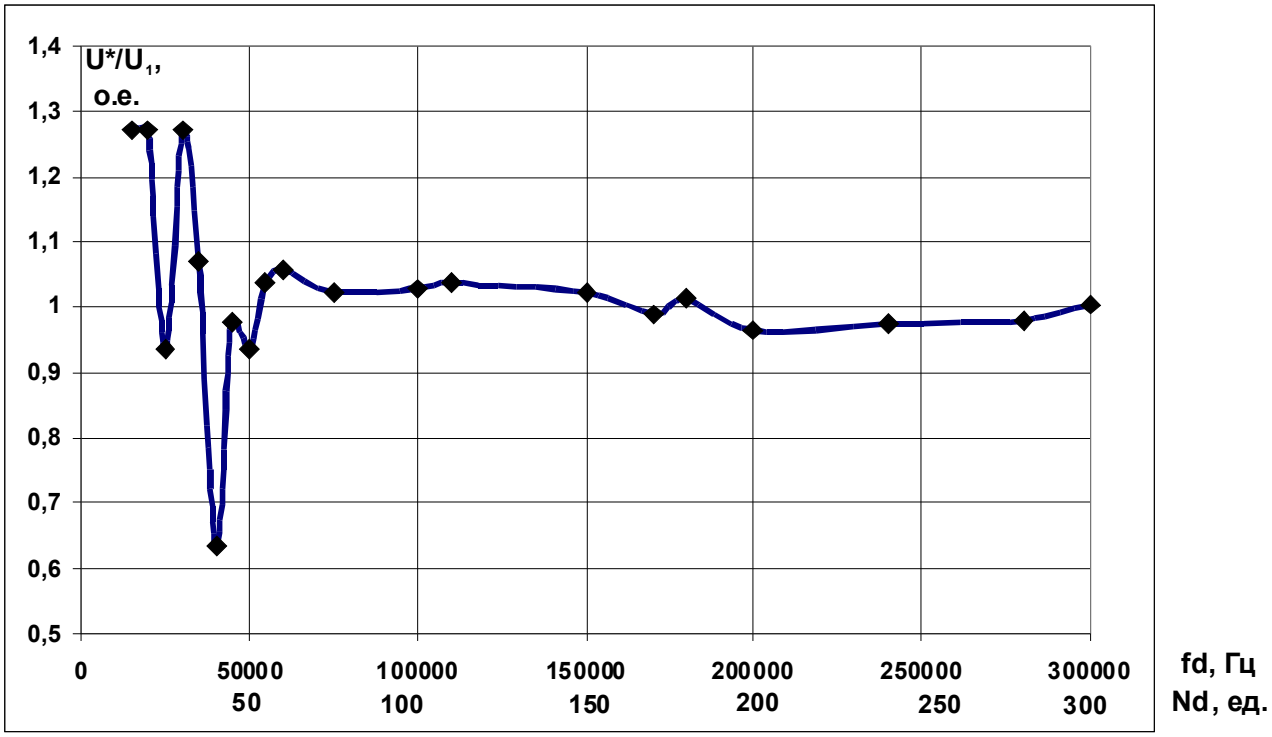


Рисунок 1 – Зависимость отношения амплитуды первой гармоники напряжения, рассчитанное при данной частоте дискретизации к ее теоретическому значению при частоте опорного напряжения 1 кГц

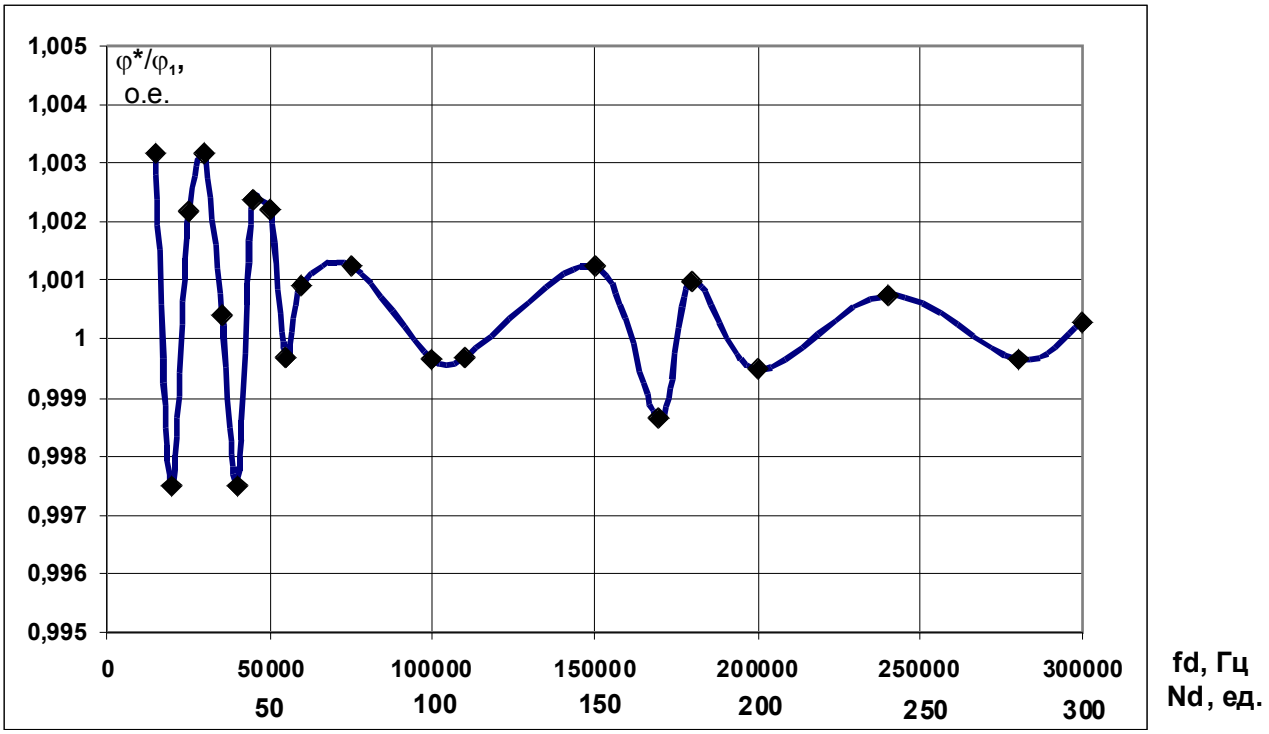


Рисунок 2 – Зависимость отношения фазы первой гармоники напряжения, рассчитанное при данной частоте дискретизации к ее теоретическому значению при частоте опорного напряжения 1 кГц

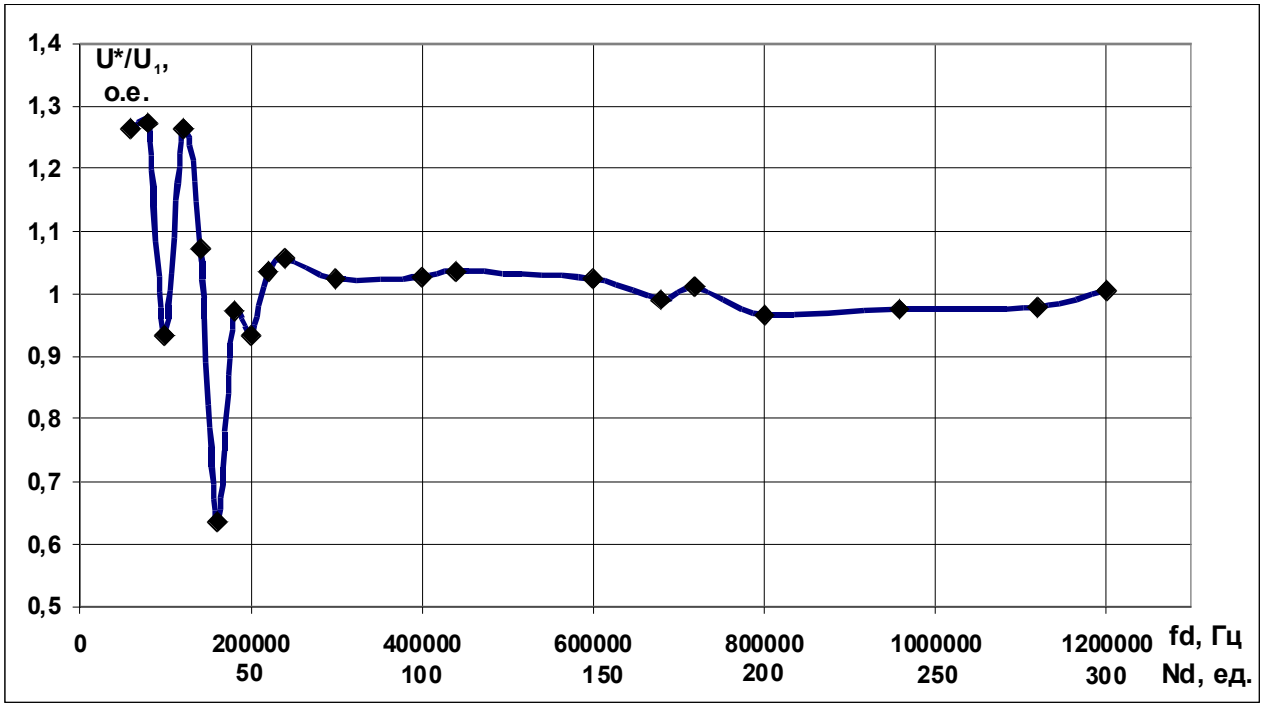


Рисунок 3 – Зависимость отношения амплитуды первой гармоники напряжения, рассчитанное при данной частоте дискретизации к ее теоретическому значению при частоте опорного напряжения 4кГц

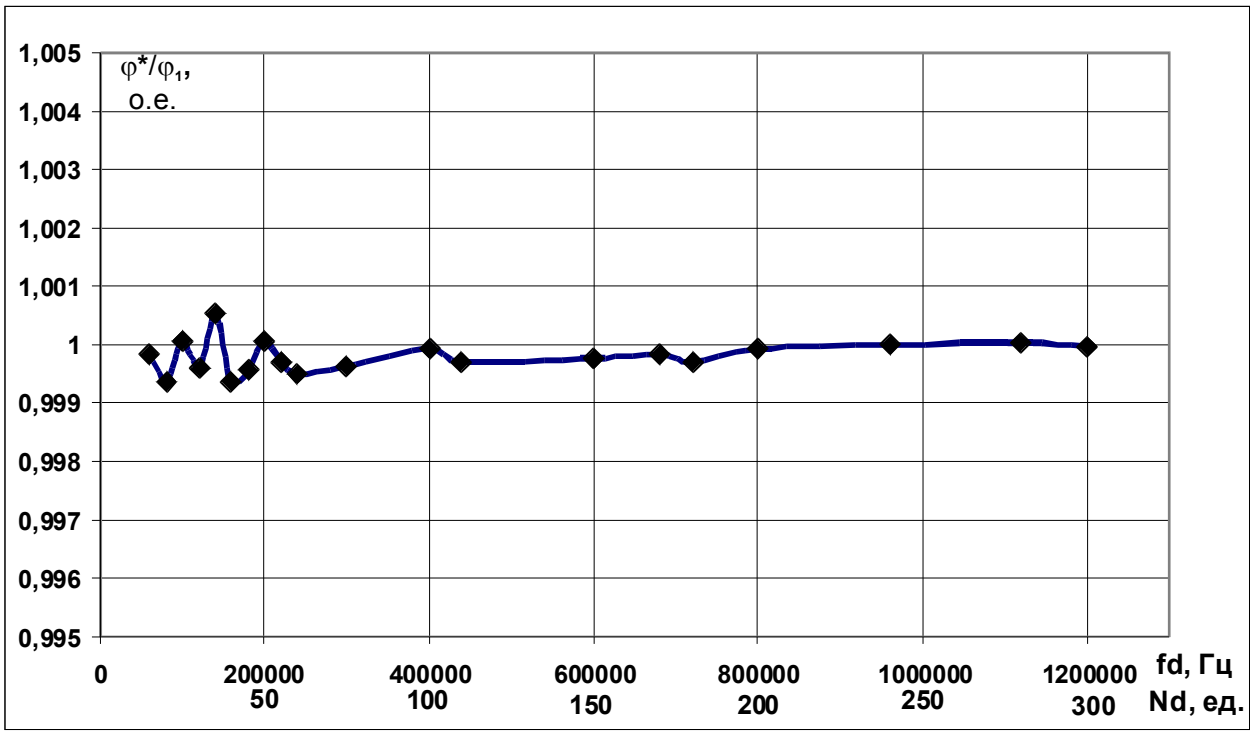


Рисунок 4 – Зависимость отношения фазы первой гармоники напряжения, рассчитанное при данной частоте дискретизации к ее теоретическому значению при частоте опорного напряжения 4 кГц

$$a_k = \frac{2}{N} Re\{X(k)\},$$
$$b_k = -\frac{2}{N} Im\{X(k)\},$$
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{-jn\omega_k}$$

где $\omega_k = \frac{2\pi k}{N}$,

N – количество дискрет в пределах «окна»;

k – номер гармоники.

Результаты расчетов в виде графиков представлены на рисунках 1 и 2.

Здесь *fd* и *Nd* – это частота дискретизации и число дискрет на период опорного напряжения соответственно.

Дополнительно на рис. 3 и 4 представлены результаты для частоты опорного напряжения 4 кГц. Видно, что результаты оказались достаточно близкими к полученным на рис. 1 и рис. 2, если в качестве независимой переменной рассматривать *Nd*.

Выводы.

Из результатов исследований можно сделать следующие выводы:

– шаг дискретизации существенно влияет на точность определения амплитуды и фазы гармоники ШИМ-модулированного сигнала напряжения;

– точность определения фазы первой гармоники выше, чем точность определения амплитуды первой гармоники напряжения;

– результаты для различных частот опорного пилообразного напряжения практически совпадают, если рассматривать в качестве независимой переменной число измерений приходящийся на период опорного напряжения (*Nd*, ед);

– для преобразователя с синусоидальной ШИМ рекомендуемая частота дискретизации должна быть ≥*(75…100)*$f_{ОП}$, где $f_{ОП}$ – частота опорного напряжения. В этом случае точность определения не будет превышать 3%;

– ввиду определяющего влияния частоты дискретизации на точность нахождения амплитуды и фазы гармоники, результаты при рассмотрении других видов ШИМ, очевидно, будут достаточно близкими к полученным (для синусоидальной ШИМ), если использовать в качестве независимой переменной величину *Nd*.

Современные АЦП [5] обладают максимальной частотой преобразования данных порядка десятков и сотен МГц. Наиболее приемлемыми, на наш взгляд, являются бюджетные варианты, например [6], с частотой преобразования от 100 до 1МГц. Так, при *Nd = 100* и частоте коммутации ключей 1кГц достаточно выбрать АЦП с частотой преобразования равной 100 кГц.

Список литературы: 1. Денисенко В. Динамическая погрешность измерительных каналов / В. Денисенко // АСУ ТП СТА. – 2011. – №2. – С.92-101. **2**. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: АКАДЕМИЯ, 2006. – 272 с. **3**. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А.Д. Поздеев. — Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1998. — 172 с. **4**. Бешта А.С. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя при несимметричном питании статора / А.С. Бешта, А.А. Сёмин // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (26). С. 10-16. **5**. http://www.analog.com/en/products/. **6**. http://www.lcard.ru/products/

Bibliography (transliterated): 1. Denisenko, V. "*Dinamicheskaya pogreshnost izmeritelnyih kanalov*." ASU TP STA. No. 2.2011. 92-101. Print. **2.** Sokolovskiy, G. G. "*Elektroprivodyi peremennogo toka s chastotnyim regulirovaniem*." Moscow: AKADEMIYA, 2006. Print. **3.** Pozdeev, A.D. "*Elektromagnitnyie i elektromehanicheskie protsessyi v chastotno-reguliruemyih asinhronnyih elektroprivodah*." Cheboksary: Izd-vo ChGU, 1998, Print. **4**. Beshta, A.S. and Semin, A.A. "*Parameters estimation of induction motor equivalent circuit using asymmetrical stator supply*." Elektromekhanichni ta energozberigayuchi systemy. Schokvartalniy naukovo-virobnichiy zhurnal. No. 2/2014 (26), 10-16 Print. **5**. http://www.analog.com/en/products/. **6**. http://www.lcard.ru/products/

Поступила (received) 14.07.2015

УДК 6213.313

С. ПАЛИС, д-р техн. наук, проф. Магдебургский университет им. Отто фон Герике, Германия;
В. Е. ПЛЮГИН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А. М. МАСЛЕННИКОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Введение. Решение задачи оптимизации заключается в нахождении наилучшего решения среди возможных рассчитанных вариантов. Несмотря на различные постановки проблемы поиска, структура оптимизационной задачи однотипна и содержит следующие компоненты [1]:

– целевая функция $f(x)$ n-мерного векторного аргумента $x = (x_1, x_2,\ldots, x_n)$:

$$F(x) \in R^n,\ f(x) \in R^1; \tag{1}$$

– ограничения в виде неравенств;
– ограничения в виде равенств;
– область допустимых значений.

В общем виде задача оптимизации сводится к нахождению экстремума целевой функции.

В настоящее время для решения задач оптимизации применяются различные методы, которые в общем случае можно классифицировать на непрерывные, дискретные и целочисленные. В свою очередь, перечисленные задачи разделяют на целочисленные, одномерные и многомерные [2].

Основной проблемой применяемых алгоритмов оптимизации является поиск экстремума функции в случаях с нелинейной областью поиска и разработка методов по сокращению времени поиска и ресурсов вычислительных машин в сложных задач.

В настоящей работе рассматривается применение генетического алгоритма оптимизации, который позволяет при минимальных затратах времени и вычислительных ресурсов получить экстремум целевой функции. В предыдущих работах была рассмотрена программная реализация генетического алгоритма [3]. Настоящая работа посвящена обоснованию применимости генетического алгоритма в оптимальном проектировании электрических машин и рассматривается впервые.

Цель работы: рассмотреть особенности применения классического генетического алгоритма оптимизации в проектировании электрических машин и выполнить анализ его эффективности.

Основные положения генетических алгоритмов.

Генетические алгоритмы (ГА) – это одно из направлений исследований в области искусственного интеллекта, занимающееся созданием упрощенных моделей эволюции живых организмов для решения задач оптимизации [4].

При описании ГА используют определения, заимствованные из генетики. Например, говоря о популяции особей, в качестве базовых понятий применяются ген, хромосома, генотип, фенотип, аллель (рис. 1).

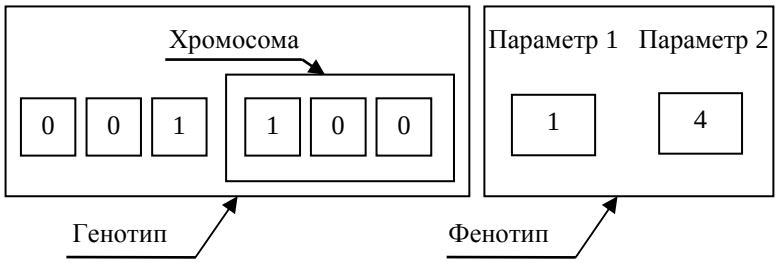


Рисунок 1 – Генотип и фенотип в ГА

В приведенном примере на рисунке число «001» первой хромосомы в двоичной системе исчисления соответствует «1» «параметра 1» в десятичной и число «100» второй хромосомы в двоичной – «4» «параметра 2» в десятичной.

Этим терминам соответствуют определения из технической лексики, в частности, «цепь», «двоичная последовательность», «структура».

Классический ГА состоит из следующих шагов:

1) инициализация, или выбор исходной популяции хромосом;

2) оценка приспособленности хромосом в популяции – расчет функции приспособленности для каждой хромосомы;

© С. Палис, В.Е. Плюгин, А.М. Масленников, 2015

3) проверка условия остановки алгоритма;

4) селекция хромосом – выбор тех хромосом, которые будут участвовать в создании потомков для следующей популяции;

5) применение генетических операторов – мутации и скрещивания;

6) формирование новой популяции;

7) выбор «наилучшей» хромосомы.

Блок-схема ГА изображена на рис. 2.

Простой ГА случайным образом генерирует начальную популяцию. Работа ГА представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не выполнятся заданное число поколений или какой-либо иной критерий остановки. На каждом поколении реализуется пропорциональный отбор по приспособленности, скрещивание и мутация. Хромосомы, полученные в результате применения генетических операторов к хромосомам временной родительской популяции, включаются в состав новой популяции.

Она становится так называемой текущей популяцией для данной итерации генетического алгоритма (рис. 3).

Практическая реализация генетического алгоритма в оптимизации ЭМ.

Порядок оптимизации ЭМ при использовании классического ГА выглядит следующим образом:

1) задаем диапазон варьируемых переменных;

2) задаем ограничения;

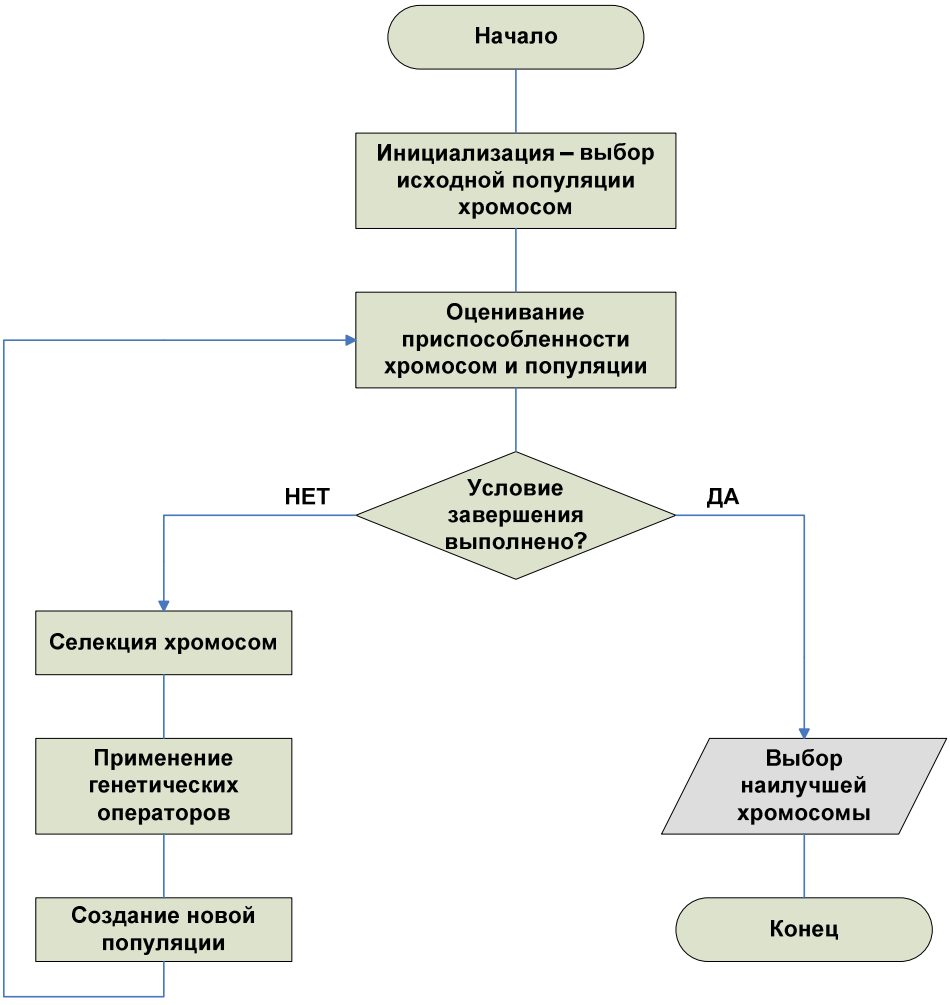


Рисунок 2 – Классический генетический алгоритм

3) выбираем критерий оптимальности;

4) вызываем функцию ГА оптимизации и получаем оптимальный набор варьируемых переменных;

5) для найденного набора вызываем функцию автоматического расчета электродвигателя.

На каждой очередной итерации рассчитываются значения функции приспособленности для всех хромосом этой популяции, после чего проверяется условие остановки алгоритма и либо фиксируется результат в виде хромосомы с наибольшим значением функции приспособленности, либо осуществляется переход к следующему шагу генетического алгоритма, т.е. к селекции.

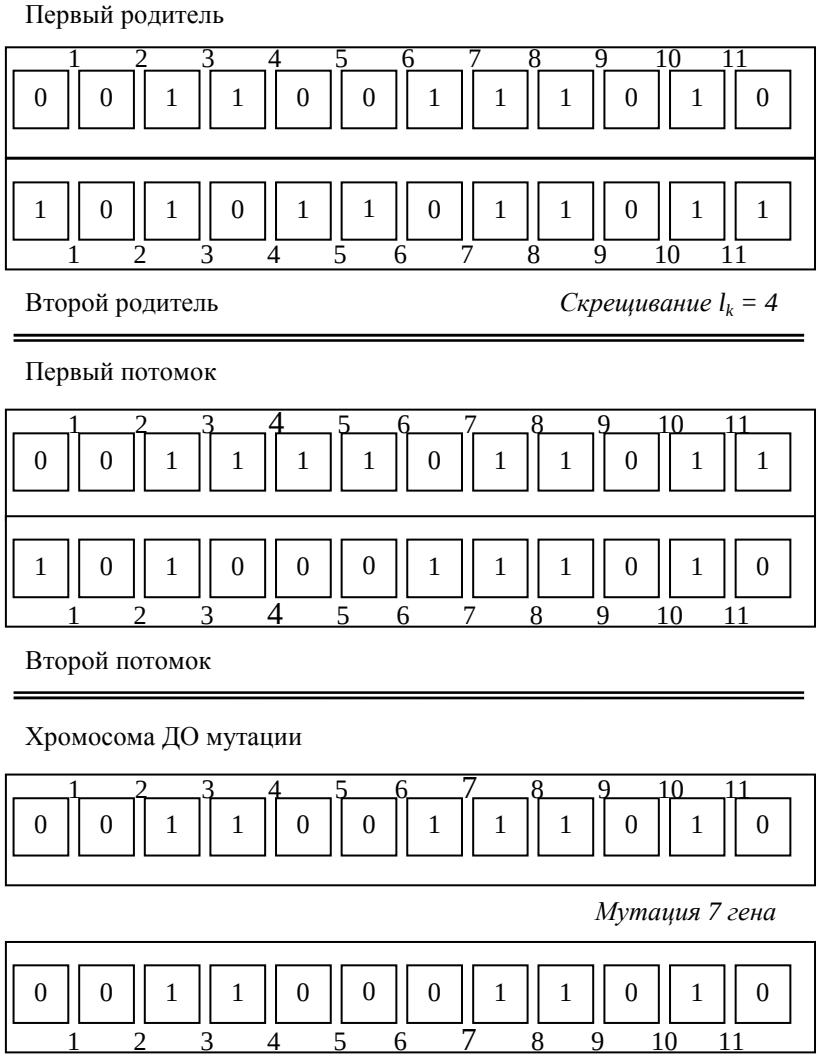


Рисунок 3 – Пример реализации скрещивания в генетическом алгоритме

Рассмотрим на примере оптимизации асинхронного двигателя программную реализацию генетического алгоритма на языке Java в среде NetBeans. Для решения поставленной задачи воспользуемся свободно распространяемой Java-библиотекой EvoJ (англ. Evolution Java) [5].

Проект EvoJ задуман как расширяемый каркас классов Java для решения всевозможных задач оптимизации с помощью эволюционных (генетических) алгоритмов. Для использования EvoJ программист должен имплементировать лишь один простой интерфейс, состоящий из одного метода. Все остальные шаги алгоритма берет на себя EvoJ.

Чтобы решить задачу при помощи EvoJ надо:

1) создать интерфейс с переменными;

2) имплементировать интерфейс фитнесс-функции;

3) создать популяцию решений и осуществить над ними нужное количество итераций ГА, используя код, приведенный выше.

В примере будет рассмотрено две варьируемых переменных: внутренний диаметр пакета статора и длина пакета статора [6].

EvoJ позволяет изменять переменные без задания диапазона изменения переменных. Однако, если нужно имплементировать собственную стратегию мутации, то декларировать сеттеры придется - иначе не получится изменять переменные.

Если решение не устраивает, можно продолжить итерации ГА (увеличивая число популяций и итераций), пока не будет достигнуто желаемое качество решения. Результаты выполнения ГА при выборе максимального КПД в качестве критерия оптимальности показаны на рис. 4.

Как видно из рис. 4, в оптимальной машине КПД выше, чем у базовой, а остальные параметры не выходят за допустимые переделы.

Наименование	Ед.из...	Базовое знач...	Оптимальное
Индукция в возд. зазоре	Тл	0.748	0.807
Внутр. диаметр сердечника ст...	мм	185.0	194.0
Длина сердечника статора	мм	130.0	115.0
Величина Lamda = Ld/tau	-	0.895	0.755
Высота паза статора	мм	21.9	14.6
Высота паза ротора	мм	32.2	33.2
Ширина верха паза статора	мм	7.7	7.8
Ширина дна паза статора	мм	10.2	9.3
Верхний диаметр паза ротора	мм	7.9	7.8
Диаметр дна паза ротора	мм	3.7	3.4
КПД	-	0.885	0.891
cos Ф	-	0.893	0.9
In/In	-	5.84	6.52
Mn/Mн	-	1.4	1.62
Mmax/Mн	-	2.65	2.88
Плотность тока в обмотке стат...	А/мм....	5.912	5.912
Плотность тока в обмотке рот...	А/мм....	2.503	2.5
Превышение темп. обмотки ст...	град. С	93.25	95.69

Рисунок 4 – Таблица параметров АД с КЗР при оптимизации с применением ГА

Выводы Рассмотренный ранее алгоритм декартова произведения множеств (ДПМ) [7], в сравнении с ГА, позволяет выполнять многокритериальную оптимизацию, что является его несомненным плюсом. Кроме того, ДПМ всегда (!) дает однозначный единственный наилучший вариант среди существующих. Однако в ДПМ, при варьировании всего лишь двух переменных с отклонением ± 20 % от базового значения время расчетов приближается к 48 мин.

Применение ГА при тех же варьируемых параметрах и отклонении ± 100 % (!) относительно базового значения, время расчета составило всего лишь 40 с! Однако, ГА (в классической постановке), не позволяет выполнить многокритериальную оптимизацию.

В ГА количество варьируемых параметров и диапазон их изменения не принципиален с точки зрения производительности, т.к. набор варьируемых переменных создается динамически, а не заранее, как в методе сочетаний ДПМ. Кроме того, все комбинации с переменными и значениями целевой функции осуществляются в бинарном виде. Однако, время работы ГА весьма критично к количеству создаваемых популяций и числу итераций в популяциях.

Выбор числа популяций и итераций осуществляется опытным путем и увеличивается до тех пор, пока не будет получен приемлемый результат. Результат оптимизации с применением ГА всегда будет наилучшим по выбранному критерию, но нет гарантии, что не существует варианта еще лучше, чем полученный. Собственно, в этом и состоит логика генетического отбора – мы получаем результат, *приближающийся* к наилучшему среди порожденных случайным образом популяциях. Чем их больше, тем результат получается более достоверным. При этом степень достоверности можно оценить по тому, насколько велик разброс получаемых результатов повторных расчетов при данном количестве популяций.

Производительность ГА определяется не числом и диапазоном варьируемых переменных, а лишь размером популяций эффективных вариантов, а результат оптимизации неоднозначен и приближен к наилучшему. Если нужно произвести оценочные расчеты в максимально сжатые сроки, а качество получаемых результатов вписывается в допустимую погрешность, то применение ГА оптимизации может стать для проектировщика незаменимым инструментом.

Список Литературы: 1. Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации / Е.А. Кочегурова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 157 с. **2**. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндан, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 351с. **3**. Zablodskij N. Induction Motor Design by Use of Genetic Optimization Algorithms / N. Zablodskij, V. Pliugin, J. Lettl, K. Buhr, S. Khomitskiy // “Transactions on electrical engineering”. – 2013. – No. 3. – P. 65 – 69. **4**. Емельянов В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с. **5**. EvoJ - Evolutionary computations framework [Электронный ресурс] / Inprise Corporation, 2002. – 12 p. – Режим доступа к книге: http://evoj-frmw.appspot.com. **6**. Заблодський М.М. САПР електромеханічних пристроїв: навчальний посібник / М.М. Заблодський, В.Є. Плюгін, К. Бур. – Алчевськ, Ладо, 2013. – Ч. 2. – 320 с. **7**. Zablodskij N. Induction Motor Optimal Design by Use of Cartesian Product / N. Zablodskij, V. Pliugin, J. Lettl, K. Buhr // “Transactions on electrical engineering”, 2013. – No. 2. – P. 54 - 58.

Bibliography (transliterated) 1. Kochegurova E.A. Teoriya i metodyi optimizatsii / E.A. Kochegurova. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politeh-nicheskogo universiteta, 2012. – 157 s. **2**. Rekleytis G. Optimizatsiya v tehnike / G. Rekleytis, A. Reyvindan, K. Regsdel. – M.: Mir, 1986. – 351s. **3**. Zablodskij N. Induction Motor Design by Use of Genetic Optimization Algorithms / N. Zablodskij, V. Pliugin, J. Lettl, K. Buhr, S. Khomitskiy // “Transactions on electrical engineering”. – 2013. – No. 3. – P. 65 – 69 **4**. Emelyanov V.V. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya / V.V. Emelyanov, V.V. Kureychik, V.M. Kureychik. – M.: Fizmatlit, 2003. – 432 s. **5**. EvoJ - Evolutionary computations framework [Elektronnyiy resurs] / Inprise Corporation, 2002. – 12 p. – Rezhim dostupa k knige: http://evoj-frmw.appspot.com. **6**. Zablodskiy M.M. SAPR elektromehanIchnih pristroYiv: navchalniy posIbnik / M.M. Zablodskiy, V.E. PlyugIn, K. Bur. – Alchevsk, Lado, 2013. – Ch. 2. – 320 s. **7**. Zablodskij N. Induction Motor Optimal Design by Use of Cartesian Product / N. Zablodskij, V. Pliugin, J. Lettl, K. Buhr // “Transactions on electrical engineering”, 2013. – No. 2. – P. 54 - 58.

Поступила (received) 26.08.2015

Диагностика элементов и узлов электромеханических систем

УДК 255:29.1

Г. О. ГАВРИЛЕЦ, асс3каф. САУЭ КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг;
Д. И. РОДЬКИН, д.т.н., проф., зав. каф. САУЭ КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ВИБРОАКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Введение. Под вибрационной активностью электромеханической системы (ЭМС) понимают ее свойство воспроизводить вибрации. Уровень виброактивности определяется технологией изготовления и сборки узлов системы, а также условиями эксплуатации. Этот показатель используется сравнительно давно, однако до настоящего времени он не рассматривался в качестве информационного поля, дающего представление о механизме возникновения вибраций, их распространении и влиянии на оборудование и его кинематические связи [1–4].

На сегодняшний день достаточно полно исследованы вопросы измерения и анализа вибрации во временной и частотной области, идентификации ее причин – конструктивных недостатков (дисбаланса ротора, дефектов подшипников, дефектов соединения электродвигателя с рабочей машиной), несимметричности магнитных систем статора и ротора, дефектов обмоток и др. Измерение и анализ электрических параметров и параметров вибрации дает возможность проводить комплексную оценку технического состояния электрических машин в процессе эксплуатации и прогнозировать их рабочий ресурс.

Анализ состояния вопроса. Упругие элементы электромеханического оборудования обеспечивают замыкание силовой кинематической цепи. Под действием неуравновешенных динамических нагрузок в них происходят сложные процессы преобразования энергии, в конечном итоге определяющие форму и величину вибрации, а наличие ослаблений или иных дефектов приводит к образованию энергетических потоков, увеличивающих потери мощности.

Для диагностики технического состояния механической части ЭМС широко используются методы, основанные на анализе изменения жесткостных и диссипативных свойств в процессе ее эксплуатации. В качестве диагностических признаков, как правило, используют динамические характеристики механических систем – импульсные, переходные и частотные характеристики, параметры колебательной системы (собственные и резонансные частоты, коэффициенты демпфирования, поглощения и потерь, декремент колебаний), характеристики нелинейности системы (силы трения, параметры петли гистерезиса), статистические параметры вибросигналов. Важным и крайне сложным при этом остается математическое описание колебательных процессов в различных механических системах. Этой проблеме посвящены фундаментальные труды Л. Эйлера, Ж . Даламбера, Ж. Лагранжа, заложивших основы математического описания колебательных систем с конечным числом степеней свободы. Теоретическим и практическим вопросам колебаний машин и конструкций посвящены многочисленные работы ученых советской эпохи [5–6].

Другим направлением при решении задач диагностики технического состояния механических систем, и в частности креплений, является исследование энергетических характеристик вибрации. Выбор для анализа именно энергетических процессов в диагностических системах очевиден и обоснован многочисленными исследованиями.

Вопрос преобразования энергии в колебательных системах подробно изучен в задачах электротехники. Для электрических цепей, содержащих линейные и нелинейные сопротивления, емкости и индуктивности, известны выражения для определения активной, реактивной и полной мощности, а также определены условия потребления энергии элементами цепи и передачи ее обратно в источник. Так, в работе [7] показана методика составления идентификационных уравнений баланса мгновенной мощности, которые определяют равенство мощности источника и суммарной мощности всех элементов электрической системы. В результате могут быть достаточно точно определены электромагнитные параметры ЭМС. Эта теория может быть распространена и на механические колебательные системы с применением метода электромеханических аналогий [5].

Достаточно объективно оцениваются уровни колебательной, т.е. вибрационной мощности для разного рода машин, технологических комплексов и установок. Так, в работе [8] выполнен количественный анализ вибромощности асинхронного двигателя, который свидетельствует о значительных (до 10%) потерях мощности на вибрацию. Авторами предложена методика измерения и расчета вибрационной мощности в системах диагностики.

Методика, описанная в работе [4], позволяет определить динамические силы, действующие в трех взаимно перпендикулярных направлениях и потоки вибромощности, проходящие через болтовые соединения, а также оценить техническое состояние механизма. Но в связи с необходимостью измерения большого количества характеристик механизма, что влияет на погрешность вычислений, этот метод не нашел широкого применения.

Выполненный анализ литературных источников, затрагивающих проблемы вибрации в технике, указывает на рост интереса к энергетическим проблемам этого сложного и важного для практических целей явления. До настоящего времени недостаточно разработаны теоретические аспекты, которые должны лежать в основе анализа энергетики вибропроцессов.

© Г.О. Гаврилец, Д.И. Родькин, 2015

Это объясняется целым рядом причин, и прежде всего в связи со сложностью их формализации.

Задача исследований. Аналитическое описание процесса формирования вибрационной мощности и ее составляющих в плоскости и в пространстве для оценки виброактивности электромеханической системы.

Результаты исследований. Вибромощность представляет собой работу, затрачиваемую на возбуждение колебаний в опорных и не опорных связях в единицу времени и используется для оценки виброактивности механизмов. Наличие в ее составе информации о динамических усилиях позволяет установить основные источники и пути распространения вибрации [1]. В общей постановке вибрационная мощность формируется как скалярное произведение векторов динамических сил и колебательных скоростей, которые могут быть рассчитаны по измеряемому сигналу виброускорения [9].

Рассмотрим процесс, при котором оба указанных параметра представляют собой периодические функции, характеристики которых позволяют представить их в форме тригонометрических рядов:

$$V(t)=\sum_{n=0}^{\infty} V_n \cos(\Omega_n t-\psi_n)\ ; \tag{1}$$

$$F(t)=\sum_{m=0}^{\infty} F_m \cos(\Omega_m t-\psi_m)\ , \tag{2}$$

где V_n , F_m – амплитуды гармоник, аппроксимирующих временные зависимости виброскорости $V(t)$ и динамической силы $F(t)$ на интервале разложения T ; Ω_n , Ω_m – частоты гармонических составляющих, а ψ_n , ψ_m – их фазовые углы.

Выполнив необходимые преобразования получим:

$$V(t)=\sum_{n=0}^{\infty} V_{na} \cos\Omega_n t+\sum_{n=0}^{\infty} V_{nb} \sin\Omega_n t\ ; \tag{3}$$

$$F(t)=\sum_{m=0}^{\infty} F_{ma} \cos\Omega_m t+\sum_{m=0}^{\infty} F_{mb} \sin\Omega_m t\ , \tag{4}$$

где V_{na} , F_{ma} – амплитуды косинусных составляющих скорости и силы с частотами Ω_n и Ω_m ;

V_{nb} , F_{mb} – амплитуды синусных составляющих скорости и силы с частотами Ω_n и Ω_m .

Вибрационная мощность $P(t)$ определятся как произведение:

$$\begin{aligned} P(t)=V(t)F(t)=\sum_{n=0}^{\infty} V_{na}\cos\Omega_n t \sum_{m=0}^{\infty} F_{ma}\cos\Omega_m t+\sum_{n=0}^{\infty} V_{nb}\sin\Omega_n t \sum_{m=0}^{\infty} F_{mb}\sin\Omega_m t+ \\ \sum_{n=0}^{\infty} V_{na}\cos\Omega_n t \sum_{m=0}^{\infty} F_{mb}\sin\Omega_m t+\sum_{n=0}^{\infty} V_{nb}\sin\Omega_n t \sum_{m=0}^{\infty} F_{ma}\cos\Omega_m t\,. \end{aligned} \tag{5}$$

После математических преобразований временную зависимость мощности можно представить в виде:

$$P(t)=\frac{1}{2}\left[\begin{aligned} &\sum_{k=0}^{n+m}(V_{na}F_{ma}+V_{nb}F_{mb})\cos(\Omega_n-\Omega_m)t+\sum_{k=0}^{n+m}(V_{na}F_{ma}-V_{nb}F_{mb})\cos(\Omega_n+\Omega_m)t+ \\ &+\sum_{k=0}^{n+m}(V_{na}F_{mb}+V_{nb}F_{ma})\sin(\Omega_n-\Omega_m)t+\sum_{k=0}^{n+m}(V_{na}F_{mb}+V_{nb}F_{ma})\sin(\Omega_n+\Omega_m)t\,. \end{aligned}\right] \tag{6}$$

Два первых слагаемых в полученном выражении определяют косинусные составляющие гармоник мощности P_{ka} , а два вторые – синусные компоненты P_{kb} , при этом номера гармоник мощности определяются известной зависимостью $k=n\pm m$ [7]:

$$P(t)=P_0+\sum_{k=0}^{n+m} P_{ka}(t)+\sum_{k=1}^{n+m} P_{kb}(t)\ . \tag{7}$$

Последняя зависимость носит общий характер, свидетельствующий в полной мере о том, что как число гармонических в спектре мощности, так и общее число составляющих значительно выше соответствующих значений по сравнению с зависимостями $V(t)$ и $F(t)$. Это явление объясняется нелинейной операцией умножения компонент, определяющих мощность. В ее основе лежат частотные преобразования, связанные с операциями перемножения гармонических функций sin и cos. Важность уточнения этого вопроса несомненна и может быть выполнена путем следующего примера.

Пусть перемножаются гармоники силы F_m и скорости V_n с разными частотами. Тогда зависимость для вибромощности будет иметь вид:

$$P(t)=\left[\begin{aligned} &(V_{na}F_{ma}+V_{nb}F_{mb})\cos(\Omega_n-\Omega_m)t+(V_{na}F_{ma}-V_{nb}F_{mb})\cos(\Omega_n+\Omega_m)t+ \\ &+(V_{nb}F_{ma}+V_{na}F_{mb})\sin(\Omega_n-\Omega_m)t+(V_{na}F_{mb}-V_{nb}F_{ma})\sin(\Omega_n+\Omega_m)t\,. \end{aligned}\right] \tag{8}$$

В зависимости от значений m и n, возможны следующие зависимости, характеризующие энергетический режим.

При n = m вибромощность определяется выражением, из которого видно, что она имеет постоянную составляющую и знакопеременную двойной частоты:

$$P(t)=\frac{1}{2}\left[(V_{na}F_{ma}+V_{nb}F_{mb})+(V_{na}F_{ma}-V_{nb}F_{mb})\cos 2m\Omega t+(V_{nb}F_{ma}+V_{na}F_{mb})\sin 2m\Omega t\right] \tag{9}$$

При n ≠ m имеем две частоты переменной составляющей мощности: частота одной гармоники $k_1 = n+m$, а второй $k_2 = n-m$. Соответствующее выражение для этого случая имеет вид:

$$P(t)=\frac{1}{2}\left]\begin{matrix}(V_{na}F_{ma}+V_{nb}F_{mb})\cos k_1\Omega t+(V_{nb}F_{ma}+V_{na}F_{mb})\sin k_1\Omega t+\\ +(V_{na}F_{ma}-V_{nb}F_{mb})\cos k_2\Omega t+(V_{nb}F_{ma}+V_{na}F_{mb})\sin k_2\Omega t.\end{matrix}\right] \quad (10)$$

Рассматриваемый случай целесообразно проанализировать с такой позиции. Пусть m_i-n_j=k, причем i и j принимают некоторые значения, при которых имеют место такие соотношения: $k=2m_i$ или $k=2n_j$. В этом случае порядок гармоник мощности, полученных в результате умножения компонент скорости и силы разных частот будет таким же, как и составляющих с одинаковыми частотами. В результате происходит геометрическое суммирование составляющих. В качестве примера рассмотрим два произведения – две зависимости для вибромощности: одна при m_3=3 и n_1=1, вторая при m_5=5 и n_7=7.Гармоники мощности в первом случае будут иметь порядок 2 и 4, а во втором 2 и12. Следовательно, вторые гармоники из первого произведения складываются со вторыми гармониками второго. Это явление проявляется, как следует из изложенного, при формировании вибромощности при наличии сигналов разных частот в зависимостях для виброскорости и вибросилы.

При различных, но достаточно близких частотах компонент, формирующих вибромощность относительные частоты k_1 и k_2 существенно отличаются друг от друга, вследствие чего наблюдается биение колебаний с периодом, зависящим от соотношения частот исходных сигналов.

Эффективное значение вибромощности на интервале разложения равно:

$$P_{rms}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T P^2(t)dt}\ . \quad (11)$$

Определение этого параметра, выполненное с учетом активной, косинусной и синусной составляющих вибромощности имеет вид:

$$P_{rms}=\sqrt{P_{0\Sigma}^2+\sum_{k=1}^{n+m}P_{ak}^2+\sum_{k=1}^{n+m}P_{bk}^2}\ . \quad (12)$$

Изложенное выше справедливо для оценки вибропараметров в одной из трех плоскостей.

Виброактивность электромеханической системы – это совокупный показатель, который можно получить по вибропараметрам, измеренным в каждой из плоскостей A, B, C в пространстве, в котором реально и формально находится объект.

Рассмотрим формирование k-й пространственной гармоники вибромощности в векторной форме. Возьмем систему координат так, чтобы начало координат совпадало с началом векторов $\overline{P_{kA}}$, $\overline{P_{kB}}$, $\overline{P_{kC}}$, определяющих вибромощность в трех плоскостях (рис. 1, а). Разложим эти мощности на косинусную и синусную компоненты: $\overline{P_{kA}}=\overline{P_{akA}}+\overline{P_{akB}}$, $\overline{P_{kB}}=\overline{P_{akB}}+\overline{P_{bkB}}$, $\overline{P_{kC}}=\overline{P_{akC}}+\overline{P_{bkC}}$. При этом проекции вибромощности на координатные оси определяются выражениями: $P_{kOX}=P_{akB}+P_{bkA}$, $P_{kOY}=P_{akC}+P_{bkB}$, $P_{kOZ}=P_{akA}+P_{bkC}$.

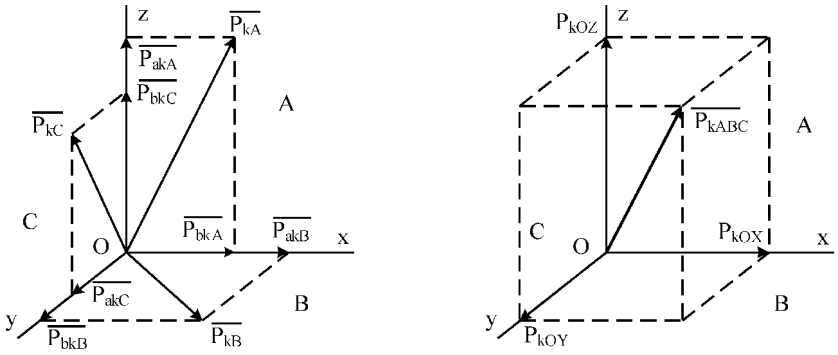


Рис. 1 Формирование k-й пространственной гармоники вибромощности:
а – проекции вибромощности; б – пространственный вектор вибромощности

Определим равнодействующую как диагональ параллелепипеда со сторонами, равными суммарным проекциям вибромощности (рис. 1, б). Полученный вектор $\overline{P_{kABC}}$ представляет собой вектор k-й гармоники вибромощности, а его модуль равен:

$$P_{kABC}=\sqrt{\left(P_{kOX}\right)^2+\left(P_{kOY}\right)^2+\left(P_{kOZ}\right)^2}. \quad (13)$$

Поскольку проекции вектора $\overline{P_{kABC}}$ на координатные оси равны произведению его модуля на косинус угла, составленного с каждой осью, то положение k-й гармоники вибромощности в пространстве определяется направляющими косинусами: $\cos\left(P_{kABC},x\right)=\frac{P_{kOX}}{P_{kABC}}$, $\cos\left(P_{kABC},y\right)=\frac{P_{kOY}}{P_{kABC}}$, $\cos\left(P_{kABC},z\right)=\frac{P_{kOZ}}{P_{kABC}}$.

Из зависимости (13) легко получить эффективные значения вибромощности при наличии составляющих не только в трех плоскостях, но и в двух или в одной. Например, при отсутствии вибрации по оси Y, проекцией на эту ось будет $P_{kOY}=P_{bkB}$. Соответствующие зависимости для других вариантов формирования вектора вибромощности можно получить из (13), анализируя рис. 1, а.

Временная зависимость вектора вибромощности определяется из выражения:

$$P_{kABC}(t)=P_{kA}(t)+P_{kB}(t)+P_{kC}(t)+P_{0\,ABC}\,, \tag{14}$$

где $P_{0\,ABC}$ – суммарное значение потерь активной мощности в результате вибраций по трем плоскостям.

Учитывая то, что параметр k может принимать значения от 1 до ∞, выражение для эффективного значения вибромощности следует представить так:

$$P_{ABC}=\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty}\left(\left(P_{akB}+P_{bkA}\right)^2+\left(P_{akC}+P_{bkB}\right)^2+\left(P_{akA}+P_{bkC}\right)^2\right)}\,. \tag{15}$$

Очевидно, что определение компонент, входящих в (15) производится с учетом приведенных выше замечаний, а параметр k имеет конечное значение в виду малости высокочастотных вибраций.

Коэффициент виброактивности с учетом отмеченного определяется как отношение эффективных значений вибромощности к соответствующему значению мощности, преобразуемой в звене электромеханической системы:

$$K_v=\frac{P_{ABC}}{P_c}\,, \tag{16}$$

где P_c – эффективная мощность нагрузки на интервале определения вибропараметров.

Из сказанного следует, что виброактивность может быть определена путем математической обработки виброускорения элемента ЭМС в трех плоскостях, причем ее опасные значения могут наблюдаться даже при допустимых уровнях вибрации по отдельным направлениям. Развитие изложенного математического аппарата видится в создании алгоритмов и устройств для оценки параметров виброактивности отдельных элементов электромеханической системы.

Выводы. Для количественной оценки вибрационных характеристик электромеханической системы, построения систем контроля и мониторинга состояния оборудования целесообразно использование понятия виброактивности, как отношения эффективной мощности вибрации к мощности, преобразуемой электромеханической системой.

При оценке виброактивности электромеханических систем с наличием вибраций в трех плоскостях целесообразно использование элементов теории мгновенной мощности, в частности эффективного значения вибромощности в декартовой системе координат в пространстве.

Создание измерителей виброактивности или ее мониторинг возможны при наличии виброхарактеристик элемента ЭМС, одновременно измеренных по трем плоскостям.

Список литературы: 1. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. /М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с. **2.** *Григорьев Н. В.* Вибрация энергетических машин. Справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1974. – 464 с. **3.** *Попков В. И.* Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов / В. И. Попков. Судостроение, Ленинград, 1974. **4.** *Попков В. И.* Виброакустическая диагностика в судостроении / В. И. Попков, Э. Л. Мышинский, О. И. Попков, 2-е изд., перераб. и доп. – Л. Судостроение 1989. – 256 с. **5.** *Яблонский А. А.* Курс теории колебаний. / А. А. Яблонский, С. С. Норейко. Уч. пособие для студентов втузов. М.: Высш. Школа, 1975. – 248 с. **6.** *Пановко Я. Г.* Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1991. – 256 с. **7.** *Загирняк М. В.* Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей : монография / М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин, А. П. Черный – Кременчуг : ЧП Щербатых А. В., 2013. – 164 с. **8.** *Браташ О. В.* Исследование вибромощности асинхронного двигателя / О. В. Браташ, А. П. Калинов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДУ ім. М. Остроградського, 2010. – Вип. 4/2010 (12) - 132 с., С. 28-29. **9.** Вибромощность, излучаемая машинами в присоединенные опорные конструкции. Часть 2. Методика выполнения косвенных измерений: ГОСТ Р 8.653-2009. – [введен в действие 01.01.2010]. – «СТАНДАРТИНФОРМ», Москва, 2009. – 27 с.

Bibliography (transliterated): 1. Genkin M.D. Vibroakusticheskaja diagnostika mashin i mehanizmov. – M.: Mashinostroenie, 1981. Print. 2. Grigor'ev N. V. Vibracija jenergeticheskih mashin. Spravochnoe posobie. – L.: Mashinostroenie, 1974. Print. 3. Popkov V. I. Vibroakusticheskaja diagnostika i snizhenie vibroaktivnosti sudovyh mehanizmov. Sudostroenie, Leningrad, 1974. Print. 4. Popkov V. I., Myshinskij Je. L., Popkov O. I. Vibroakusticheskaja diagnostika v sudostroenii/ L. Sudostroenie 1989. Print. 5. Jablonskij A. A. Norejko S. S. Kurs teorii kolebanij. Uch. posobie dlja studentov vtuzov. M., Vyssh. Shkola, 1975. Print. 6. Panovko Ja. G. Vvedenie v teoriju mehanicheskih kolebanij. M.: Nauka, 1991. Print. 7. Zagirnjak M. V., Rod'kin D. I., Romashihin Ju. V., Chernyj A. P. Jenergeticheskij metod identifikacii parametrov asinhronnyh dvigatelej : monografija. Kremenchug : ChP Shherbatyh A. V., 2013. Print. 8. Bratash O. V., Kalinov A. P. “Issledovanie vibromoshhnosti asinhronnogo dvigatelja”. Elektromehanichni i energozberigajuchi sistemi. Shhokvartal'nij naukovo-virobnichij zhurnal. – Kremenchuk: KDU im. M. Ostrograds'kogo, 2010. No. 4.12. 2010. 28-29. Print. 9. Vibromoshhnost', izluchaemaja mashinami v prisoedinennye opornye konstrukcii. Chast' 2. Metodika vypolnenija kosvennyh izmerenij: GOST R 8.653-2009. – «STANDARTINFORM», Moskva, 2009. Print.

Поступила (received) 24.07.2015

УДК 620.179.14

Б. М. ГОРКУНОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
С. Г. ЛЬВОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А. А. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук, ассистент НТУ «ХПИ»;
ВУ СУАН ВЬЮНГ, магистр НТУ «ХПИ»

БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Введение. На сегодняшний день безаварийная работа энергетических агрегатов зависит от постоянного бесконтактного контроля механических параметров энергетических установок. Существует достаточно большое количество первичных преобразователей информации о качестве и работоспособности металлических объектов. Наиболее предпочтительными являются электромагнитные методы и преобразователи, так как они обладают многопараметровостью информации, бесконтактным съемом информации, электрической формой выходного сигнала, слабой зависимостью от внешних мешающих факторов (влажность, температура, загрязненность поверхности и др.).

В работах [1-3] были рассмотрены различные модификации абсолютного электромагнитного метода и реализующие его трансформаторные электромагнитные преобразователи (ТЭМП) для бесконтактного контроля механических напряжений ($\sigma_м$) в цилиндрических металлических изделиях, используя корреляционные зависимости между $\sigma_м$ и относительной магнитной проницаемостью (μ_r) и удельной электрической проводимостью (σ) материала.

Исследования показывают, что относительные погрешности контроля магнитных и электрических параметров цилиндрических изделий в рациональной области изменения обобщенного параметра x не превышают 1 и 2 % соответственно. Последнее обстоятельство указывает на то, что относительный разброс электромагнитных параметров, измеряемых абсолютным методом, должен превышать хотя бы на порядок, т.е. в 10 раз больше при переходе от одного изделия к другому. Это означает, что относительные разбросы μ_r и σ одного изделия от другого должны составлять 10 % по μ_r и 20 % по σ. Поэтому абсолютными двухпараметровыми методами целесообразно пользоваться преимущественно для контроля изделий различных марок, поскольку чувствительность преобразователя не позволяет контролировать достаточно близкие между собой электромагнитные параметры μ_r и σ изделий при воздействии на них механических усилий в рамках применимости закона Гука [4].

Цель статьи. Для повышения чувствительности бесконтактного контроля механических параметров металлических образцов в данной работе предложен один из вариантов дифференциального двухпараметрового электромагнитного метода, реализованного для трансформаторного преобразователя.

Материалы и результаты исследований. Суть разработанного метода заключается в следующем. Используя универсальную функцию [5] электромагнитного преобразователя для нормированного магнитного потока $K= f(x)$, получим относительное приращение $\frac{\delta K}{K}$ параметра K в виде:

$$\frac{\delta K}{K} = \frac{\partial K}{\partial x}\frac{x}{K}\frac{\delta x}{x}, \qquad (1)$$

где $\frac{\partial K}{\partial x}$ – производная параметра K по x; x – обобщенный параметр, $x = a\sqrt{\mu_0\mu_r\sigma\omega}$, a – радиус изделия, μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}$ Гн/м, ω – циклическая частота зондирующего поля.

Воспользовавшись функциональной зависимостью $x = f(\varphi_2)$, которая однозначно зависит от фазового угла магнитного потока в исследуемом изделии [5], получим формулу для относительного приращения параметра x в виде:

$$\frac{\delta x}{x} = \frac{\partial x}{\partial \varphi_2}\frac{1}{x}\delta\varphi_2, \qquad (2)$$

где φ_2 – фазовый угол выходного сигнала ТЭМП; $\frac{\partial x}{\partial \varphi_2}$ – производная x по φ_2; $\delta\varphi_2$ – абсолютная погрешность измерения фазового угла φ_2.

На основании соотношений (1) и (2) выражение для расчета $\frac{\delta K}{K}$ получим в виде:

$$\frac{\delta K}{K} = \frac{\partial K}{\partial \varphi_2}\frac{1}{K}\delta\varphi_2. \qquad (3)$$

© Б.М. Горкунов, С.Г. Львов, А.А. Тищенко, Ву Суан Вьюнг, 2015

Таким образом, измерив электродвижущую силу (ЭДС) E_2 и E_0 трансформаторного преобразователя с изделием и без него соответственно, при заданных значениях радиуса изделия a и радиуса преобразователя $a_{\text{п}}$, определив параметр K и x, вычислим значение μ_r из выражения [6]:

$$\mu_r = \frac{E_2 a_{\text{п}}^2}{E_0 a^2 K}. \tag{4}$$

Величину σ определим из выражения [6]:

$$\sigma = \frac{x^2}{2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f}, \tag{5}$$

где f – частота намагничивающего тока.

Выражения (4) и (5) позволяют найти значения μ_r и σ в последовательном цикле, т.е. сначала определяют параметр μ_r, а затем σ. При автоматизации процесса совместного контроля двух параметров удобно применить параллельный цикл расчетов по результатам эксперимента.

Для этого, после подстановки в (5) выражение (4), получим:

$$\sigma = \frac{x^2 E_0 K}{2\pi \mu_0 E_2 a_{\text{п}}^2 f}. \tag{6}$$

Величину μ_r находят по-прежнему из соотношения (4).

Если использовать формулу (4) для расчета величины μ_r и считать что параметры a, $a_{\text{п}}$ и E_0 являются постоянными в случае выбранного изделия, тогда соотношение для определения относительного приращения магнитной проницаемости $\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}}$ можно записать как:

$$\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}} = \frac{\delta E_2}{E_{2c}} - \frac{\partial K}{\partial \varphi_2}\frac{1}{K_c}\delta\varphi_2. \tag{7}$$

где μ_{rc}, K_c, E_{2c} и μ_r, E_2 – величины, имеющие отношение к выбранной рабочей точке, определяемой параметрами стандартного образца (СО) и исследуемого образца (ИО) соответственно; $\frac{\delta E_2}{E_{2c}}$ – относительное приращение ЭДС E_2, вызванное изменением μ_r образца под действием механической силы.

С учетом формулы (6) выражение для расчета относительного приращения удельной электрической проводимости $\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$ определяют, исходя из соотношения:

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma_c} = 2\frac{\delta x}{x_c} + \frac{\delta K}{K_c} - \frac{\delta E_2}{E_{2c}}, \tag{8}$$

где индекс «с» имеет отношение к рабочей точке преобразователя, определенной для стандартного образца.

Подставив в (8) формулы (2) и (3), найдем выражения для определения относительного приращения $\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$ величины электропроводности σ. При этом:

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma_c} = \left(2\frac{\partial x}{\partial \varphi_2}\frac{1}{x} + \frac{\partial K}{\partial \varphi_2}\frac{1}{K}\right)\partial\varphi_2 - \frac{\delta E_2}{E_{2c}}. \tag{9}$$

Обозначим коэффициент в круглых скобках перед $\partial\varphi_2$ за B_1. В этом случае

$$B_1 = 2\frac{\partial x}{\partial \varphi_2}\frac{1}{x} + \frac{\partial K}{\partial \varphi_2}\frac{1}{K}. \tag{10}$$

Таким образом, формулы (7) и (9) преобразуются к виду:

$$\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}} = \frac{\delta E_2}{E_{2c}} - A_1\delta\varphi_2. \tag{11}$$

где A_1 – коэффициент, который с учетом выражения (3) имеет вид $A_1 = \frac{\partial K}{\partial \varphi_2}\frac{1}{K}$.

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma_c} = -\frac{\delta E_2}{E_{2c}} + B_1\delta\varphi_2. \tag{12}$$

Для одновременного определения одним и тем же ТЭМП относительных значений $\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}}$ и $\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$ необходимо измерить с учетом знака два разностных сигнала δE_2 и $\delta\varphi_2$ трансформаторного преобразователя, вызван-

ные отличием электромагнитных параметров исследуемого изделия, подверженного механической нагрузке, от параметров стандартного образца.

Полученные выше уравнения позволяют определить значения $\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}}$ и $\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$ по измеренным электрическим величинам и известным для выбранной рабочей точки коэффициентам A_1 и B_1 при них. В таком случае, использование дифференциального двухпараметрового метода существенно упрощает процесс измерения по сравнению с абсолютным.

На рис. 1 приведена дифференциальная электрическая схема лабораторной установки для одновременного контроля приращений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости. В данной схеме используют два идентичных проходных трансформаторных преобразователя (рабочий РП и компенсационный КП).

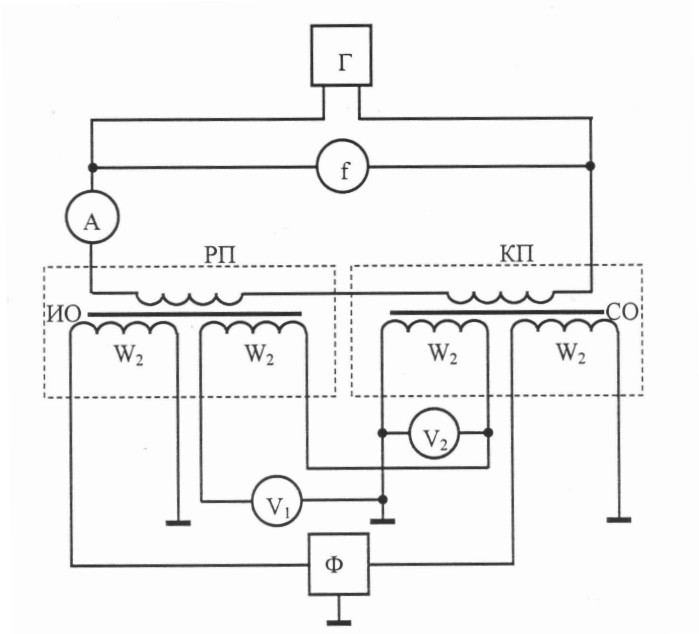


Рис. 1 Дифференциальная электрическая схема контроля приращений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий.

Намагничивающие обмотки этих преобразователей включаются последовательно согласно и запитываются от генератора синусоидального тока Г. Намагничивающий ток регистрируется амперметром А. Частота тока контролируется частотомером f. Измерительные катушки каждого из преобразователей имеют по две идентичные обмотки с числами витков W_2. В эти катушки помещают непосредственно ИО и СО, которые размещаются внутри РП и КП, соответственно. Одна пара измерительных обмоток РП и КП включается последовательно встречно.

Разностный сигнал δE_2 измеряется вольтметром V_1. Вольтметр V_2 подключается к измерительной обмотке КП и фиксирует сигнал E_{2c}, связанный с наличием в преобразователе стандартного образца. Сигналы со второй пары измерительных обмоток РП и КП подаются на входы измерителя фазовых углов Ф. Вольтметр V_1 и измеритель фазы фиксируют приращения δE_2 и $\delta\varphi_2$ с учётом их знаков.

Схему настраивают следующим образом. Сначала экспериментально находят рабочую точку компенсационного преобразователя со стандартным образцом. Для этого в отсутствие испытуемого изделия в РП изменяют с помощью генератора частоту намагничивающего тока до тех пор, пока измеритель фазы не зарегистрирует заданный фазовый угол φ_{2c}, соответствующий определенному значению x_c. Измеряют величину E_{2c}. Затем в РП помещают образец, характеристики которого одинаковы с характеристиками стандартного образца (как правило, в этом случае в КП и РП помещают два образца, изготовленные из одного и того же прутка). На данных двух образцах проводят балансировку схемы, т.е. добиваются значений $\delta E_2 \to 0$ и $\delta\varphi_2 \to 0$. Для более точного выполнения балансировки схемы на практике можно применять различные виды коррекции, например, использование тонких магнитных стержней регулируемой длины внутри преобразователя (магнитные шунты), фазовращателей в измерительных цепях преобразователей, регуляторов E_{2c} вблизи заданного значения и других устройств. После проведения балансировки схема готова к работе.

В табл. 1 приведены результаты измерения μ_r и σ для образцов из стали, полученные с помощью дифференциальной схемы. Здесь же для сравнения приведены данные измерений дифференциально-баллистическим и мостовым на постоянном токе μ_r' и σ' этих же образцов. Выбор рабочей точки x_c = 2 обусловлен тем, что этот

режим является оптимальным с точки зрения достижения максимальной чувствительности преобразователя, которая определяется наибольшей крутизной кривых зависимостей $K = f(x)$; $\varphi_2 = f(x)$ [5].

Таблица 1 – Результаты измерений μ_r и σ, полученные с помощью дифференциальной схемы (рис. 1); $x_c = 2$, $A_1 \approx -0{,}907$, $B_1 \approx 2{,}507$

Материал, a; μ_{rc} и σ_c	f, Гц	$\delta\varphi_2$, радиан	δE_2, мВ	$1/E_{2c}$, 1/В	$\frac{\delta\mu_r}{\mu_{rc}}$	$\frac{\delta\sigma}{\sigma_c}$	μ_r	σ, МСм/м	μ'_r	σ', МСм/м	δx	β_{max}, %
Сталь: a=1,5 мм; μ_{rc} = 105; σ_c =0,5 МСм/м	429	-0,105	-27	2,66	-0,167	-0,191	87,5	0,405	90	0,40	0,344	1,3
Сталь: a=1,5 мм; μ_{rc} = 200; σ_c = 0,6 МСм/м	188	-0,080	-13	3,18	-0,114	-0,160	177	0,504	180	0,5	0,268	0,8

Знак «-» характеризует то, что величины, соответствующие исследуемым изделиям, меньше, чем величины, связанные со стандартными образцами.

Вывод. Результаты табл. 1. показывают, что величины μ_r и σ, измеренные описанным и известными способами, достаточно близки друг к другу в том случае, когда электрофизические параметры исследуемых и стандартных образцов не сильно отличаются между собой, т.е. при небольших приращениях δx. С ростом величины δx численные значения ошибок измерения μ_r и σ увеличиваются. Это связано прежде всего с тем, что в данных случаях проявляется более резкое различие между линейными участками зависимостей $K = f(x)$ и $\varphi_2 = f(x)$, заложенными в принцип работы схемы, и реальными участками этих кривых в окрестностях заданных рабочих точек.

Поскольку приложение механических усилий изменяет значения μ_r и σ незначительно, то применение дифференциального метода, при котором измеряются не значения μ_r и σ, а их приращения, позволяет повысить чувствительность преобразователей и расширить их функциональные возможности.

Список литературы: 1. *Клюев В.В.* Неразрушающий контроль и диагностика / *В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин*. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. **2.** Электромагнитный преобразователь момента, скручивающего вал электропривода / *Себко В.П., Горкунов Б.М., Христов Х.И.* и др. // Проблемы автоматизированного электропривода: труды междунар. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Алушта, 1994.– С.160. **3.** *Горкунов Б.М.* Электромагнитный преобразователь для контроля напряженно-деформированного состояния узлов оборудования электропривода / *Б.М. Горкунов, А.В. Кипенский, С.Г. Львов* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/19. – С.182 –185. **4.** *Бида Г.В.* Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). Контроль прочностных и пластических свойств / *Г.В. Бида* // Дефектоскопия. –2005. –№5. –С.39–53. **5.** *Горкунов Б.М.* Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / *Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа* // Вестник НТУ «ХПИ».– 2004. – №5. – С. 93-99. **6.** *Себко В.П.* Дифференциальный двухпараметровый электромагнитный преобразователь / *В.П. Себко, Ду Хиан Янг* // Вестник НТУ «ХПИ». – 1999. – №24. – С. 78-84.

Bibliography (transliterated): 1. Kljuev, V.V. *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika*. Moskow: Mashinostroenie, 1995. Print. **2.** Sebko, V.P., B.M. Gorkunov and H.I. Hristov. « Elektromagnitnyiy preobrazovatel momenta, skruchivayuschego val elektroprivoda.» *Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda*. 1994. pp. 160. Print. **3.** Gorkunov, B.M., A.V. Kipenskiy and S.G. Lvov. « Elektromagnitnyiy preobrazovatel dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzlov oborudovaniya elektroprivoda.» *ElektromehanIchnI I energozberIgayuchI sistemi. Ser.: Problemyi avtomatizirovannogo elektroprivoda*. No. 3.19. 2012. 182–185. Print. **4.** Bida, G.V. « Nerazrushayuschiy kontrol mehanicheskih svoystv stalnogo prokata (obzor). Kontrol prochnostnyih i plasticheskih svoystv.» *Defektoskopiya*. No. 5. 2005. 39–53. Print. **5.** Gorkunov, B.M. and I.V. Tyupa. «Vihretokovyiy dvuhparametrovyiy kontrol ferromagnitnyih tsilindricheskih izdeliy.» *Vestnik NTU «HPI»*. No. 5. 2004. 93–99. Print. **6.** Sebko, V.P. and Du Hian Yang. «Differentsialnyiy dvuhparametrovyiy elektromagnitnyiy preobrazovatel.» *Vestnik NTU «HPI»*. No. 24. 1999. 78–84. Print.

Поступила (received) 03.07.2015

УДК 621.311

О. Г. ГРИБ, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автоматизация энергосистем», НТУ «ХПИ»;
Д. А. ГАПОН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Ю. А. СИРОТИН, д-р техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Т. С. ИЕРУСАЛИМОВА, ассистент НТУ «ХПИ»;
А.В. ДЯЧЕНКО, аспирант НТУ «ХПИ».

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Вступление. Электрическая энергия используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует в создании других видов продукции, влияя на их качество. Каждый электроприемник (ЭП) предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальной частоте, напряжении и т. п., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое качество электрической энергии (КЭ). Поэтому к качеству электрической энергии предъявляются повышенные требования. На сегодняшний день в Украине показатели качества электрической энергии регламентируются межгосударственными стандартами ГОСТ 13109 – 97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1-2] и ДСТУ EN – 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Методика определения показателей качества напряжения описана в группе стандартов EN 61000-4.

Анализ последних достижений и литературы. На сегодняшний день в системах электроснабжения страны и за рубежом используются и постоянно вводятся в эксплуатацию устройства, предназначенные для контроля КЭ. Эти устройства имеют различное назначение, отличаются по классу точности, составу и количеству выполняемых функций. Общим является то, что они производят измерения заданного набора показателей качества электрической энергии (ПКЭ). В большинстве случаев использование результатов измерений имеет информативный характер. В первую очередь это обусловлено несовершенством нормативно-правовой базы. Кроме того, существующие методики, обычно, используют полученную информацию для того, чтобы зафиксировать факт нарушения требований по одному или нескольким ПКЭ но не позволяют определить ответственного за возникновение данного нарушения.

В работе приборов и перспективных разработках, предназначенных для контроля ПКЭ, используется широкий спектр алгоритмов для выполнения оценки качества электрической энергии. Наиболее распространенными алгоритмами являются: дискретное преобразование Фурье, вычисление среднеквадратических значений, адаптивные фильтры, Вейвлет преобразование, Stockwell-преобразование. Существенным недостатком большинства указанных методов является то, что они не способны корректно учитывать те или иные искажения входного сигнала, что может негативно отразиться на точности измерения и работоспособности устройства при возникновении различных переходных процессов.

В настоящее время представлен большой выбор выпускаемых серийно устройств, предназначенных для контроля качества электрической энергии, в которых реализованы вышеописанные алгоритмы. Рассмотрим более подробно серийные приборы для контроля ПКЭ: микропроцессорный регистратор напряжения и тока ПАРМА РК 6.05; анализатор показателей качества электрической энергии АПКЭ-1; измерительный многофункциональный переносной прибор - ППКЭ-1-50.М; переносной анализатор ЭРИС - КЭ.02; прибор для измерения электроэнергетических величин и ПКЭ - Энергомонитор 3.3.; Ресурс UF2, UF2C-измеряют параметры тока, мощности, энергии, представляют данные для анализа качества электроэнергии, регистрируют переходные процессы; Ресурс UF2M – мобильный анализатор с токовыми клещами – измеряет все показатели качества, токовые клещи на 5А, 100А, 1000А, 3000А. Определяет погрешность счетчиков электроэнергии; Ресурс ПКЭ - стационарный анализатор качества э/энергии; Мультиметр Ресурс-ПЭ5 (однофазный) и Ресурс-МТ(3-х фазный); Ресурс-Е4 - счетчик электроэнергии вместе с измерителем показателей качества электроэнергии; Калибраторы переменного тока Ресурс-К2; К2М, К3; АИИС КУЭ Ресурс.

Цель статьи. Разработка перспективной системы мониторинга качества электрической энергии по фидерам цифровой подстанции на базе распределенной системы.

Постановка проблемы. Для качественной реализации определения ответственности за ухудшение качества электрической энергии мониторинг на цифровых подстанциях должен осуществляться одновременно как по вводу, так и по отходящим фидерам. Для решения этой проблемы была разработана распределенная системы контроля показателей качества электрической энергии.

Материалы исследований. Учеными и аспирантами кафедры автоматизации энергосистем НТУ «ХПИ» в течение значительного времени велись работы по разработке и совершенствованию анализаторов режимов электрических сетей и измерителей ПКЭ с целью совершенствования средств мониторинга качества электрической энергии [3-6].

Так, сотрудниками НТУ «ХПИ», был разработан анализатор напряжения и токов в электрических сетях, АНТЭС – АК 3Ф, который позволяет контролировать 64 параметра электрической сети, включая все показатели качества электрической энергии и электропотребления. Но недостатком этого прибора, является то, что он

© О.Г. Гриб, Д.А. Гапон, Ю.А. Сиротин, Т.С. Иерусалимова, А.В. Дяченко, 2015

может контролировать показатели качества электрической энергии только в одной точке измерения. Более перспективным направлением является разработка приборов, которые позволяют контролировать множество измерительных точек на подстанции, то есть осуществлять распределенный мониторинг.

Предложена распределенная система мониторинга ПКЭ построенная на базе сети Ethernet, т.к. такое решение позволяет обеспечить необходимую пропускную способность для сбора информации из нескольких удаленных источников в реальном масштабе времени и, при этом, требует минимального количества уникального узкоспециализированного оборудования. Структура системы показана на рис.1.

Объем данных, пересылаемых от одного устройства дискретизации не превышает 5 Мбит/с. Это означает, что интерфейс 100BASE-TX позволяет обслуживать одновременно до 20 таких дискретизаторов. Кроме того, использование стандарта Ethernet позволяет применять в составе системы стандартное оборудование, в частности - маршрутизаторов. Между такими маршрутизаторами может быть использован оптический канал, благодаря чему дальность передачи данных может достигать 2 км на один сегмент. При применении проводных соединений стандартным ограничением является дальность 100м. Наиболее сложным вопросом при организации такой системы является синхронизации включенных в нее устройств [7]. Наличие рассогласования между устройствами не позволяет максимально эффективно проводит анализ событий приводящих к ухудшению качества ЭЭ.

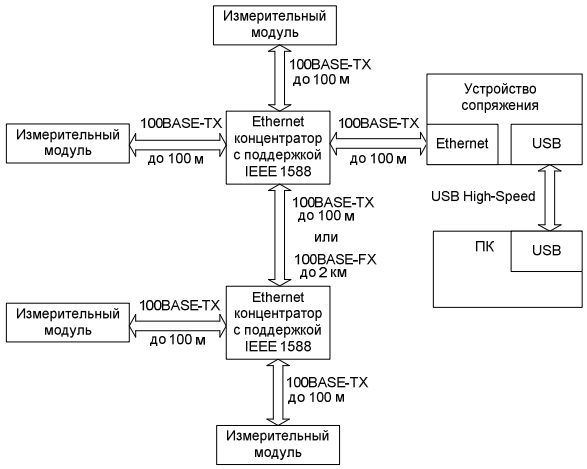


Рис. 1 Структура распределенной системы мониторинга ПКЭ

Синхронизация устройств осуществляется согласно стандарту IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP). Существует 2 версии стандарта [8]. Разработка первой версии была закончена в 2002 году, затем стандарт был доработан и в 2008 году вышла вторая ревизия. Современные микроконтроллеры, например семейства STM32, оснащены интерфейсом Ethernet и поддерживают работу с указанным протоколом на аппаратном уровне. Точность синхронизации в этом случае, теоретически, достигает десятков наносекунд.

Ошибки синхронизации возникают вследствие того, что частота тактовых генераторов в устройствах отличается и вероятность того, что два разных устройства будут работать синфазно, крайне мала. Кроме того, на частоту работы генераторов также влияет температура окружающей среды.

Возможна исключительно программная реализация синхронизации, однако она не позволит добиться максимальной точности. Время, прошедшее с момента получения сообщения (точнее получения сигнала на прием сообщения в устройстве) до перехода на точку входа в прерывание или на заданную функцию не может быть строго определенным. Устройства с аппаратной поддержкой PTP проставляют так называемые таймштампы в моменты приема или передачи сообщений, что позволяет точно определить моменты отправки и получения независимо от степени загрузки процессора устройства.

PTP является клиент-серверным протоколом синхронизации, т.е. для реализации протокола требуется как минимум 2 устройства. В качестве ведущего устройства в системе регистрации ПКЭ выступает устройство сопряжения, а в качестве ведомых устройств – концентраторы и устройства дискретизации, которые должны работать синхронно. Возможны два основных режима работы протокола End-to-end и Peer-to-peer. Так как в системе регистрации ПКЭ, как правило, количество узлов невелико, то наиболее целесообразным является режим End-to-end.

Процесс синхронизации в режиме End-to-end показан на рис. 2 и состоит из нескольких этапов.

Ведущим устройством отправляются сообщения Sync, Follow Up, и DelayResp. Запросы ведомых устройств обозначены как DelayReq.

Отправка сообщений Sync и Follow Up ведущим устройством осуществляется на групповые адреса, строго определенные в стандарте (01-1B-19-00-00-00). Пакеты отличаются полями ClockIdentity (идентификатор часов) и SequenceId (идентификатор пакета).

Существует одно- и двухэтапные режимы работы.

На первом шаге ведущее устройство отправляет сообщение Sync и одновременно записывает время отправки t_1.

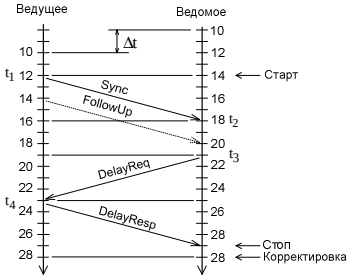


Рис. 2 Процесс синхронизации по протоколу PTP

При наличии сообщения FollowUp – имеет место двухэтапная реализация, пунктирной стрелкой показано необязательное сообщение. FollowUp сообщение отправляется вслед за Sync и содержит время t_1. Если осуществляется передача в один этап, то Sync содержит t_1 в теле сообщения. В любом случае t_1 будет получено ведомыми устройствами. В момент получения сообщения Sync на ведомом устройстве генерируется таймпштамп t_2. Таким образом, каждым ведомым устройством запоминаются значения t_1 и t_2.

Далее каждое ведомое устройство генерирует сообщение DelayReq одновременно с запоминанием t_3. Ведущее устройство при получении DelayReq сообщения генерирует t_4 и отправляет его ведомому устройству в в DelayResp сообщении.

Каждое ведомое устройство осуществляет вычисление расхождения часов и их коррекцию из соотношений:

$$t_2 = t_1 + t_{\text{смещения}} + t_{\text{доставки}} \quad (1)$$

$$t_4 = t_3 - t_{\text{смещения}} + t_{\text{доставки}} \quad (2)$$

откуда:

$$t_{\text{смещения}} = \frac{(t_2 - t_4) - (t_1 - t_3)}{2} \quad (3)$$

$$t_{\text{доставки}} = \frac{(t_2 + t_4) - (t_1 + t_3)}{2} \quad (4)$$

С помощью рассмотренного сеанса обмена, можно добиться синхронности устройств, если частоты их тактовых генераторов идеально совпадают [9]. На практике же частота часов устройств отличается, т.е. на одном устройстве за 1 секунду значение часов увеличится, например, на 1 секунду, а на другом - на 1.000001 секунду.

Таким образом, с течением времени синхронизация устройств будет нарушаться. Для устранения этого недостатка указанную процедуру необходимо повторять постоянно, с небольшими интервалами либо выполнять коррекцию скорости хода часов ведомых устройств.

В стандарте предусмотрена процедура вычисления отношения времени, прошедшего на ведущем и ведомом устройствах за определенный интервал (рис. 3).

После выполнения обмена, вычисление коэффициента корректировки производится по формуле

$$k = \frac{(t_{1,n} - t_{1,0})}{(t_{2,n} - t_{2,0})} \quad (5)$$

Такой алгоритм применим при условии, что интервал между процедурами синхронизации многократно превышает время доставки.

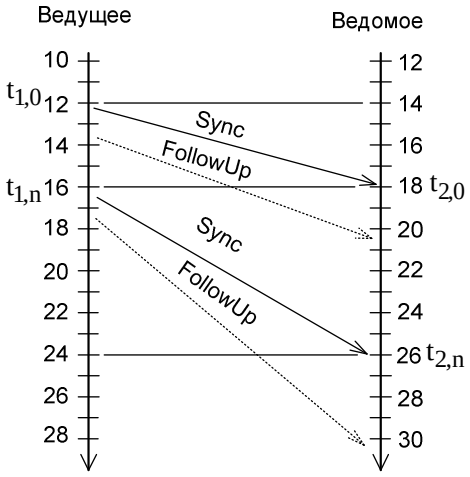


Рис. 3 Процедура определения отношения скоростей часов

Результаты исследований. Ниже приведены результаты исследования качества электрической энергии в энергосистеме. Высшие гармоники характеризуются коэффициентом n-ой гармонической составляющей. Коэффициент n-ой гармонической составляющей выходит за границы нормально и предельно допустимых значений, что отрицательно сказывается на работе электрооборудования [10-12].

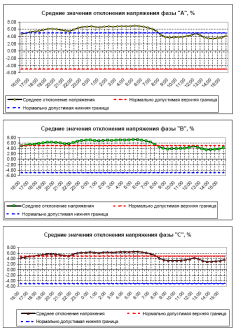


Рис. 4 Установившееся отклонение напряжения по фазам «А», «В», «С»

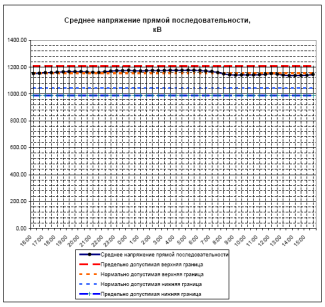


Рис. 5 Установившееся отклонение напряжение прямой последовательности

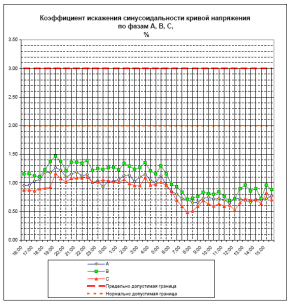


Рис. 6 Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения

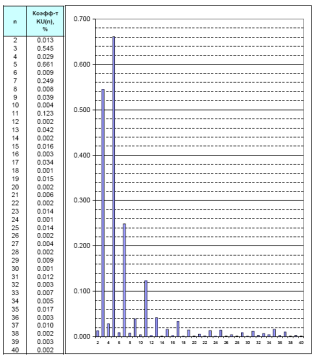


Рис. 7 График коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения в фазе «А»

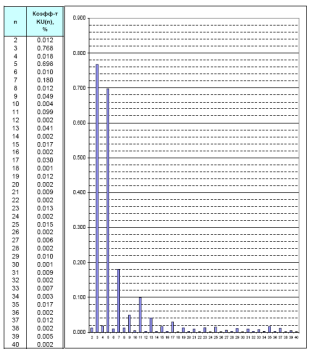


Рис. 8 График коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения в фазе «В»

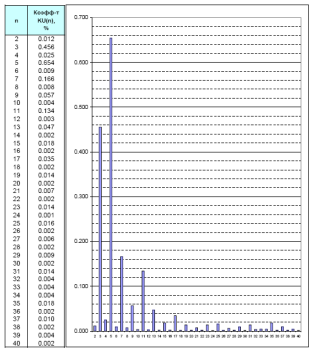


Рис. 9 График коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения в фазе «С»

Выводы. Преимуществом разработанной распределенной системы контроля качества электрической энергии, является то, что все замеры на цифровой подстанции синхронизированы во времени, поэтому такая система позволяет с высокой точностью выделять источник искажений и ответственного за нарушение норм качества. Экспериментальные исследования показали, что качество электроэнергии на одном из присоединений (установившееся отклонение напряжения прямой последовательности основной частоты, установившееся отклонение напряжения, коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения) за 24 ч не соответствует нормам ГОСТ 13109-97 и ДСТУ EN – 50160:2014.

Список литературы: 1.Качество электрической энергии Том 1 «Экономико-правовая база Качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе» / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП « Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-300 с. **2.** Качество электрической энергии Том 2 Контроль качества электрической энергии / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП « Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-244 с. **3.** *Васильченко В.И., Виноградов А.А., Гриб О.Г.*, и др.. Современные приборы учета электрической энергии. – Белгород: Изд-во БГТУ; Харьков: ХНАГХ, 2008. – 139 с. **4.** *С. Гамазин, В. Пупин, О. Ивкин*. Новые устройства обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии потребителей. / Рынок электротехники. – 2006. – № 2. **5.** В. Тубинис. Как выбрать электросчетчик. / Новости электротехники. – 2005. – № 5. **6.**Коррекция коэффициента мощности в электросетях Перу. / Компоненты Epcos AG. – 2006. – № 1. **7.** A Power Quality Monitoring System over the Internet // Ming Zhang ; Kaicheng Li Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on DOI: 10.1109/ICISE.2009.136 Publication Year: 2009 , Page(s): 1577 – 1580. **8.** Reference grade calibrator for the testing of the dynamic behavior of phasor measurement units // Braun, J. ; Mester, C. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012 Conference on DOI: 10.1109/CPEM.2012.6250977 Publication Year: 2012 , Page(s): 410 – 411.**9.** Embedding Synchronized Measurement Technology for Smart Grid Development // Moreno-Munoz, A. ; Pallares-Lopez, V. ; Gonzalez de la Rosa, J.J. ; Real-Calvo, R. ; Gonzalez-Redondo, M. ; Moreno-Garcia, I.M. Industrial Informatics, IEEE Transactions on Volume: 9 , Issue: 1 DOI: 10.1109/TII.2012.2209659 Publication Year: 2013 , Page(s): 52 – 61. **10.** *Кучинский Г.С.* Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов / *Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь;* под общ. ред. *Г.С. Кучинского. - М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.* **11.** *Техника высоких напряжений /. под общей ред. Д.В. Разевига. - изд. 2-е, перераб. и доп. - М. :Энергия, 1976. – 488с.* **12.**ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.

Bibliography(translation): 1. The quality of electric power Volume 1 «Legal and Economic framework of Quality of electric energy in Ukraine and the European Union» / edited by Gryb O. / Monograph PP "Graf-X". Kharkiv: 2014.-300 p. **2.** The quality of electric power Volume 2 «Monitoring of power quality» / edited by Gryb O. / Monograph PP " Graf-X". Kharkiv: 2014.-244 p. **3.** Vasilchenko V. I., Vinogradov A. A., Gryb O. G., et al. Modern metering devices of electric energy. – Belgorod: Publishing house of the University; Kharkiv: kname, 2008. – 139 p. **4.** S. Gamazin, V. Pupin, A. Ivkin. New devices ensure reliability of supply and quality of electricity consumers. / Electrical engineering market. – 2006. – № 2. **5.** V. Tubinis. How to choose the meter. / Electrical engineering news. – 2005. – № 5. **6.** The power factor correction in electrical networks Peru. / Components Epcos AG. – 2006. – No. 1. **7.** A Power Quality Monitoring System over the Internet // Ming Zhang ; Kaicheng Li Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on DOI: 10.1109/ICISE.2009.136 Publication Year: 2009 , Page(s): 1577 – 1580. **8.** Reference grade calibrator for the testing of the dynamic behavior of phasor measurement units // Braun, J. ; Mester, C. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012 Conference on DOI: 10.1109/CPEM.2012.6250977 Publication Year: 2012 , Page(s): 410 – 411.**9.** Embedding Synchronized Measurement Technology for Smart Grid Development // Moreno-Munoz, A. ; Pallares-Lopez, V. ; Gonzalez de la Rosa, J.J. ; Real-Calvo, R. ; Gonzalez-Redondo, M. ; Moreno-Garcia, I.M. Industrial Informatics, IEEE Transactions on Volume: 9 , Issue: 1 DOI: 10.1109/TII.2012.2209659 Publication Year: 2013 , Page(s): 52 – 61. **10.** Kuchinsky G. S. Insulation systems of high voltage: a Textbook for universities / G. S. Kuchinsky, V. E. Kiesewetter, J. S. Pental; ed. by G. C. Kuczynski. - M. : Energoatomizdat, 1987. – 368 p. **11.** High voltage equipment /. under the General editorship of D. V. Razevig. - ed. 2nd, revised and enlarged extra - M. :Energy, 1976. – S. **12.**GOST 13109-97. The electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Norms of quality of electric energy in power supply systems of General purpose. — Minsk.: IPK Publishing house of standards. — 1998. 30 s.

Поступила (кусушмув) 10.07.2015

УДК 621.341.572

С. М. ЛЕВИЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. ВНТУ;
Д. П. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук, доц. ВНТУ;
А. А. БАРТЕЦЬКИЙ, асп. ВНТУ

СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Вступ. Контроль стану та діагностика окремих елементів регульованих електроприводів змінного струму необхідні в більшій чи меншій мірі залежно від їх застосування. Діагностика допомагає запобігти незапланованому простою обладнання, організувати роботу обладнання в аварійному режимі на випадок несправності, зменшити час та затрати відновлення роботи електроприводу [1]. Автономні інвертори напруги на шинах постійного струму мають електролітичні конденсатори, призначені для фільтрування пульсуючих струмів та стабілізації напруги на вході інвертора. Конденсатори мають обмежений термін експлуатації, який часто менший, ніж у силових напівпровідників. У випадках виходу з ладу конденсатора перетворювач частоти найчастіше відключається через недостатнє згладжування напруги на шині постійного струму для проведення профілактичного обслуговування і запобігання поломки силових елементів інвертора.

Аналіз попередніх досліджень. В роботах [2, 3] надається оцінка факторів, які впливають на термін експлуатації електролітичних конденсаторів, а також види пошкодження конденсаторів і їх взаємозв'язок з оцінюваними факторами (робочою напругою, частотою та амплітудою пульсуючих струмів, температурою). Наведені в цих роботах результати досліджень важливі, їх потрібно застосовувати при розробці систем діагностування не лише окремо взятих конденсаторів, але і комплектних пристроїв, до складу яких вони входять. Одним з найважливіших застосувань таких конденсаторів є перетворювачі частоти регульованих електроприводів. Діагностування в темпі процесу такої ланки як шина постійного струму перетворювача частоти, а конденсатор є одним з її основних елементів, розглядається в роботі [1]. Однак в запропонованій моделі відсутня можливість відстроювання від короткочасних нестійких впливів динамічних режимів роботи електроприводу на ланку постійного струму і конденсатор, що може призводити до прийняття хибних рішень першого та другого роду системою діагностування.

Мета роботи. Розробка математичної моделі та структури системи діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти з автономним інвертором напруги яка враховує фактичний термін напрацювання на відмову конденсатора, динамічні збурення з боку електропривода та мережі та дозволяє вчасно виявляти критичний стан робочого конденсатора.

Матеріал і результати дослідження. Електролітичні конденсатори, які використовуються в складі автономних інверторів напруги перетворювачів частоти регульованих електроприводів володіють відповідним терміном напрацювання на відмову в роботі (англ. *Lifetime*), який при розробці системи діагностування являється визначальним, оскільки є функціоналом багатьох критеріїв експлуатації перетворювачів частоти.

В загальному випадку фактичний термін напрацювання L_f на відмову визначається за паспортним терміном напрацювання на відмову L_n та експлуатаційним коефіцієнтом k [3]

$$L_f = L_n \cdot k. \tag{1}$$

Час напрацювання конденсатора, який відповідає поточному ресурсу може бути визначеним, виходячи з (1) як різниця між паспортним терміном напрацювання та фактичним

$$t = L_n - L_f = L_n \cdot (1 - k). \tag{2}$$

Імовірність безвідмовної роботи електронної апаратури визначається, виходячи з відомої інтенсивності відмов λ, що найчастіше має постійне значення ($\lambda = const$)[4]

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \tag{3}$$

Відповідно, імовірність виникнення відмови в процесі роботи конденсатора на момент часу t визначатиметься

$$N(t) = 1 - P(t). \tag{4}$$

Отже, функція залежності імовірності виникнення відмови $N(t)$ від експлуатаційного коефіцієнту, яка отримана шляхом підстановки рівняння (2) в вираз (4) з відповідним перетворенням t через k, матиме вигляд симетричної експоненти (рис. 1).

$$N(k) = 1 - e^{(-\lambda \cdot L_n \cdot (1-k))}. \tag{5}$$

Слід зауважити, що більшому значенню імовірності виникнення відмови відповідає і більша кількість конденсаторів, яка вийшла з ладу при досягненні відповідного значення експлуатаційного коефіцієнта. Тому в процесі розробки структури системи діагностування в якості основного діагностичного параметру буде розглядатись саме експлуатаційний коефіцієнт k.

© С. М. Левицький, Д. П. Проценко, А. А. Бартецький, 2015

Експлуатаційний коефіцієнт враховує вплив трьох вагових коефіцієнтів на фактичний термін напрацювання: температури, пульсуючого (випрямленого) струму та робочої напруги та визначається їхнім добутком [5]

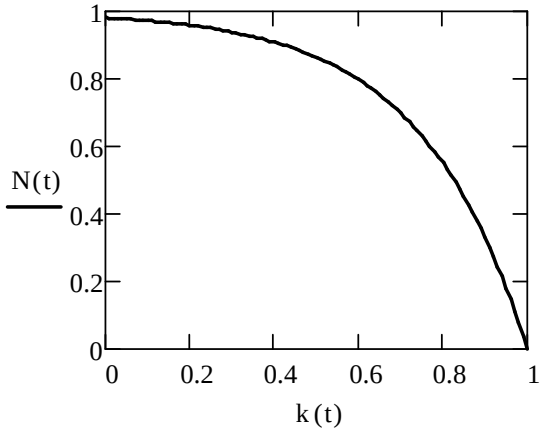


Рис. 1 Залежність імовірності виникнення відмови конденсатора від експлуатаційного коефіцієнта

$$k = k_t \cdot k_r \cdot k_v. \quad (6)$$

Температурний ваговий коефіцієнт зазвичай визначається за правилом «10 Кельвінів»: зниження температури оточуючого середовища на 10 К приводить до збільшення терміну експлуатації вдвічі. Температурний коефіцієнт розраховується за формулою [6]

$$k_t = 2^{\frac{T_o - T_a}{10}}, \quad (7)$$

де T_o – максимально допустима температура експлуатації, T_a – фактична температура роботи конденсатора.

Ваговий коефіцієнт k_r враховує вплив пульсуючого струму, що отриманий після випрямлення на мостовій схемі випрямляча перетворювача частоти. На величину пульсуючого струму впливає також режим роботи електроприводу та інвертора (розгін, гальмування, динамічна зміна навантаження тощо). Внаслідок зміни амплітуди пульсуючого струму змінюватимуться і втрати потужності в конденсаторі $I^2 \cdot ESR$ (*equivalent series resistance* – еквівалентний послідовний опір конденсатора в колі змінного струму), зміна втрат потужності також впливатиме на тепловий режим конденсатора. *ESR* конденсаторів залежить від частоти пульсуючого струму та робочої температури. В роботі приймемо значення частоти пульсуючого струму рівним 300 Гц, що відповідає частоті пульсацій випрямленої напруги в схемі Міткевича, така частота пульсацій практично не приводить до відхилення *ESR* відносно його номінального значення, що встановлюється при частоті 100-120 Гц [5]. В [3] запропоновано для розрахунку вагового коефіцієнту пульсуючого струму використати емпіричну залежність, яку можна виразити за допомогою рівняння (8)

$$k_r = \begin{cases} 4\exp\left(\left(1 - \frac{I_a}{I_o}\right) \cdot \frac{T_o - T_a}{10}\right), \ якщо \ T_a > 85°C, \ I_a > I_o; \\ 2\exp\left(\left(1 - \frac{I_a}{I_o}\right) \cdot \frac{T_o - T_a}{10}\right), \ якщо \ T_a \le 85°C, I_a \le I_o; \end{cases}, \quad (8)$$

де I_a – фактичний пульсуючий струм конденсатора, I_o – номінальний пульсуючий струм конденсатора для промислової частоти.

Вплив робочої напруги на конденсаторі перетворювача частоти враховується окремим ваговим коефіцієнтом k_v. Відхилення робочої напруги ланки постійного струму перетворювачів частоти від номінальної відбувається внаслідок коливань напруги мережі живлення, перехідних процесів електроприводу (розгін – пониження напруги, гальмування – перенапруга). Для визначення k_v виробниками електронної апаратури рекомендується рівняння, яке отримане за статистичними даними випробувань конденсаторів при експлуатації на різних робочих напругах [5]

$$k_v = \begin{cases} \left(\frac{U_a}{U_o}\right)^3, \ якщо \ \frac{U_a}{U_o} \in [0{,}5; 0{,}8); \\ \left(\frac{U_a}{U_o}\right)^5, \ якщо \ \frac{U_a}{U_o} \in [0{,}8; 1{,}5); \end{cases}, \quad (9)$$

де U_a – робоча напруга конденсатора перетворювача частоти, U_o – номінальна напруга кондесатора.

Отже, для встановлення експлуатаційного коефіцієнту k та визначення ступеня його наближення до несправного стану слід вимірювати наступні параметри: температуру конденсатора, миттєве значення струму конденсатора та напругу на його виводах (рис. 2). За вказаними параметрами слід по рівняннях (7-9) визначити вагові коефіцієнти, а за рівнянням (6) обчислити ваговий коефіцієнт.

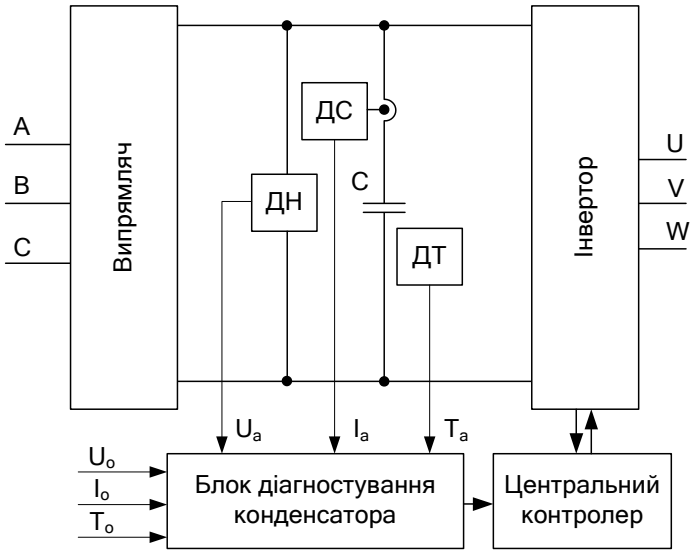


Рис. 2 – Структурна схема системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти

В схемі на рис. 2 ДС – датчик струму I_a, ДН – датчик напруги U_a, ДТ – датчик температури T_a. Номінальні експлуатаційні параметри U_o, I_o, T_o задаються в мікропроцесорному блокові діагностування відповідними константами.

За обчисленим в реальному часі значенням вагового коефіцієнту згідно виразу (5) встановлюється імовірність його виходу з ладу, що за умови досягнення критичного значення $N(t)$ слід вважати за попередження про необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та заміну конденсатора. Вчасно виконаний запобіжний ремонт дозволить уникнути пошкоджень під час роботи електроприводу, простоїв обладнання, аварій, нещасних випадків залежно від механізму, який приводиться в дію електроприводом.

Нехай критичним значенням імовірності виходу з ладу конденсатора є $N_к$ = 0,5. За залежністю (5) (рис. 3) встановлюється відповідне значення експлуатаційного коефіцієнту k, яке відповідає попереджувальному рівню про можливість швидкого виходу з ладу конденсатора.

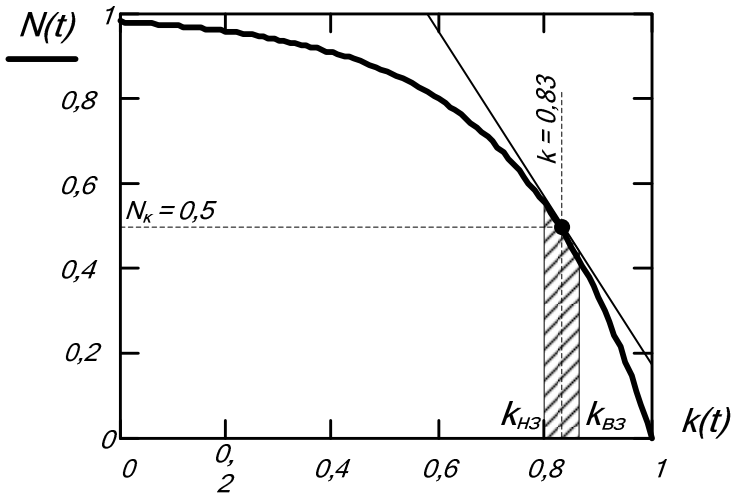


Рис. 3 – Визначення критичного значення експлуатаційного коефіцієнту

Для уникнення хибного висновку системи діагностування виділяється зона нечутливості навколо критичного значення експлуатаційного коефіцієнту (заштрихована область на рис. 3). Зона нечутливості обмежується граничними значеннями: верхнім $k_{вз}$ та нижнім $k_{нз}$. Для визначення меж зони нечутливості використовується геометрична побудова – до залежності $N(k)$ будується дотична в точці, що відповідає критичному значенню $N_к$. Область прилягання дотичної до функції $N(k)$, де їх різниця за модулем не перевищує 5% можна вважати і допустимою зоною нечутливості.

Висновок щодо можливості подальшої експлуатації перетворювача частоти з діагностованим конденсатором доцільно формувати не миттєво при виході експлуатаційного коефіцієнта *k* за зону нечутливості, але слід враховувати і часовий фактор. Наприклад, змінний, динамічний характер навантаження електроприводу може обумовити лише короткочасний вихід коефіцієнту *k* за зону нечутливості, а його повернення призведе до прийняття системою діагностування хибного рішення першого роду. Для уникнення описаного варіанту роботи системи розглядається комбінована модель прийняття діагностичного висновку з врахуванням часової затримки та повторного обчислення експлуатаційного коефіцієнту з порівнянням його поточного значення з попереднім. Така модель може бути описана виразом (10).

$$k(t)=2^{\frac{T_o-T_a(t)}{10}}\cdot m^{\left(1-\frac{I_a(t)}{I_o}\right)\frac{T_o-T_a(t)}{10}}\cdot\left(\frac{U_a(t)}{U_o}\right)^n,$$

$$\begin{cases} k(t)<k_{нз}\wedge k(t-\tau)<k_{нз}\wedge\dfrac{dk(t)}{dt}\le 0\rightarrow \textit{несправність};\\ k(t)\in[k_{нз};k_{вз}]\wedge\dfrac{dk(t)}{dt}\le 0\rightarrow \textit{на межі несправності;}\\ k(t)>k_{вз}\vee\left(k(t)\in[k_{нз};k_{вз}]\wedge\dfrac{dk(t)}{dt}>0\right)\rightarrow \textit{справний стан,} \end{cases} \quad (10)$$

де τ – час затримки для формування діагностичного висновку.

Включення похідної по часу експлуатаційного коефіцієнта є обов'язковим та дозволить уникнути прийняття системою діагностування хибних рішень навіть при виході його за допустимі межі (в основному в сторону $k_{нз}$), однак тенденції до повернення його в зону нечутливості, або переходу *k(t)* із зони нечутливості відносно критичного значення в зону справної стійкої роботи з високим *k*. Разом з тим при тривалому і незворотному процесі зниження обчисленого коефіцієнту *k* система повідомить про роботу конденсатора на межі справності, або про його несправність.

Запропонована математична модель (10) закладається в основу програмного забезпечення цифрового сигнального процесора *DSP* (*digital signal processor*), який включається в загальну систему діагностування перетворювача частоти на існуючу шину обміну даними з центральним контролером по підтримуваному ним одному з цифрових протоколів (*CAN*, *I2S* тощо). Таким чином реалізується на апаратно-прорамному рівні система діагностування на рис. 2.

Висновки. Розглянуто вплив параметрів роботи конденсаторів перетворювачів частоти на їх термін напрацювання на відмову, що дозволяє сформулювати математичну модель системи діагностування конденсаторів та її структурну схему.

Розроблено математичну модель системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, яка враховує динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної, що дозволяє уникнути прийняття системою хибних рішень першого роду, вчасно попереджувати обслуговуючий персонал про критичний стан робочого конденсатора, необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та запобігати пошкодженням конденсатора.

Список літератури: 1. *Fuchs Friedrich.* Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines/ *Friedrich W. Fuchs* // University of Kiel, Germany. – IEEE, Industrial Electronics Conference, Roanoke, Virginia, USA, 2002 – 8 p. **2.** *Gasperi M. L.* A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors / *M. L. Gasperi* – Rockwell Automation // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997 – 6 p. **3.** *Albertsen A.* Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation / *Dr. Arne Albertsen* – Jianghai Europe Electronic Components GmbH, 2012 – 13 p. **4.** *Половко А. М.* Основы теории надежности // *А. М. Половко, С. В. Гуров.* – . СПб.: БХВ-Петербург. – 2008. – 704с. **5.** *Радюшкин О.* Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов / *Олег Радюшкин*. – Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 19-22. **6.** *Khandebharad A. R.* Electrolytic capacitor online failure detection and life prediction methodology / *A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande* // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – №2, vol. 4 – P.78-83. – ISSN 2321-7308.

Bibliography (transliterated): 1. Fuchs Friedrich. Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines/ Friedrich W. Fuchs // University of Kiel, Germany. – IEEE, Industrial Electronics Conference, Roanoke, Virginia, USA, 2002 – 8 p. **2.** Gasperi M. L. A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors / M. L. Gasperi – Rockwell Automation // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997 – 6 p. **3.** Albertsen A. Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation / Dr. Arne Albertsen – Jianghai Europe Electronic Components GmbH, 2012 – 13 p. **4.** Polovko A. M., S. V. Gurov. *Osnovy teorii nadezhnosti.* The elements of reliability theory. – . SPb.: BHV-Peterburg. – 2008. – 704 p. Print. **5.** Radiushkin O. *Metody otsenki sroka ekspluatatsii electroliticheskih kondensatorov*. The valuation methods of electrolytic capacitor's lifetime. – *Silovaya electronika*. Power Electronics – 2010. – № 5. – PP. 19-22. Print. **6.** Khandebharad A. R. Electrolytic capacitor online failure detection and life prediction methodology / A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – №2, vol. 4 – P.78-83. – ISSN 2321-7308.

Поступила (received) 03.07.2015

УДК 621.316.9

Д. Г. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, с.н.с., НТУ «ХПИ»;
С. С. РУДЕНКО, асп., м.н.с., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ВИДЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Постановка проблемы

Одной из основных задач первого этапа электромагнитной диагностики состояния заземляющих устройств (ЭМД ЗУ) электроустановок различных классов напряжения является проведение вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) грунта [1]. Точность определения геоэлектрической структуры грунта и учет ее неоднородности в значительной степени влияет на точность определения нормируемых параметров ЗУ, таких как сопротивление ЗУ, напряжение прикосновения и напряжение на ЗУ. В [2] показано, что представление грунта в виде двухслойной модели приводит к погрешности определения сопротивления ЗУ на 30-60%. В [3] установлено, что при эквивалентировании трехслойного грунта двухслойным погрешность определения потенциала на поверхности грунта, что соответствует определению величины напряжения прикосновения, может достигать 80%.

На основании анализа экспериментальных кривых ВЭЗ, а также результатов их интерпретации в [3] было получено статистическое распределение грунтов по числу слоев в местах расположения энергообъектов Украины. Установлено, что абсолютное большинство грунтов в местах размещения электрических станций и подстанций имеет трехслойную структуру (72,7%), однако значительная часть (19%) имеет число слоев более трех (как правило, четыре слоя).

Целью данной работы является разработка математической модели для интерпретации результатов ВЭЗ в виде четырехслойной геоэлектрической структуры.

Материалы исследований

ВЭЗ осуществляется путем инжектирования генератором испытательного тока и измерения падения напряжения на определенном участке поверхности грунта. При этом длина разноса токовых и потенциальных электродов обуславливается типом установки и требуемой глубиной зондирования. Наиболее широкое применение в рамках проведения ЭМД ЗУ получила четырехэлектродная симметричная установка, или т. н. установка Веннера (см. рис.1). К ее достоинствам следует отнести:

– слабая чувствительность к профильным включениям;

– прямая зависимость между разносом электродов и глубиной зондирования;

– достаточно простые выражения для расчета кажущегося удельного электрического сопротивления за счет равенства межэлектродного расстояния между токовыми и потенциальными электродами.

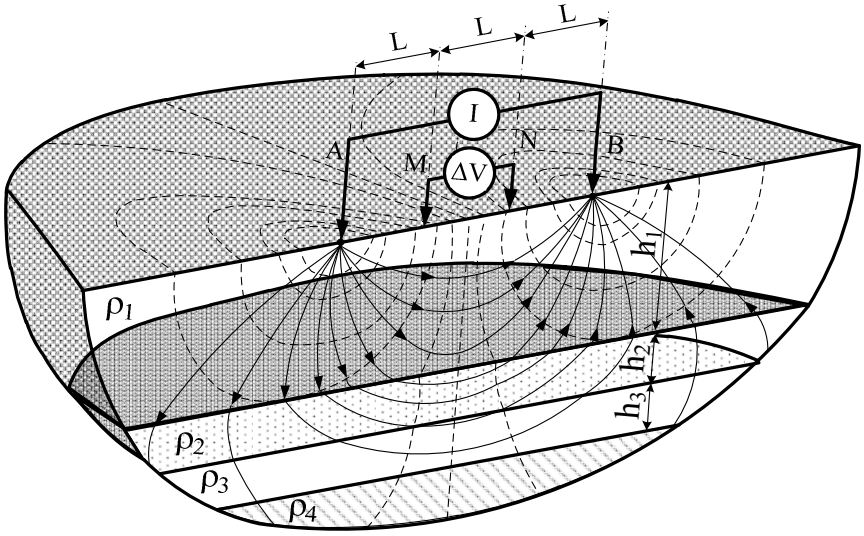


Рис. 1 – Проведение ВЭЗ установкой Веннера

В установке используется питающая цепь, образованная генератором и токовыми электродами *A* и *B*, а также измерительная цепь, образованная вольтметром и потенциальными электродами *M* и *N*. Токовые электроды рассматриваются как два точечных источника тока, а величина кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) равна произведению измеренного сопротивления на геометрический коэффициент установки:

© Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко, 2015

$$\rho_k = \frac{U}{I}\mathrm{k}, \tag{1}$$

где U – падение напряжения на потенциальных электродах M и N (см. рис. 1), I – ток протекающий через токовые электроды A и B, k – геометрический коэффициент установки, который для установки Веннера равен $\mathrm{k} = 2\pi L$.

Глубина зондирования установки Веннера оценивается как расстояние между двумя ближайшими электродами [4] (L на рис. 1), которое выбирается исходя из размеров ЗУ.

Электрофизические характеристики грунта (количество слоев, их удельное сопротивление и мощность) определяют исходя из экспериментальных данных результатов ВЭЗ с использованием различных средств интерпретации: палеток или специальных расчетных программ [3].

В настоящее время известен ряд специализированных компьютерных программ для 1-D, 2-D и 3-D интерпретации ВЭЗ. Основой для их построения является аналитическое или основанное на методе оптической аналогии решение задачи о поле точечного источника тока (ТИТ), расположенного на поверхности геоэлектрической структуры. Однако, математический аппарат и специальные программы, определяющие структуру многослойного грунта на основании данных ВЭЗ, предназначены для решения узконаправленных геологических задач и не адаптированы к применению при ЭМД ЗУ, а использование существующих универсальных палеток является трудоемким и неоднозначным [1]. В рамках же проведения ЭМД ЗУ применяются программы для интерпретации ВЭЗ в виде двух- и трехслойных геоэлектрических структур [5, 6].

Для построения математической модели по интерпретации результатов ВЭЗ четырехслойной моделью следует решить частную задачу о поле ТИТ, который, как и точка наблюдения, расположен в первом слое четырехслойного грунта.

Следует отметить, что в [2] рассмотрена математическая модель ТИТ, расположенного в первом слое четырехслойного грунта. Однако указанная модель требует уточнения в виду отсутствия выражения для определения функции характеризующей многослойную среду (ФМС) и неточности записи самого выражения для определения потенциала ТИТ. Поэтому необходимо решить задачу о поле ТИТ с учетом указанных недостатков.

Пусть ТИТ j расположен в первом слое четырехслойной земли. Сделаем следующие допущения: через границу земли и атмосферы ток не проходит, границы раздела слоев – плоскопараллельные и в пределах каждого из них удельное электрическое сопротивление ρ_i однородно. Электрические сопротивления первого, второго, третьего и четвертого слоев обозначим ρ_1, ρ_2, ρ_3 и ρ_4 соответственно. Глубины границ разделов первого и второго слоев – h_1, второго и третьего – h_2, третьего и четвертого – h_3. Требуется найти электрический потенциал φ в любой точке проводящего полупространства.

Электрическое поле ТИТ в четырехслойной среде обладает осевой симметрией. Поэтому целесообразно применить криволинейную ортогональную цилиндрическую систему координат (r, z, ψ) с осью z, перпендикулярной к границе полупространства и проходящей через точечный источник (см. рис. 2).

Формулировка рассматриваемой задачи состоит из уравнения Лапласа и дополнительных условий. Потенциал не зависит от координаты ψ, поэтому уравнение Лапласа принимает вид [7]:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0\,. \tag{2}$$

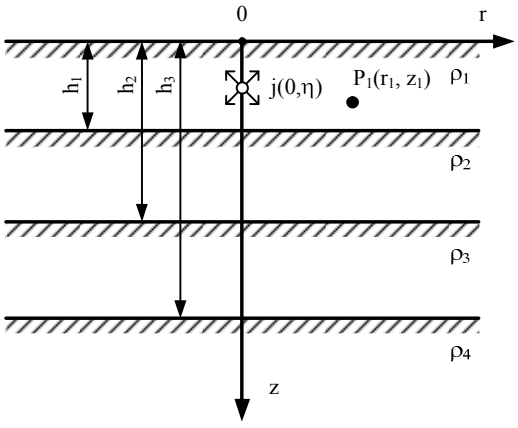


Рис. 2 – Точечный источник тока j, размещенный в первом слое четырехслойной структуры;
$P_1(r_1, z_1)$ – точка наблюдения

Применяя метод Фурье для разделения переменных [7], общее решение (2) представим как интеграл по параметру λ в пределах от нуля до бесконечности:

$$\varphi(r,z)=\int_0^{\infty} J_0(\lambda r)\cdot\left(a_i\,e^{\lambda z}+b_i\,e^{-\lambda z}\right)d\lambda\,, \tag{3}$$

где a_i и b_i – постоянные, определяемые параметрами грунта, координатами ТИТ и точки наблюдения, λ – параметр разделения переменных, J_0 – функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

Если ТИТ и точка наблюдения расположены в k-том слое, то к выражению (3) должна быть добавлена величина потенциала ТИТ в однородном проводящем пространстве φ_0 [7]:

$$\varphi_0=\frac{I\rho_k}{4\pi}\frac{1}{\sqrt{r^2+(z-\eta)^2}}\,, \tag{4}$$

где η – координата ТИТ по оси z.

Вид функции (3) является общим для всех слоев проводящего полупространства. Однако в каждом слое, в зависимости от взаимного расположения ТИТ и точки наблюдения, постоянные принимают свои частные значения. Поэтому, для каждого слоя четырехслойной электрической структуры необходимо определить свои постоянные a_i и b_i.

Для нахождения постоянных a_i и b_i в первом слое воспользуемся дополнительными условиями:

– при неограниченном возрастании координаты z, потенциал φ стремится к нулю, следовательно

$$a_4=0\,; \tag{5}$$

– в соответствии с принципом непрерывности электрического тока, на границе раздела i-того и (i+1)-го слоя нормальные составляющие векторов плотности электрического тока равны между собой:

$$\frac{1}{\rho_i}\frac{\partial\varphi_i}{\partial z}=\frac{1}{\rho_{i+1}}\frac{\partial\varphi_{i+1}}{\partial z}\,; \tag{6}$$

– из условия равенства тангенциальных составляющих вектора напряженности поля на границах смежных слоев, на границе раздела i-того и (i+1)-го потенциалы равны:

$$\varphi_i=\varphi_{i+1}\,; \tag{7}$$

– условие на границе проводящего полупространства имеет вид

$$\left.\frac{\partial\varphi_1}{\partial z}\right|_{z=0}=0\,. \tag{8}$$

Исходя из выражений (5)-(8), составляется система алгебраических линейных уравнений (СЛАУ) 7-го порядка относительно неизвестных коэффициентов a_i и b_i:

$$\begin{cases}
a_1-b_1+\dfrac{I\rho_1}{4\pi}e^{-\lambda\eta}=0;\\
\dfrac{1}{\rho_1}\left(a_1e^{\lambda h_1}-b_1e^{-\lambda h_1}-\dfrac{I\rho_1}{4\pi}e^{-\lambda(h_1-\eta)}\right)=\dfrac{1}{\rho_2}\left(a_2e^{\lambda h_1}-b_2e^{-\lambda h_1}\right);\\
\dfrac{1}{\rho_2}\left(a_2e^{\lambda h_2}-b_2e^{-\lambda h_2}\right)=\dfrac{1}{\rho_3}\left(a_3e^{\lambda h_2}-b_3e^{-\lambda h_2}\right);\\
\dfrac{1}{\rho_3}\left(a_3e^{\lambda h_3}-b_3e^{-\lambda h_3}\right)=-\dfrac{b_4e^{-\lambda h_3}}{\rho_4};\\
a_1e^{\lambda h_1}+b_1e^{-\lambda h_1}+\dfrac{I\rho_1}{4\pi}e^{-\lambda(h_1-\eta)}=a_2e^{\lambda h_1}+b_2e^{-\lambda h_1};\\
a_2e^{\lambda h_2}+b_2e^{-\lambda h_2}=a_3e^{\lambda h_2}+b_3e^{-\lambda h_2};\\
a_3e^{\lambda h_3}+b_3e^{-\lambda h_3}=b_4e^{-\lambda h_3};
\end{cases}$$

После решения СЛАУ полученные значения a_i и b_i подставляются в (2). С помощью преобразования Вебера-Липшица выражение для определения потенциала в первом слое будет иметь вид:

$$\begin{aligned}\varphi_{1,1}(r,z)=\frac{I\rho_1}{4\pi}\Bigg[&\alpha_1+\alpha_2+K_{2,1}\sum_{n=0}^{m}K_n\left(\alpha_3+\alpha_4+\alpha_5+\alpha_6\right)+\\&+K_{3,2}\sum_{n=0}^{m}K_n\left(\alpha_7+\alpha_8+\alpha_9+\alpha_{10}\right)+K_{4,3}\sum_{n=0}^{m}K_n\left(\alpha_{11}+\alpha_{12}+\alpha_{13}+\alpha_{14}\right)\Bigg];\end{aligned} \tag{9}$$

где коэффициенты α_i:

$$\alpha_{1,2}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\mp\eta)^2}};\ \ \alpha_{3,4}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\pm\eta\pm 2h_1\pm H_n)^2}};$$

$$\alpha_{5,6}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\mp\eta\pm 2h_1\pm H_n)^2}};\ \ \alpha_{7,8}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\pm\eta\pm 2h_2\pm H_n)^2}};$$

$$\alpha_{9,10}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\mp\eta\pm 2h_2\pm H_n)^2}};\ \ \alpha_{11,12}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\pm\eta\pm 2h_3\pm H_n)^2}};$$

$$\alpha_{13,14}=\frac{1}{\sqrt{r^2+(z\mp\eta\pm 2h_3\pm H_n)^2}};$$

где $K_{i+1,i}$ – коэффициент неоднородности грунта равный $K_{i+1,i}=\frac{\rho_{i+1}-\rho_i}{\rho_{i+1}+\rho_i}$; K_n и H_n– коэффициенты, полученные в результате разложения функции характеризующей многослойную среду (ФМС); n – номер члена ряда; m – количество членов ряда.

Значение K_n находим из решения СЛАУ на основании метода наименьших квадратов (МНК) [8], при этом $H_n=2\cdot n$:

$$\begin{cases} K_0\cdot N+K_1\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-2\lambda_i}+K_2\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-4\lambda_i}+\ldots+K_m\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-2m\lambda_i}=\sum\limits_{i=1}^{N}F(\lambda)_i; \\ K_0\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-2\lambda_i}+K_1\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-4\lambda_i}+\ldots+K_m\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-2(m+1)\lambda_i}=\sum\limits_{i=1}^{N}F(\lambda)_i\cdot e^{-2\lambda_i}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ K_0\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-2m\lambda_i}+K_1\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-2(m+1)\lambda_i}+\ldots+K_m\cdot\sum\limits_{i=1}^{N}e^{-4m\lambda_i}=\sum\limits_{i=1}^{N}F(\lambda)_i\cdot e^{-2m\lambda_i}, \end{cases}$$

где N – количество расчетных точек, $F(\lambda)=\frac{1}{F_4(\lambda)}$ – ФМС.

В свою очередь знаменатель ФМС имеет следующий вид:

$$F_4(\lambda)=1-K_{2,1}e^{-2\lambda h_1}-K_{3,2}e^{-2\lambda h_2}-K_{4,3}e^{-2\lambda h_3}+K_{2,1}K_{3,2}e^{-2\lambda(h_2-h_1)}+$$
$$+K_{2,1}K_{4,3}e^{-2\lambda(h_3-h_1)}+K_{3,2}K_{4,3}e^{-2\lambda(h_3-h_2)}-K_{2,1}K_{3,2}K_{4,3}e^{-2\lambda(h_3-h_2-h_1)}$$

С учетом того, что при проведении ВЭЗ ТИТ и точка наблюдения располагаются только на поверхности грунта (т.е. $z = 0$ и $\eta = 0$) выражение для потенциала примет вид:

$$\varphi_{1,1}(r,0)=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r}+2K_{2,1}\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{r^2+(2h_1+H_n)^2}}+\right.$$
$$\left.+2K_{3,2}\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{r^2+(2h_2+H_n)^2}}+2K_{4,3}\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{r^2+(2h_3+H_n)^2}}\right] \qquad (10)$$

Таким образом, получено базовое выражение для разработки математической модели интерпретации результатов ВЭЗ в виде четырехслойной геоэлектрической структуры.

Для разработки модели, позволяющей интерпретировать результаты, полученные с помощью установки Веннера, воспользуемся выражением для определения кажущегося УЭС (1), геометрической конфигурацией самой установки (см. рис.1) и выражением для определения потенциала на поверхности грунта (10).

Исходя из принципа суперпозиции, напряжение на потенциальных электродах M и N будет определяться как:

$$U = \varphi_M - \varphi_N = \left(\varphi_{AM}\Big|_{r=L} - \varphi_{BM}\Big|_{r=2L} \right) - \left(\varphi_{AN}\Big|_{r=2L} - \varphi_{BN}\Big|_{r=L} \right), \quad (11)$$

где φ_{AM}, φ_{BM}, φ_{AN}, и φ_{BN} – значения потенциала на электродах M и N, наведенные от токовых электродов A и B соответственно.

Подставляя в (11) выражение для потенциала (10), падение напряжения для установки Веннера будет иметь вид:

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{L} + 4K_{2,1}\left(\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{L^2+(2h_1+h_n)^2}} - \sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{4L^2+(2h_1+h_n)^2}}\right) + \right.$$
$$+ 4K_{3,2}\left(\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{L^2+(2h_2+h_n)^2}} - \sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{4L^2+(2h_2+h_n)^2}}\right) + \quad (12)$$
$$\left. + 4K_{4,3}\left(\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{L^2+(2h_3+h_n)^2}} - \sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{4L^2+(2h_3+h_n)^2}}\right)\right]$$

С учетом (11) и преобразований получим выражение (1) в следующем виде:

$$\rho_k = \rho_1\left[1 + 4K_{2,1}\left(\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{1+\left(\frac{2h_1+h_n}{L}\right)^2}} - \sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{4+\left(\frac{2h_1+h_n}{L}\right)^2}}\right) + \right.$$
$$+ 4K_{3,2}\left(\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{1+\left(\frac{2h_2+h_n}{L}\right)^2}} - \sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{4+\left(\frac{2h_2+h_n}{L}\right)^2}}\right) + \quad (13)$$
$$\left. + 4K_{4,3}\left(\sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{1+\left(\frac{2h_3+h_n}{L}\right)^2}} - \sum_{n=0}^{m}\frac{K_n}{\sqrt{4+\left(\frac{2h_3+h_n}{L}\right)^2}}\right)\right]$$

На основании выражения (13) и с применением МНК для аппроксимации ФМС в Delphi была разработана тестовая программа для интерпретации результатов ВЭЗ в виде четырехслойной геоэлектрической структуры. На рис. 3 показаны результаты интерпретации двух различных наборов экспериментальных значений, полученных при проведении ЭМД ЗУ подстанций ПАО "Сумыоблэнерго".

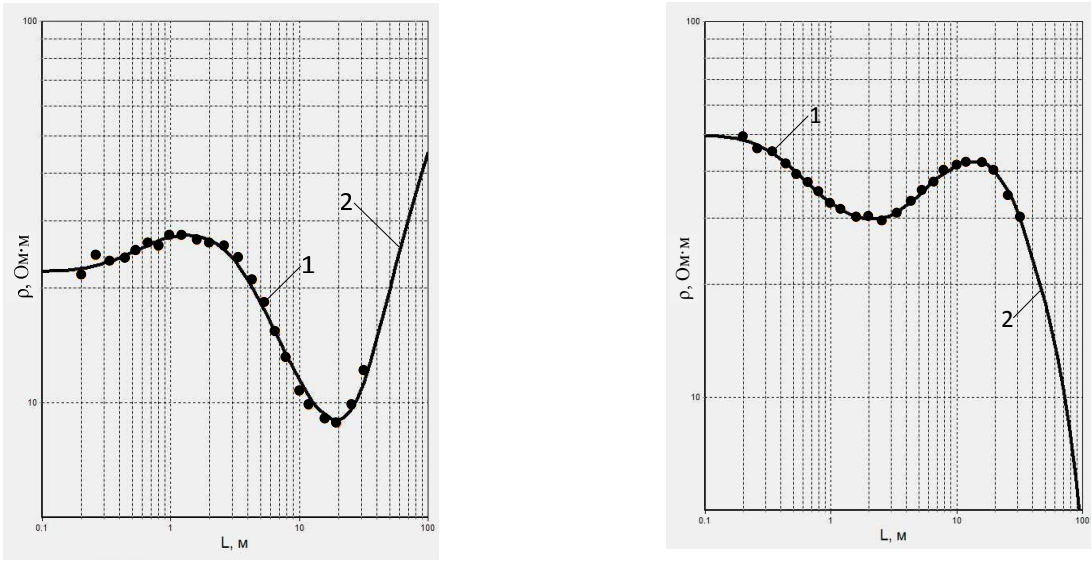
Выводы

1. Получено аналитическое решение задачи о поле точечного источника тока, расположенного в первом слое четырехслойной геоэлектрической структуры, с помощью аппроксимации функции, характеризующей многослойную среду по методу наименьших квадратов.

2. Разработана математическая модель для интерпретации результатов ВЭЗ в виде четырехслойной геоэлектрической структуры.

3. На основе математической модели разработана тестовая компьютерная программа для интерпретации результатов зондирования грунта в интерактивном режиме.

Разработанная математическая модель и программное обеспечение позволят повысить точность определения нормируемых параметров, таких как сопротивление ЗУ, напряжение прикосновения и напряжение на ЗУ, в рамках проведения электромагнитной диагностики состояния заземляющих устройств действующих электрических станций и подстанций.



а б

Рис.3 – Интерпретация результатов ВЭЗ в виде четырехслойного грунта:
1 – экспериментальные точки, 2 – кривые, построенные с использованием математической модели

Список литературы: 1. *Колиушко Г.М.* К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок / *Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С.* // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 65-70. **2.** *Максименко Н.Н.* Заземляющие устройства в многолетнемерзлых грунтах / *Н.Н. Максименко.* – Норильск: НГМК, 1974. – 503 с. **3.** *Колиушко Д.Г.* Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины / *Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М.* // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 67 – 72. **4.** *Кострyба С. И.* Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств / *Кострyба С. И.* – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 168 с. **5.** *Руденко С.С.* А. с., Україна. Компьютерная программа интерпретации результатов вертикального электрического зондирования «ВЭЗ-3» / *Руденко С.С., Коліушко Д.Г.* – № 47198 від 14.01.2013. **6.** *Руденко С.С.* А. с., Україна. Компьютерная программа автоматической интерпретации результатов вертикального электрического зондирования «ВЭЗ-2- Авто» / *Руденко С.С., Коліушко Д.Г.* – № 47469 від 28.01.2013. **7.** *Бургсдорф В.В.* Заземляющие устройства электроустановок / *В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс.* – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с. **8.** *Колиушко Д.Г.*Аппроксимация функции, характеризующей трехслойную модель грунта, методом наименьших квадратов / *Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут "Техніка та електрофізика високих напруг" – 2011. – № 16. – С. 126-132.

Bibliography (transliterated): 1. Koliushko G.M.,Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014 no.4, pp. 65-70. **2.** Maksimenko N.N. *Zazemlyayuschie ustroystva v mnogoletnemerzlyih gruntah. Norilsk: NGMK*, 1974. 503 p. **3.** Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015 no.3, pp. 67-72. **4.** Kostruba S. I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchikh ustroistv* [Measurement of electrical parameters of the earth and ground grids]. Moscow,Energoatomizdat, 1983. 168 p. **5.** Rudenko S.S., Koliushko D.G. *Komp'yuternaya programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya «VEZ-3»* [Computer software for the interpretation of vertical electrical sounding «VEZ-3»] Certificate of authorship, UA, no. 47198, 2013 **6.** Rudenko S.S., Koliushko D.G. *Komp'yuternaya programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya «VEZ-2-Avto»* [Computer software for the interpretation of vertical electrical sounding «VEZ-2-Auto»] Certificate of authorship, UA, no. 47469, 2013.**7.** Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. **8.** Koliushko D. G., Rudenko S.S.. Approksimatsiya funktsii, harakterizuyuschey trehsloynuyu model grunta, metodom naimenshih kvadratov. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut "Tekhnika ta elektrofizyka vysokykh napruh". Kharkiv*, 2011, no. 16pp. 126-132.

Поступила (recived) 03.07.2015

УДК 621.313.332

Н. В. ЗАЧЕПА, асп. КрНУ;
Ю. В. ЗАЧЕПА, канд. техн. наук, доц. КрНУ;
С. А. СЕРГІЄНКО, канд. техн. наук, доц. КрНУ

ПРОГРАМНО-ЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Вступ. Останнім часом все більшу популярність знаходять автономні дизель-генераторні установки, у яких застосовуються безконтактні генератори трифазного змінного струму [1]. На сьогодні найчастіше застосовуються синхронні генератори. Асинхронні генератори у порівнянні із синхронними мають більше просту й надійну конструкцію, менші масу й вартість у діапазоні потужностей до 100 кВт [2]. Однак для широкого використання дизель-генераторні установки з асинхронними генераторами залишаються маловивченими питання визначення перевантажувальної здатності останнього, а також якісні показники енергії, що генерується. Реальний лабораторний стенд в порівнянні з програмно-логічним комплексом найчастіше має високу вартість складну внутрішню структуру, об'ємну технічну документацію. Установки складно модернізувати, змінювати склад і призначення. Вказані недоліки зумовили необхідність розробки програмно-логічного комплексу для дослідження енергопроцесів в автономних джерел живлення на базі дизель-генераторної установки з асинхронним генератором. Цей комплекс дає можливість моделювати (штучно створювати) і оцінювати різні аварійні ситуації, можливість випробовувати установку в екстремальних режимах, змінювати умови випробовування і характеристики обладнання; аналізувати фактори виникнення аварійних ситуацій, кількість студентів що працюють зі стендом обмежується лише наявністю персонального компютера, на які встановлено віртуальний стенд.

Мета роботи. Розробка математичної моделі дизель-генераторної установки з асинхронним генератором у вигляді програмно-логічного комплекса-тренажера.

Матеріали та результати досліджень. Програмно-логічний комплекс (ПЛК) можна умовно поділити на чотири основні блоки – це дизельний двигун (ДД), асинхронний генератором (АГ), ємнісна система збудження та блок споживачів постійного та змінного струму.

Математична модель дизельного двигуна. Сучасний дизельний двигун являє собою сукупність взаємодіючих елементів, до числа яких відноситься споживач, безпосередньо сам двигун, що містить блок з камерами згоряння, циліндропоршневими групами й колінчатим валом [3]. Робота ДД у сталому режимі можлива тільки при виконанні умов статичної рівноваги:

$$M_{kr} - M_c = 0, \tag{1}$$

де M_{kr} – крутний момент ДД; M_c – момент опору, створюваний АГ.

Рівняння двигуна в операторній формі запису має вигляд:

$$(T_Д p + k_Д)\varphi = \theta_h \chi - \theta_N \alpha_Д, \tag{2}$$

де $T_Д$ – стала часу двигуна; $p = d/dt$ – оператор диференціювання; $k_Д$ – безрозмірний коефіцієнт самовирівнювання; χ – переміщення паливної рейки насоса; θ_h, θ_N – безрозмірні коефіцієнти приведення.

Математична модель АГ.

Математична модель АГ розроблена на основі відомих рівнянь асинхронної машини з рядом допущень [4] у трифазній системі координат у матричній формі:

$$d[\Psi_s]/dt = [u_s] - R_s[i_s]; \qquad d[\Psi_r]/dt = [u_r] - R_r[i_r] + j\omega[\Psi_r], \tag{3}$$

де $[u_s] = [u_A \quad u_B \quad u_C]^T$, $[u_r] = [u_a \quad u_b \quad u_c]^T$ – транспоновані матриці миттєвих значень фазних напруг статора й ротора відповідно; $[i_s] = [i_A \quad i_B \quad i_C]^T$, $[i_r] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$ – транспоновані матриці миттєвих значень струмів у фазах статора й ротора відповідно; $[\Psi_s] = [\Psi_A \quad \Psi_B \quad \Psi_C]^T$, $[\Psi_r] = [\Psi_a \quad \Psi_b \quad \Psi_c]^T$ – транспоновані матриці повних потокозчеплень фазних обмоток статора й ротора відповідно; ω – електрична частота обертання; $[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$, $[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$ – активні опори обмоток статора й ротора відповідно.

Облік насичення магнітопровода АГ представлений залежністю взаємної індуктивності L_μ від струму i_μ намагнічування [4]:

$$L_\mu = 1/(a + bi_\mu^2), \tag{4}$$

де a, b – коефіцієнти апроксимації кривої намагнічування.

© Н.В. Зачепа, Ю.В. Зачепа, С.А. Сергієнко, 2015

Рівняння руху АГ має вигляд:

$$d\omega_м / dt = (M_{kr} - M_c)/J\,, \tag{5}$$

де $\omega_м$ – механічна частота обертання АГ (визначає електричну частоту обертання ротора $\omega = z\omega_м$, z – число пара полюсів); J – момент інерції АГ.

Математична модель ємнісної системи збудження (ЄСЗ).

Для режиму збудження АГ у статорний ланцюг включаються конденсатори, тому в (3) маємо

$$[u_s] = (-1/C)\int_0^t [i]dt + [u_0]\,, \tag{6}$$

де $[i] = [i_{cA} \quad i_{cB} \quad i_{cC}]^T$ – транспонована матриця миттєвих значень струмів, які протікають у ємностях; $[u_0] = [u_{0A} \quad u_{0B} \quad u_{0C}]^T$ – транспонована матриця миттєвих значень фазних напруг у початковий момент часу $t = t_0$; C – ємність конденсаторів збудження.

Активне (R), активно-індуктивне(RL) навантаження.

На основі другого закону Кірхгофа рівняння для миттєвих значень фазних напруг на навантаженні будуть мати вигляд:

$$L_н di_н / dt = u_c - i_н R_н\,, \tag{7}$$

де $L_н$ – індуктивність навантаження (для 100 % активного навантаження в рівняннях необхідно приняти $L_н = 0$); $R_н$ – активний опір навантаження; $i_н = [i_{нA} \quad i_{нB} \quad i_{нC}]^T$ – транспонована матриця миттєвих значень струму у відповідній фазі навантаження.

Рухове навантаження (АД).

В сучасний час у переважній більшості випадків споживачем енергії являється асинхронний двигун. Для проведення досліджень роботи АД від асинхронного генератора була складена математичная модель у трьохфазній системі координат відповідно [5].

$$u_c = i_{sm}R_{sm} + d\Psi_{sm}/dt; \quad 0 = i_{rm}R_{rm} + d\Psi_{rm}/dt, \tag{8}$$

де $i_{sm} = [i_A \quad i_B \quad i_C]^T$, $i_{rm} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$ – транспоновані матриці миттєвих значень струмів у фазах статора і ротора відповідно; $\Psi_{sm} = [\Psi_A \quad \Psi_B \quad \Psi_C]^T$, $\Psi_{rm} = [\Psi_a \quad \Psi_b \quad \Psi_c]^T$ – матриці повних потокозчеплень фазних обмоток статора і ротора відповідно; R_{sm}, R_{rm} – активні опори обмоток статора і ротора.

Потокозчеплення будь-якої фази АД визначаються відповідно (8).

Рівняння руху АД має вигляд:

$$d\omega_m / dt = (M_m - M_c)/J_m\,, \tag{9}$$

де ω_m – кутова частота обертання АД; J_m – момент інерції АД; M_m – електромагнітний момент АД; M_c –момент навантаження на валу АД.

Імітація різних видів споживачів виконувалась щляхом створення відповідного моменту навантаження на валу АД. Загальна формула, що описує характер моменту:

$$M_c = M_0 + (M_{нм} - M_0)\cdot(\omega/\omega_{дн})^n\,, \tag{10}$$

де $M_{нм}$ – номінальний момент навантаження; n – коефіцієнт, який визначається характером споживача; $M_0 \approx (0{,}05 - 0{,}1)\cdot M_{нм}$ – момент неробочого ходу АД:

Загальний вигляд лицьової панелі розробленого комплексу-тренажера ДГУ з АГ наведено на рис. 1.

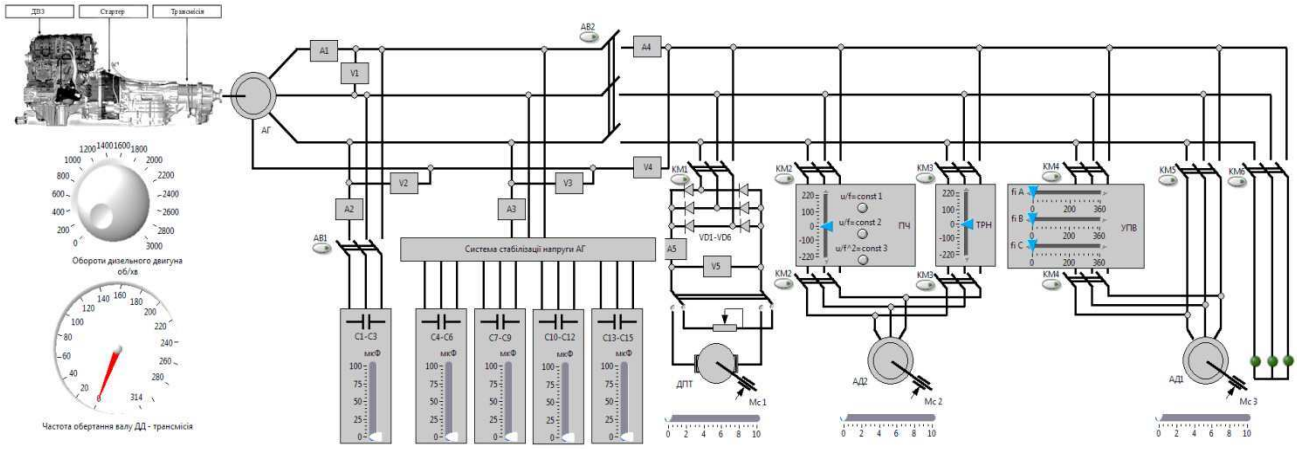


Рис. 1 Лицьова панель комплекса-тренажера з дослідження ДГУ з АГ.

До затискачів генератора є можливість підключення як споживачів змінного, так і постійного струмів. Останні приєднуються через випрямляч. Структурні схеми основних елементів ДГУ – ДД і АГ – з реалізацією в спеціалізованому пакеті прикладних програм LabView представлені на рис. 2 та на рис. 3 відповідно.

Для візуалізації виведені поточні значення частоти обертання ДД, напруги та струмів безпосередньо АГ, ЄСЗ та характеристики споживачів електричної енергії. Реалізована можливість регулювання частоти обертання ротора АГ, зміни параметрів ЄСЗ та блоку споживачів постійного та змінного струмів, здійснювати регулюваний пуск електричних машин з живленням від АГ за рахунок тиристорного регулятора напруги (рис. 4) та перетворювача частоти (ПЧ). Крім того, для перетворювача частоти є можливість вибору одного з трьох основних законів частотного керування. Також є можливість зміни завдання різного роду моментів опору на валах рухового навантаження, як було зазначено раніше. Пристрій пофазного включення (ППВ) реалізовує принцип сприятливого пуску АД шляхом регулювання кута затримки на включення кожної фази. Крім того розроблений ПЛК дозволяє проводити дослідження групового (рис. 5) та каскадного (рис. 6) пусків електричних двигунів.

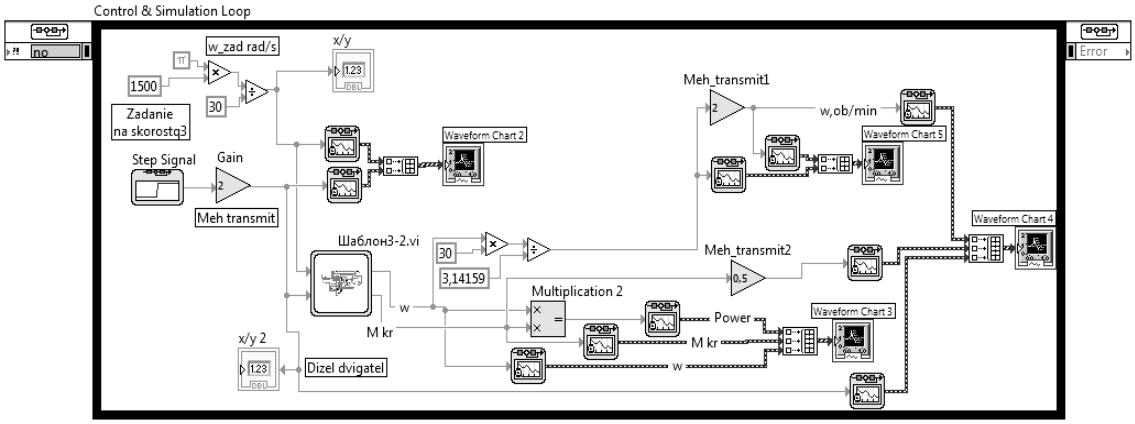


Рис. 2 Структурна схема ДД із регулятором частоти обертання, реалізована в LabView.

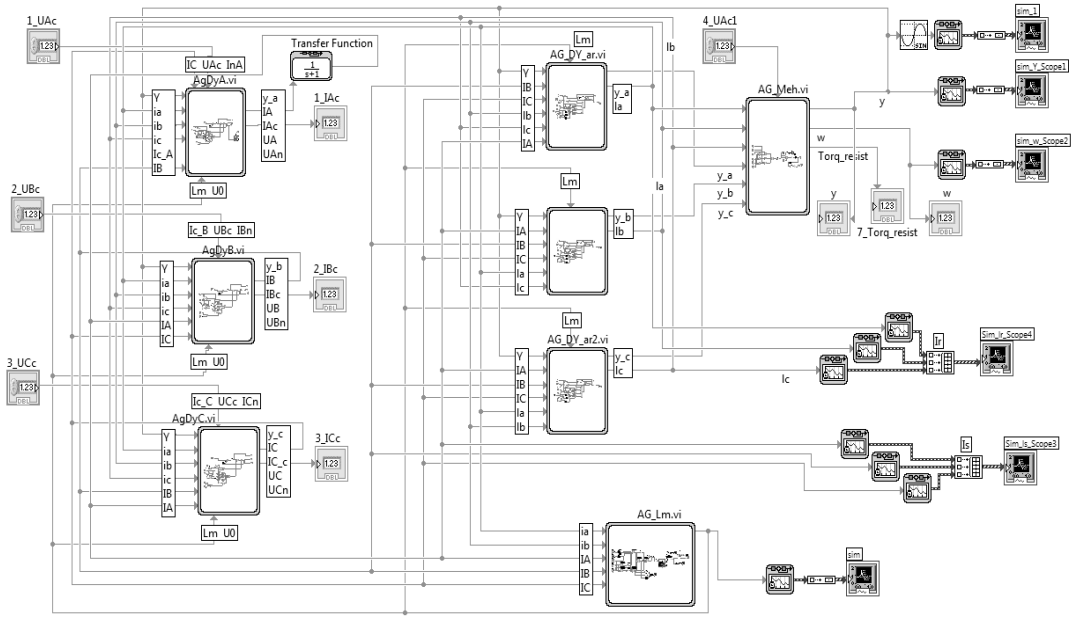
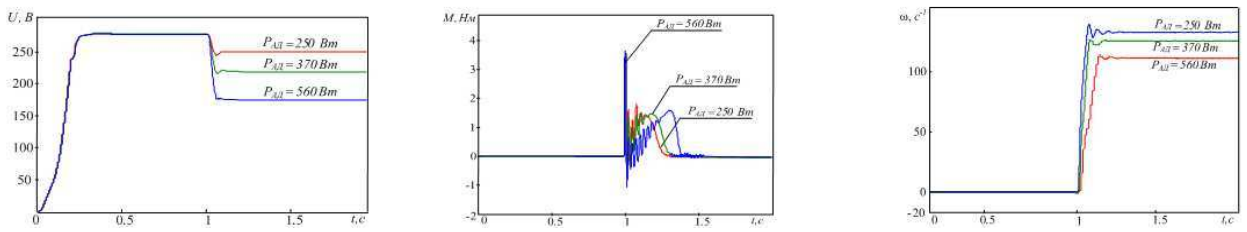
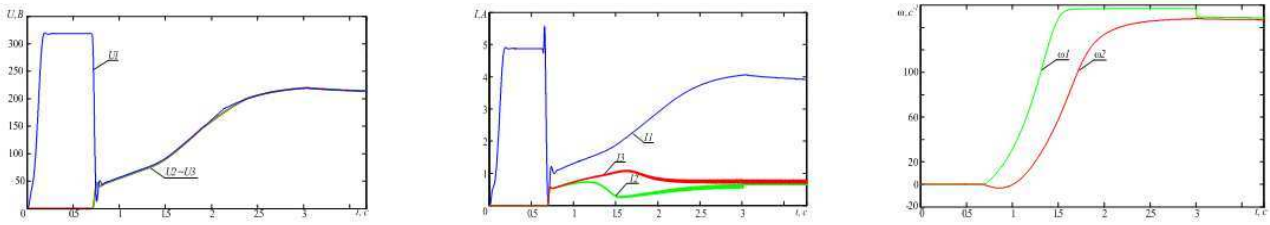


Рис. 3 Структурна схема АГ, реалізована в LabView.



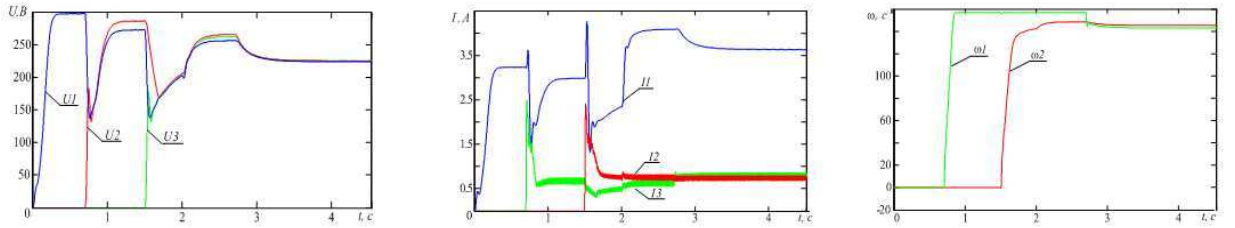
а) напруги АГ б) моменти АД1, АД2, АД3 в) частоти обертання АД1, АД2, АД3

Рис. 4 Характеристики ДГУ при пуску АД різної потужності на неробочому ходу з використанням ТРН.



а) напруги АГ (*U1*) і на затискачах АД1 (*U2*) та АД2 (*U3*) б) струми статора АГ (*I1*) і АД1 (*I2*) та АД2 (*I3*) в) частоти обертання АД1 та АД2

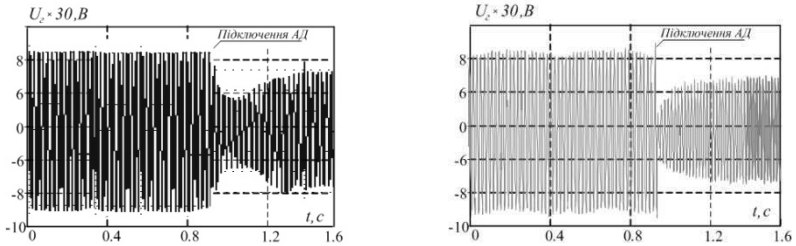
Рис. 5 Груповий пуск АД з використанням ПЧ та живленням від ДГУ.



а) напруги АГ (*U1*) і на затискачах АД1 (*U2*) та АД2 (*U3*) б) струми статора АГ (*I1*) і АД1 (*I2*) та АД2 (*I3*) в) частоти обертання АД1 та АД2

Рис. 6 Каскадний пуск АД з використанням ПЧ та живленням від ДГУ.

Адекватність розробленого ПЛК підтверджена шляхом безпосереднього порівняння результатів розрахункових характеристик з експериментальними (рис. 7).



а) експериментальні криві б) розрахункові криві

Рис. 7 Часові залежності напруги на затискачах АГ при підключенні АД потужністю $S_m = 0{,}38S_G$.

Висновки. Розроблений програмно-логічний комплекс дизель-генераторної установки з асинхронним генератором дозволяє проводити дослідження робочих режимів АГ з подальшим опрацювання результатів у спеціалізованих пакетах програм щодо аналізу якості генерованої електроенергії, розробки систем контролю, обліку та керування енергопроцесів. Планується вдосконалення комплексу для розв`язання задач з дослідження аварійних та позаштатних режимів роботи з метою створення інструменту для формування вимог та рекомендацій щодо способів та пристроїв захисту АГ.

Список літератури: **1.** *Бекаев Л. С.* Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / *Л. С. Бекаев, О. В. Марченко, С. П. Пинегин*. – Новосибирск: Наука, 2000. – 300 с. **2.** *Крамаренко А. А.* Технико-экономическое обоснование автономной системы электропитания / *А. А. Крамаренко, С. А. Сергиенко* // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 184–185. **3.** *Грехов Л. В.* Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / *Л. В. Грехов, А. С. Кулешов*. – М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 158 с. **4.** *Торопцев Н. Д.* Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 87 с. **5.** *Чорний О. П.* Моделювання електромеханічних систем: [підручник] / [Чорний О. П. та ін.] – Кременчук: 2001. – 376 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Bekayev, L. S., O. V. Marchenko and S. P. Pinegin. Mirovaya energetika i perekhod k ustoychivomu razvitiyu. Novosibirsk: Nauka, 2000. Print. **2.** Kramarenko, A. A., S. A. Sergiyenko. "Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye avtonomnoy sistemy elektropitaniya." Yelektromekhaníchní ta yenergetichní sistemi, metodi modelyuvannya ta optimízatsíï. Zbírnik naukovikh prats' XÍ Mízhnarodnoï naukovo-tekhníchnoï konferentsíï molodikh uchenikh í spetsíalístív. – Kremenchuk: KrNU (2015): – 184–185. Print. **3.** Hrehov, L. V., A. S. Kuleshov. Matematycheskoe modelyrovanye y kompyuternaya optymyzatsyya toplyvopodachy y rabochykh protsessov dvyhateley vnutrenneho s·horanyya. – M.: yzd-vo MHTU ym. N.É. Baumana, 2000. Print. **4.** Toroptsev, N. D. Asynkhronnye heneratory dlya avtonomnykh élektroénerhetycheskykh ustanovok. – M.: NTF «Énerhoprohress», 2004. Print. **5.** Chornyy, O. P. Modelyuvannya elektromekhanichnykh system: [pidruchnyk] / [Chornyy O. P. ta in.] – Kremenchuk, 2001. Print.

Надійшла (received) 14.07.2015

УДК 621.3.01

В. В. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, доцент, директор УНППИ УИПА, Артёмовск;
С. Н. ЛУТАЙ, канд. техн. наук, доцент, УНППИ УИПА, Артёмовск;
Б. Б КОБЫЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук,доцент, УНППИ УИПА, Артёмовск.

ИЗМЕРИТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Введение. Процедура измерения параметров ферромагнитных материалов подразумевает выполнение специализированной измерительной системой ряда функций [1-5]. Управление изменением перемагничивающего поля [6], измерение напряженности и индукции магнитного поля.
Для реализации послей функции требуется веберметр. Веберметр – прибор, предназначенный для измерения магнитного потока со шкалой, градуированной в единицах магнитного потока – вебера.

Материал исследования. Предлагается следующий алгоритм работы этого прибора: сигнал с источника опорного напряжения подается на делитель напряжения, где уменьшается в определенное число раз, затем подается на повторитель напряжения, после чего сигнал подвергается фильтрации, у него сглаживается основная гармоника – это необходимо для того, чтобы пик сигнала не внес погрешность, связанную с неверным выбором предела измерений, после чего сигнал поступает на усилитель, предварительно усиливается с коэффициентом, необходимым для измерительного тракта. Подается на схему компенсации смещения, которая поддерживает напряжение, которое не должно превышать определенный уровень.

Аналоговый коммутатор работает в двух режимах: компенсации и измерения. Когда он находится в режиме компенсации, то на выходе ноль, в режиме измерения производится непосредственно измерение сигнала.
Структурная схема веберметра приведена на рис. 1.

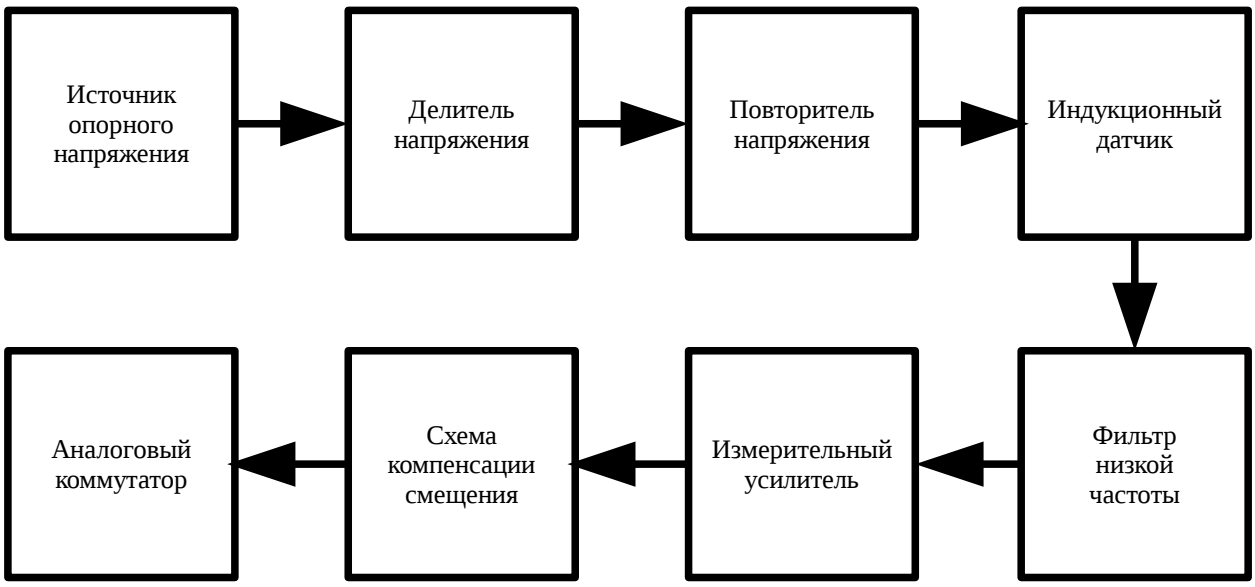


Рис. 1. − Структурная схема.

Важной частью канала измерения индукции магнитного поля является первичный преобразователь. Рассмотрим расчет индукционного преобразователя для веберметра B_m = 0,001 Тл и времени действия сигнала около 0,1 с; диаметр катушки d = 7 мм; количество витков измерительной катушки, W = 40.

Предположим, что витки пронизываются примерно одинаково магнитным потоком, тогда

$$\psi = \Phi W \quad . \tag{1}$$

В свою очередь полагая, что индукция по сечению катушки постоянна, запишем:

$$e = \frac{db}{dt} SW \quad , \tag{2}$$

где S – площадь контура, охватываемая одним витком.

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 7^2}{4} = 38{,}47 \text{ мм}^2 \quad . \tag{3}$$

Тогда вольт–секундная площадь, наводимая ЭДС, равна при B_m около 0,001 Тл

@ В.В Коломиец., С.Н. Лутай , Б.Б. Кобылянский, 2015

$$e\,\Delta t = B_m SW,$$
$$e = \frac{0{,}001}{0{,}1}\cdot 38{,}47\cdot 40 = 15{,}388\ B \tag{4}$$

Рассчитаем индуктивность катушки:

$$L = \pi^2\cdot\left(\frac{D^2}{l}\right)\cdot N^2\cdot 10^{-3}$$
$$L = 3{,}14^2\cdot\left(\frac{0{,}06^2}{5}\right)\cdot 40^2\cdot 10^{-3} = 11{,}37\ \text{мм}^2 \tag{5}$$

где N – число витков катушки; l – длина катушки, мм.

Испытания веберметра показали его высокие эксплуатационные характеристики.

Список литературы: 1. Ланкин М.В. Приборы и методы контроля магнитных свойств постоянных магнитов. - Новочеркасск: Южно-Российский гос. технический ун-т (Новочеркасский политехнический ин-т), 2007, 292 с. **2.** Ланкин М.В., Ланкин А.М. Решение обратной задачи метода гармонического баланса / В сборнике: Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики Материалы 4-й научно-практической internet-конференции. отв. редактор Ю.С. Нагорнов. Ульяновск, 2014. С. 117-122. **3.** Ланкин А.М., Ланкин М.В. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств / Современные проблемы науки и образования. 2014. №1. С. 246. **4.** Lankin A.M., Lankin M.V. Getting weber - voltage characteristics using the metod of harmonic balance \ В сборнике: The Second International Conference on Eurasian scientific developmentProceedings of the Conference. 2014. С. 264-270. **5.** Ланкин А.М., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. Метод измерения вебер-амперной характеристики базирующийся на решении обратной задачи МГБ / Современные проблемы науки и образования. 2014. №4. С. 167. **6.** Ланкин А.М., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д., Наугольнов О.А. Управление магнитным состоянием изделий из магнитомягких материалов / Фундаментальные исследования. 2014. № 11-5. С. 1005-1009.

Поступила (received) 27.08.2015

УДК 621.3.01

В. В. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, доцент, директор УНППИ УИПА, Артёмовск;
С. Н. ЛУТАЙ, канд. техн. наук, доцент,УНППИ УИПА, Артёмовск;
Б. Б КОБЫЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук,доцент, УНППИ УИПА, Артёмовск.

УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Введение. Ферромагнитные материалы и изделия из них широко используются в радиоэлектронике и вычислительной технике. Одной из важнейших отраслей применения ферромагнитов является их использование в качестве магнитопроводов электромагнитов. Известны методы диагностики электромагнитов основанные на анализе формы его вебер-амперной характеристики [1-4].

Нами разработано устройство, позволяющее измерять магнитные статические характеристики электромагнитов.

Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

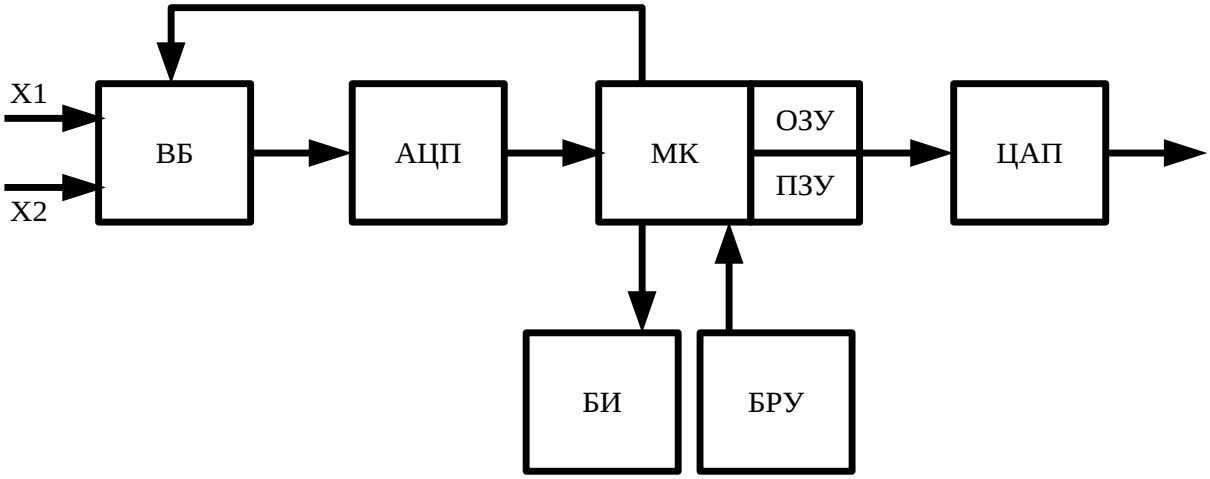


Рис. 1. – Структурная схема устройства.

Структурная схема устройства состоит из следующих элементов:

ВБ1 – входной блок 1-й измеряемой величины (потокосцепление). Предназначен для усиления сигнала, поступающего с аналогового блока прибора для измерения квазистатических характеристик электромагнитов. Имеет 3 поддиапазона;

ВБ2 – входной блок 2-й измеряемой величины (ток или напряженность магнитного поля) [5, 6]. Предназначен для усиления сигнала, поступающего с аналогового блока прибора, для измерения квазистатических характеристик электромагнитов. Также имеет 3 поддиапазона;

К – коммутатор, позволяет выбирать измеряемую величину, требуемую в данный момент времени;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь, преобразует входной аналоговый сигнал в дискретный код;

МПК – микроконтроллер, микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессора и периферийных устройств, содержит ОЗУ и ПЗУ. По сути, это однокристальный компьютер, способный выполнять простые задачи;

БРУ – блок ручного управления, предназначен для ввода информации в МПК с помощью кнопок;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, устройство для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал (ток, напряжение);

ОУ – операционный усилитель, предназначен для усиления сигнала на выходе ЦАП;

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство (оперативная память), энергозависимая часть системы компьютерной памяти, в которой временно хранятся данные и команды, необходимые процессору для выполнения им операции. Обязательным условием является адресуемость (каждое машинное слово имеет индивидуальный адрес) памяти;

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, энергонезависимая память, используется для хранения массива неизменяемых данных;

Индикаторы семисегментные – устройство отображения цифровой информации.

© Коломиец В.В., Лутай С.Н., Кобылянский Б.Б., 2015

Принцип работы. Устройство работает следующим образом: с аналогового блока устройства на цифровой блок поступают 2 сигнала: ток и потокосцепление. В ВБ1 и ВБ2 происходит усиление сигналов до заданного уровня, требуемого для АЦП. С помощью К выбирается требуемый сигнал и подается на АЦП. Затем, уже цифровой сигнал с АЦП поступает в МПК. Индикация значения выбранного сигнала выполняется с помощью семисигментных индикаторов и дополнительных индикаторов, подключенным к портам ввода-вывода МПК. Так же к МПК подключены дополнительно ОЗУ и ПЗУ. МПК формирует пилообразный сигнал, требуемый для аналогового блока и подает его на ЦАП, а затем на ОУ.

Вывод. Разработанное устройство является актуальным для различных отраслей, где используются либо изготавливаются электромагниты и необходима их диагностика.

Список литературы: 1. Ланкин М.В., Ланкин А.М. Решение обратной задачи метода гармонического баланса / В сборнике: Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики Материалы 4-й научно-практической internet-конференции. отв. редактор Ю.С. Нагорнов. Ульяновск, 2014. С. 117-122. **2.** Ланкин А.М., Ланкин М.В. Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств / Современные проблемы науки и образования. 2014. №1. С. 246. **3.** Lankin A.M., Lankin M.V. Getting weber - voltage characteristics using the metod of harmonic balance\ В сборнике: The Second International Conference on Eurasian scientific developmentProceedings of the Conference. 2014. С. 264-270. **4.** Ланкин А.М., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. Метод измерения вебер-амперной характеристики базирующийся на решении обратной задачи МГБ / Современные проблемы науки и образования. 2014. №4. С. 167. **5.** Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. Оптимизация параметров измерительного преобразователя напряженности магнитного поля / Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2008. №2. С. 32-35. **6.** Ланкин М.В. Приборы и методы контроля магнитных свойств постоянных магнитов. - 2007, 292 с.

Поступила (received) 27.08.2015

Энергетика и энергосбережение

УДК 621.3

Г. Г. ЖЕМЕРОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Д. В. ТУГАЙ, канд. техн. наук, доц., ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, Харьков

УТОЧНЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОЙ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Введение. Оценка энергетической эффективности системы электроснабжения (СЭ) является важной задачей, решение которой связано с экономией ресурсов при производстве, передаче и распределении электрической энергии. Для осуществления такой оценки инженерными методами сложную разветвленную СЭ удобно заменить расчетной эквивалентной схемой, представленной на рис.1. Схема состоит из симметричного или несимметричного трехфазного источника почти синусоидальных напряжений (*Sourse*), нагрузки, представленной на рис. 1 в виде многополюсника (*Load*) и соединенительной линии (*Line*) с сопротивлением фазного кабеля R_s и сопротивлением нулевого провода R_n.

Постановка задачи. Разные режимы работы трехфазного источника (симметричный, несимметричный, синусоидальный, несинусоидальный), а также разные варианты нагрузок (симметричная, асимметричная, линейная (резистивная, реактивная, смешанная), нелинейная) обуславливают как минимум 72 варианта работы СЭ, в которых возникают дополнительные потери энергии [1]. Согласно современной теории мгновенных активной и реактивной мощности [2-3] можно выделить три основные причины появления дополнительных потерь: наличие в СЭ рассчетной реактивной мощности, наличие переменной составляющей в кривой мгновенной активной мощности, а в случае четырехпроводной СЭ, протекание тока в нулевом проводе [4].

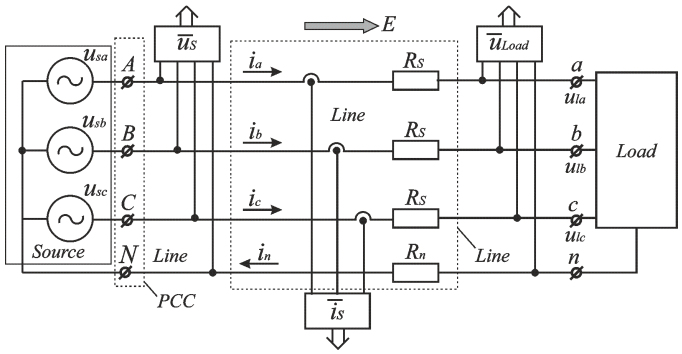


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной СЭ

В [4] была предложена универсальноя расчетная формула, отвечающая приведенным положениям:

$$\Delta P_{\Sigma *} = \Delta P_{\min *} \cdot \left(1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2\right) + \Delta P_{n*} \Big|_{P_{usf} = const}, \tag{1}$$

где

$$\Delta P_{\Sigma *} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{usf}} - \tag{2}$$

относительная суммарная мощность потерь в СЭ в долях средней за период повторяемости полезной мощности нагрузки;

$$\Delta P_{\min *} = \frac{\Delta P_{\min}}{P_{usf}} = \frac{R_S}{R_L} = \frac{1}{\eta_{\max}} - 1 = \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{P_{SC}/P_{usf}}}} - \tag{3}$$

относительная мощность минимально возможных потерь, определяемая при отсутствии в СЭ реактивной мощности, а также пульсаций мгновенной активной мощности [5]; $\eta_{\max}$ – максимально возможный КПД СЭ;

$$Q_{RMS*} = \frac{Q_{RMS}}{P_{usf}} = \frac{1}{P_{usf}} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} |\vec{q}|^2 dt} - \tag{4}$$

относительное среднеквадратическое значение реактивной мощности, вычисленное в периоде повторяемости графика модуля вектора мгновенной реактивной мощности;

$$P_{pulsRMS*} = \frac{P_{pulsRMS}}{P_{usf}} = \frac{1}{P_{usf}} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_{puls}^2 dt} - \tag{5}$$

относительное среднеквадратическое значение переменной составляющей мгновенной активной мощности, вычисленное в периоде повторяемости;

$$\Delta P_{n*} = \frac{\Delta P_n}{P_{usf}} = \frac{R_S}{T \cdot P_{usf}} \int_t^{t+T} i_n^2 dt - \tag{6}$$

© Г.Г. ЖЕМЕРОВ, Д.В. ТУГАЙ, 2015

относительная мощность потерь в нулевом проводе, вычисленная в периоде повторяемости, обусловленная протеканием тока i_n;

$$P_{usf} = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} p_L dt - \tag{7}$$

средняя, вычисленная в периоде повторяемости, полезная мощность нагрузки. При расчетах принималось, что P_{usf} = const.

Формула (1) позволяет получить высокую точность расчета для трехфазных трехпроводных СЭ, а также четырехпроводных СЭ при R_n = 0, с симметричным источником трехфазных синусоидальных напряжений [4]. Однако, как показали эксперименты, для остальных случаев погрешность расчета по (1) может превышать 10%.

Целью статьи является уточнение универсальной расчетной формулы (1) для трехфазных четырехпроводных СЭ при $R_n \neq 0$, а также для СЭ в несимметричном режиме работы источника.

Материалы исследований. **Трехфазная четырехпроводная СЭ с симметричным источником при $R_n = R_s$**

Проверка формулы (1) на Matlab-модели (см. рис. 2) [4] показала существенное расхождение результатов в определении составляющей мощности потерь от протекания тока в нулевом проводе

$$\left(\frac{1}{\eta_{real}} - 1\right) - \Delta P_{\min *} \cdot \left(1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2\right) > I_{nRMS}^2 \cdot R_n , \tag{8}$$

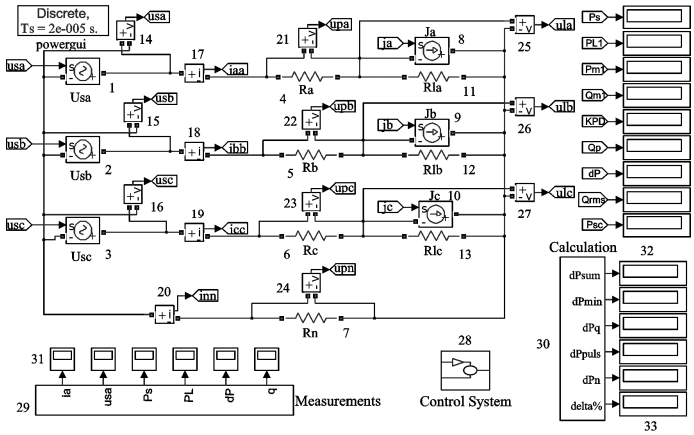


Рис. 2. Matlab-модель эквивалентной трехфазной СЭ

где I_{nRMS} – среднеквадратическое, вычисленное в периоде повторяемости, значение тока в нулевом проводе; η_{real} – действительный КПД конкретной СЭ в установившемся режиме работы.

Определим причину, вызывающую расхождение результатов.

В трехфазных трехпроводных СЭ потери энергии связаны с протеканием тока в фазных кабелях и, в любой момент времени, могут быть выражены через модуль результирующего вектора сетевого тока:

$$\Delta p_{\Sigma 3} = \left|\vec{i}_S\right|^2 \cdot R_S = i_S^2 \cdot R_S , \tag{9}$$

где

$$i_S^2 = i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 . \tag{10}$$

Интегрируя (9) в периоде повторяемости можно определить среднюю мощность потерь

$$\Delta P_{\Sigma 3} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} i_S^2 \cdot R_S dt . \tag{11}$$

Также через модуль результирующего вектора сетевого тока может быть выражена мгновенная реактивная мощность и мгновенная активная мощность [1].

В трехфазных четырехпроводных СЭ, при равенстве сопротивления нулевого провода сопротивлению линии, появляется дополнительная составляющая потерь, обусловленная протеканием тока в нулевом проводе

$$\Delta p_{\Sigma 4} = \left(i_S^2 + i_n^2\right) \cdot R_S . \tag{12}$$

С учетом

$$i_n^2 = \left(i_a + i_b + i_c\right)^2 \tag{13}$$

получим

$$\Delta p_{\Sigma 4} = 2R_S \cdot \left(i_S^2 + i_a \cdot i_b + i_a \cdot i_c + i_b \cdot i_c\right). \tag{14}$$

Сравним две четырехпроводные СЭ: с нулевым сопротивлением четвертого провода и с сопротивлением четвертого провода, равным сопротивлению линии.

При R_n = 0 ΔP_{n*} = 0 и соотношение (1) дает точный результат.

При учете сопротивления R_n, появление тока в нулевом проводе изменяет величину токов линии, однако практически не изменяет модуль результирующего тока i_s. При этом происходит уменшение угла сдвига между пространственными результирующими векторами напряжения и тока

$$\varphi = \arccos\left(\frac{u_a}{\left|\vec{u}\right|} \cdot \frac{i_a}{\left|\vec{i}\right|} + \frac{u_b}{\left|\vec{u}\right|} \cdot \frac{i_b}{\left|\vec{i}\right|} + \frac{u_c}{\left|\vec{u}\right|} \cdot \frac{i_c}{\left|\vec{i}\right|}\right). \tag{15}$$

В результате уменшается среднеквадратическая реактивная мощность и увеличивается средняя активная мощность. Так как квадрат среднеквадратической реактивной мощности связан с дополнительными потерями,

то потери, обусловленные реактивной мощностью, уменшаются. Увеличение средней активной мощности СЭ не вызывают увеличение переменной составляющей мгновенной активной мощности, а наоборот, наблюдается незначительное ее уменшение, в результате которого, потери, обусловленные пульсациями активной мощности, незначительно уменьшаются.

Формула (1) работает корректно в том случае, когда отсутствует взаимное влияние электромагнитных процессов в линиях и электромагнитных процессов в нулевом проводе СЭ. То есть, если принять, что добавлени сопротивления в нулевой провод не вызывает измненение средней активной и среднеквадратической реактивной мощности. При таком допущении, сначала нужно определить Q_{RMS*} и $P_{pulsRMS*}$ в режиме $R_n = 0$, а потом подставить найденные значения в формулу (1). Однако такой способ рассчета не отражает учет взаимного влияния и искажает общее представление о процессах в четырехпроводной СЭ.

Наиболее целесообразным будет введение в (1) дополнительной составляющей, учитывающей взаимное влияние электромагнитных процеесов в линиях и нулевом проводе, ΔP_{mut*}

$$\Delta P_{\Sigma*} = \Delta P_{\min*} \cdot \left(1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2\right) + \Delta P_{n*} + \Delta P_{mut*} \Big|_{P_{usf} = const}. \quad (16)$$

Для выражения дополнительной составляющей можно воспользоваться допущением, что при добавлении сопротивления в нулевой провод изменяется угол сдвига между пространственными векторами напряжения и тока, а модуль пространственного вектора тока не изменяется. Тогда коэффициент, вызывающий изменение первого слагаемого в уравнении (1) будет пропорционален отношению квадратов косинусов угла сдвига после и до добавления сопротивления в нулевой провод

$$k \cong \frac{\cos^2 \varphi_{R_n = R_S}}{\cos^2 \varphi_{R_n = 0}}. \quad (17)$$

Учитывая связь соотношения (17) только с первым слагаемым уравнения (1) получим соотношение для расчета дополнительной составляющей

$$\Delta P_{mut*} = \Delta P_{\min*} \cdot \left(1 + Q_{RMS*}^2 + P_{pulsRMS*}^2\right) \cdot (k - 1). \quad (18)$$

Проверка уточненного соотношения (16) на модели, при принятых коэффициентах асимметрии резистивной нагрузки $k_{la} = 1$, $k_{lb} = 1.3$, $k_{lc} = 0.5568$, приведена в табл.1. Как видно из таблицы, использование соотношения (16) позволило уменьшить погрешность расчета мощности суммарных потерь от 1.35% до 0.2%.

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчета и моделирования

Формула для расчета $\Delta P_{\Sigma*}$	Режим работы СЭ											
	Трехфазная трехпроводная						Трехфазная четырехпроводная $R_n = R_s$					
	Симметричный источник			Асимметричный источник			Симметричный источник			Асимметричный источник		
	Резистивная асимметричная нагрузка			Резистивная симметричная нагрузка			Резистивная асимметричная нагрузка			Резистивная симметричная нагрузка		
	Расч.	Эксп.	δ, %	Расч.	Эксп.	δ, %	Расч.	Эксп.	δ, %	Расч.	Эксп.	δ, %
(1)	0.05864	0.05865	0.016	0.0644	0.0588	9.5	0.0703	0.07126	1.354	0.06682	0.06243	7.03
(16)				0.0585	0.0588	0.51	0.07112	0.07126	0.2	0.06221	0.06243	0.352
(31)				0.05846	0.0588	0.578						
(38)										0.0637	0.06243	2.034

Несимметричный режим работы трехфазного источника. Рассмотрим простейший случай, когда асимметрия напряжений источника описывается с помощью коэффициентов

$$\begin{aligned} u_{sa} &= k_a \cdot U_m \cdot \sin(\vartheta) \\ u_{sb} &= k_b \cdot U_m \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_{sb} &= k_c \cdot U_m \cdot \sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

связанных между собой соотношением

$$k_a^2 + k_b^3 + k_c^2 = 3. \quad (20)$$

В этом случае модуль пространственного вектора напряжения источника не изменяется по величине и равен линейному напряжению симметричной системы.

Будем рассматривать случай, когда трехфазная нагрузка является симметричной и резистивной

$$k_l \cdot R_{la} = k_l \cdot R_{lb} = k_l \cdot R_{lc} = k_l \cdot R_l, \quad (21)$$

где k_l – коэффициент пропорциональности, принят для поддержания неизменным значения средней полезной мощности.

Форма записи уточненного соотношения для определения суммарных потерь в этом режиме соответствует (16). Задача сводится к определению коэффициента *k*.

Трехфазная трехпроводная СЭ. Эксперимент на модели показал, что асимметрия источника вызывает изменение (уменьшение) отношения мощности резистивного короткого замыкания к полезной мощности нагрузки, в связи с тем, что уменьшается мощность резистивного КЗ СЭ. Таким образом, мы имеем уже новую СЭ с новым значением минимально возможных потерь. Поэтому для восстановления прежнего значения мощности резистивного КЗ введем в сопротивление линии поправочный коэффициент, k_S

$$R_{line} = k_S \cdot R_S \,. \tag{22}$$

При выполнении равенства

$$k_l = k_S \tag{23}$$

мощность резистивного КЗ возвращается к исходному значению.

В этом случае относительная суммарная мощность потерь, равна минимально возможным потерям исходной СЭ (без введения коэффициента k_s). Тогда минимально возможные потери новой СЭ (с учетом коэффициента k_s)

$$\Delta P^{/}_{\min *} = \frac{\Delta P_{\min *}}{1 + Q^{2/}_{RMS*} + P^{2/}_{pulsRMS*}} \,, \tag{24}$$

где $Q^{2/}_{RMS*}$, $P^{2/}_{pulsRMS*}$ – соответственно среднеквадратическая реактивная мощность и среднеквадратическая активная мощность пульсаций новой СЭ.

С учетом отличия мощностей резистивного КЗ исходной и новой СЭ, запишем соотношение для определения поправочного коэффициента

$$k = \frac{1}{1 + Q^{2/}_{RMS*} + P^{2/}_{pulsRMS*}} \cdot \frac{P^{/}_{SC}}{P_{SC}} \,, \tag{25}$$

где

$$P_{SC} = \frac{1}{T \cdot R_s} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left(u^2_{sa} + u^2_{sb} + u^2_{sc} - \frac{\left(u_{sa} + u_{sa} + u_{sa}\right)^2}{3} \right) dt \; - \tag{26}$$

мощность резистивного КЗ исходной СЭ, соответствующая уменьшенному значению. Проинтегрируем (26) в периоде повторяемости с учетом (19)

$$P_{SC} = \frac{U^2_m}{6R_s} \cdot \left(2k^2_a + 2k^2_b + 2k^2_c + k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a \right) ; \tag{27}$$

$$P^{/}_{SC} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U^2_m}{R_s} \; - \tag{28}$$

мощность резистивного КЗ новой СЭ, соответствующая восстановленному значению.

Сравнение результатов расчета по уточненному соотношению (16) с результатами эксперимента на модели, при принятых амплитудных коэффициентах k_a = 1, k_b = 1.3, k_c = 0.5568, представлено в табл.1 Использование соотношения (16) для определения суммарной мощности потерь позволило уменьшить погрешность расчета от 9.5% до 0.51%.

В связи с тем, что отношение

$$\frac{1 + Q^2_{RMS*} + P^2_{pulsRMS*}}{1 + Q^{2/}_{RMS*} + P^{2/}_{pulsRMS*}} \approx 1 , \tag{29}$$

можно получить приближенное соотношение для расчета суммарной мощности потерь

$$\Delta P_{\Sigma *} \cong \Delta P_{\min *} \cdot \frac{P^{/}_{SC}}{P_{SC}} \,. \tag{30}$$

С учетом (27) и (28)

$$\Delta P_{\Sigma *} \cong \frac{9P_{\min *}}{2k^2_a + 2k^2_b + 2k^2_c + k_a k_b + k_b k_c + k_c k_a} \cdot \; ; \tag{31}$$

Соотношения (18) и (30) одинаково подходят для определения мощности суммарных потерь трехфазной четырехпроводной СЭ при R_n = 0, для которой

$$\begin{aligned} P^{/}_{SC} &= P_{SC} \,, \\ \Delta P_{\Sigma *} &= \Delta P_{\min *} . \end{aligned} \tag{32}$$

Трехфазная четырехповодная СЭ при $R_n = R_s$. При переходе к четырехпроводной СЭ и учете коэффициента k_s, возникают дополнительные потери, обусловленные током, протекающем в нулевом проводнике. Соотношение для расчета поправочного коэффициента может быть записано в следующем виде:

$$k = \frac{\Delta P'_{\Sigma*} - \Delta P'_{n*}}{\Delta P_{\min*} \cdot \left(1 + Q'^2_{RMS*} + P'^2_{pulsRMS*}\right)} \cdot \frac{P'_{SC}}{P_{SC}}, \quad (33)$$

$\Delta P'_{\Sigma*}$, $\Delta P'_{n*}$ – соответственно относительная суммарная мощность потерь и относительная мощность потерь в нулевом проводе в новой СЭ (при учете коэффициента k_s).

Для четырехпроводной СЭ

$$P_{SC} = \frac{1}{T \cdot R_s} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left(u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2 - \frac{5}{16} \cdot (u_{sa} + u_{sa} + u_{sa})^2 \right) dt \; - \quad (34)$$

После интегрирования (34) в периоде повторяемости с учетом (19)

$$P_{SC} = \frac{U_m^2}{32 R_s} \cdot \left(11k_a^2 + 11k_b^2 + 11k_c^2 + 5k_a k_b + 5k_b k_c + 5k_c k_a\right). \quad (35)$$

Сделав допущение

$$\Delta P'_{\Sigma*} - \Delta P'_{n*} \approx \Delta P_{\min*}. \quad (36)$$

с учетом отношения (29), получим упрощенную формулу для расчета суммарных потерь

$$\Delta P_{\Sigma*} \cong \Delta P_{\min*} \cdot \frac{P'_{SC}}{P_{SC}} - \Delta P_{n*}. \quad (37)$$

Упрощенная формула (37) подходит как для трехпроводных СЭ, так и для четырехпроводных СЭ

С учетом (28) и (35) для трехфазной четырехпроводной СЭ при $R_n = R_s$

$$\Delta P_{\Sigma*} \cong \frac{48 P_{\min*}}{11k_a^2 + 11k_b^2 + 11k_c^2 + 5k_a k_b + 5k_b k_c + 5k_c k_a} - \Delta P_{n*}\ ; \quad (38)$$

Сравнение результатов расчета по уточненному соотношению (18) с результатами эксперимента на модели, при принятых амплитудных коэффициентах $k_a = 1$, $k_b = 1.3$, $k_c = 0.5568$ представлено в табл.1 Использование соотношения (16) для определения суммарной мощности потерь позволило уменьшить погрешность расчета от 7% до 0.35%.

Выводы. Получены уточненные соотношения для расчета суммарной мощности потерь трехфазной СЭ при несимметричном режиме работы источника, а также трехфазной четырехпроводной СЭ при симметричном режиме работы источника.

Расчет по уточненным соотношениям позволил распространить использование универсальной формулы, для определения суммарной мощности потерь через ее составляющие, на большинство режимов работы СЭ, в которых возникают дополнительные потери, обусловленные тремя причинами: наличием в СЭ реактивной мощности, наличием пульсаций в кривой мгновенной активной мощности и протеканием тока в нулевом проводе.

В трехфазной СЭ с асимметричным источником и симметричной нагрузкой мощность суммарных потерь пропорциональна произведению мощности минимально возможных потерь на отношение мощности резистивного КЗ до внесения асимметрии на мощность резистивного КЗ после внесения асимметрии в систему. Мощность суммарных потерь при асимметричном источнике слабо зависит от дополнительных составляющих потерь, обусловленных реактивной мощностью и пульсациями мгновенной активной мощности.

Список литературы: 1. *Жемеров Г.Г.* Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / *Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай* // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 1. – С. 45-57. **2.** *Akagi H.* Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits / *H. Akagi ,Y. Kanazava, A. Nubae* // Int. Power Electronics Conf.. Tokio. Japan. – 1983. – pp.1375-1386. **3.** *Kim H.S.* The instantaneous power theory based on mapping matrices in three–phase four–wire systems / *H.S. Kim, H. Akagi* // In Proc. PCC"97 Conf.voll, Nagaoka, Japan, Aug. – 1997. – pp. 361–366. **4.** *Жемеров Г.Г.* Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности / *Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай* //Технічна електродинаміка. – 2015. – №4. – С. 66-70. **5.** *Жемеров Г.Г.* КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой / *Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, О.В. Ильина, О.И. Ковальчук, Е.И. Сокол* // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1. – С. 22–31.

Bibliography (transliterated): 1. Zhemerov G.G., Tugay D.V. *"Energiya i moshchnost' v sistemakh elektrosnabzheniya s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami i nakopitelyami energii". Elektrotekhníka í Elektromekhaníka*. 2014. No 1. 45-57. Print. **2.** Akagi H., Kanazava Y. and Nubae A. *"Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits" Int. Power Electronics Conf.. Tokio. Japan.* 1983. 1375-1386. Print. **3.** Kim H.S., Akagi H. *"The instantaneous power theory based on mapping matrices in three–phase four–wire systems" In Proc. PCC"97 Conf.voll, Nagaoka, Japan, Aug.* 1997. 361–366. Print. **4.** Zhemerov G.G., Tugay D.V. *"Zavisimost' dopolnitel'nykh poter' v trekhfaznykh sistemakh elektrosnabzheniya ot reaktivnoy moshchnosti i pul'satsiy mgnovennoy aktivnoy moshchnosti" Tekhníchna elektrodinamíka*. 2015. No. 4. 66-70. Print 5. Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I. and Sokol E.I. *KPD trekhfaznoy chetyrekhprovodnoy sistemy elektrosnabzheniya s asimmetrichnoy nagruzkoy. Tekhníchna yelektrodinamíka, tem. vipusk, «Silova yelektroníka ta yenergoyefektivníst'»* 2010. No.1. 22–31.

Поступила (received) 22.08.2015

УДК 621.313.323

В. Ф.СИВОКОБЫЛЕНКО, д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ДонНТУ»;
С. Н. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «ДонНТУ»;
С. В. ДЕРКАЧЕВ, аспирант ГВУЗ «ДонНТУ»

СПОСОБЫ ВЫЯВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АСИНХРОННЫМИ И СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Введение. В системах электроснабжения с асинхронными (АД) и синхронными (СД) двигателями асинхронные режимы (АР) как отдельных СД так и всего узла нагрузки могут возникать при кратковременных понижениях напряжения при коротких замыканиях, при действии АПВ линий и АВР трансформаторов, при набросах нагрузки, неисправностях в системах возбуждений СД и др. При этом особо опасными являются АР возбужденных СД, так как они сопровождаются возникновением в двигателях больших значений токов и моментов. Так, например, АР являются одной из причин высокой повреждаемости явнополюсных синхронных двигателей (напряжением 6 кВ, мощностью 1300-2500 кВт), используемых для привода шаровых мельниц на тепловых электростанциях и горно-обогатительных комбинатах [1]. Частые пуски этих загруженных СД являются неуспешными из-за не втягивания двигателя в синхронизм после подачи возбуждения. Это приводит к последующей длительной работе в асинхронном режиме возбужденного СД, предотвращение которого не обеспечивают существующие защиты. В эксплуатации также имеют место нарушения синхронизма узлов нагрузки с крупными АД и СД.

Постановка задачи. В известных защитах СД от АР в качестве пусковых органов используют токи обмоток статора или ротора, направление реактивной мощности, фазовый сдвиг между током и напряжением статора, сопротивления на выводах статора [2-4]. Однако, эти защиты не всегда эффективны, так как в основном выявляют только потерю возбуждения и не обеспечивают защиту при нарушениях синхронной устойчивости. Поэтому совершенствование защит от АР является актуальным, особенно для турбодвигателей, у которых индуктивность статора по продольной оси $x_d \geq 1$, а $ОКЗ < 1$. Целью данной работы является совершенствование способов выявления асинхронных режимов СД в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями.

Материалы исследования. В микропроцессорных терминалах большинства фирм для выявления АР используют дискретную фиксацию мгновенных значений фазных токов и напряжений, по которым определяют комплексные значения токов, напряжений, мощностей или сопротивлений. Пусковые органы защиты от АР реализуют с использованием известных зависимостей для трехфазных систем:

$$
\begin{aligned}
&P = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c; \quad Q = \tfrac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[(u_b - u_c) \cdot i_a - (i_b - i_c) \cdot u_a \right]; \\
&I = \tfrac{2}{3} \cdot (i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c); \quad U = \tfrac{2}{3} \cdot (u_a + a \cdot u_b + a^2 \cdot u_c); \\
&Z = \frac{U}{I}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{Q}{P}; \\
&a = \exp(j\tfrac{2}{3}\pi); \quad a^2 = \exp(-j\tfrac{2}{3}\pi).
\end{aligned}
\tag{1}
$$

В данной работе анализ этих режимов выполним с помощью метода математического моделирования с использованием полных дифференциальных уравнений для всех элементов типовой системы электроснабжения, состоящей из двухтрансформаторной подстанции с двигательной нагрузкой (рис.1). Примем мощность каждого из питающих трансформаторов Т1 и Т2 равной 16 МВА, а мощности четырех двигателей, подключенных к каждой из двух секций 6 кВ, асинхронных 1500 и 1700 кВт, а синхронных 2500 и 4000 кВт. Питание подстанции осуществляется линиями ЛЭП1 и ЛЭП2 от сети напряжением 110 кВ.

Для повышения точности моделирования АД и СД представлены многоконтурными схемами замещения, параметры которых были определены по методике, изложенной в [5,6], а в целом описание математической модель такого узла нагрузки приведено в [7].

При возникновении АР синхронного двигателя из-за несимметрии сопротивлений по продольной и поперечной осям ротора возникают колебания токов статора и ротора, потребляемой активной и реактивной мощностей, а также скольжения и угла вылета ротора. Результаты моделирования режима пуска и АР, вызванного потерей возбуждения из-за разрыва цепи обмотки возбуждения одного из СД мощностью 2500 кВт (турбодвигатель типа СТДП-2500-2), приведены на рис 2, а на рис.3 показан АР этого же возбужденного двигателя. Анализ приведенных результатов показал, что для этих двух режимов обеспечить защиту от АР данного двигателя на основе указанных выше известных принципов затруднительно, особенно это относится к АР возбужденного двигателя, когда двигатель находится в асинхронном режиме с малым скольжением.

На основе анализа результатов моделирования установлено, что в синхронных турбодвигателях (серия СТД и др.) при нагрузках номинальной и менее возможен длительный АР возбужденного СД с очень малым скольжением (0,1-0,3 %) и длительным периодом проворотов ротора (8-12 сек). Длительная работа СД в таком режиме является опасной и поэтому требуется высокочувствительная защита для его выявления.

© В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко, С.В. Деркачев, 2015

Предложенный в работе критерий выявления АР основан на использовании характера изменения реактивной мощности, которая возрастает и убывает циклически при каждом провороте ротора. При этом установлено, что, в отличие от известного способа выявления АР с помощью тангенса угла между активной и реактивной мощностями, более предпочтительным является использование нелинейной степенной зависимости между соотношениями активной и реактивной мощности.

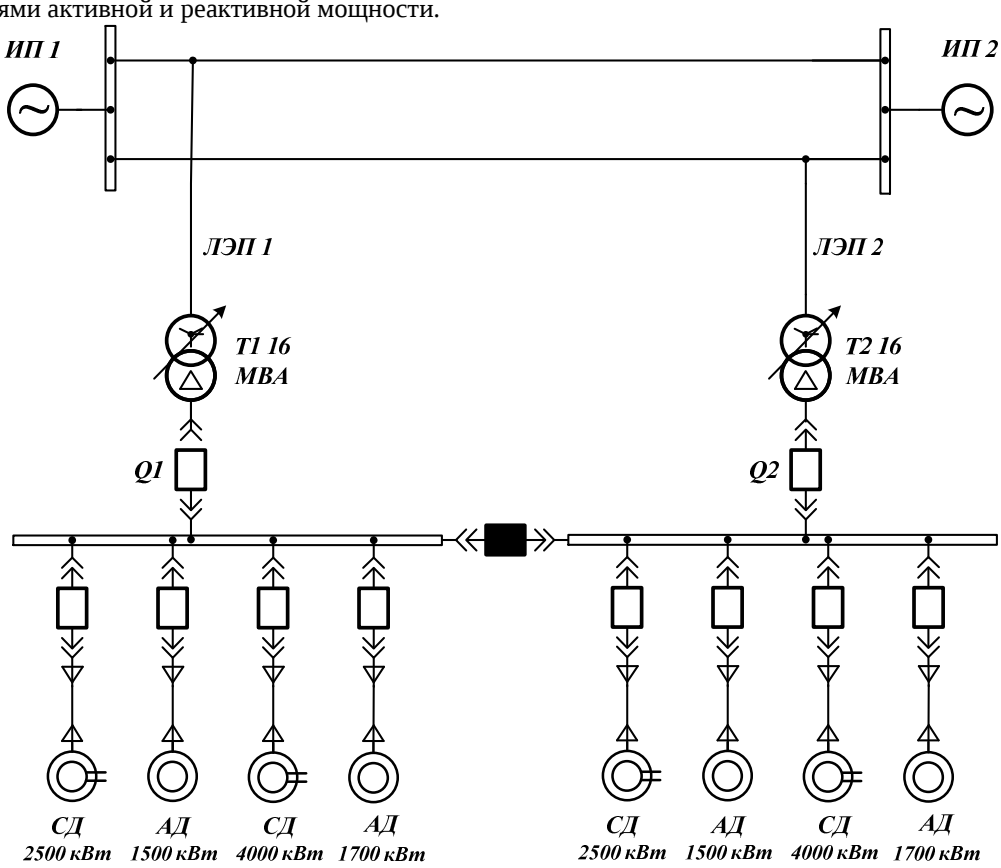


Рис. 1 Схема двухтрансформаторной подстанции

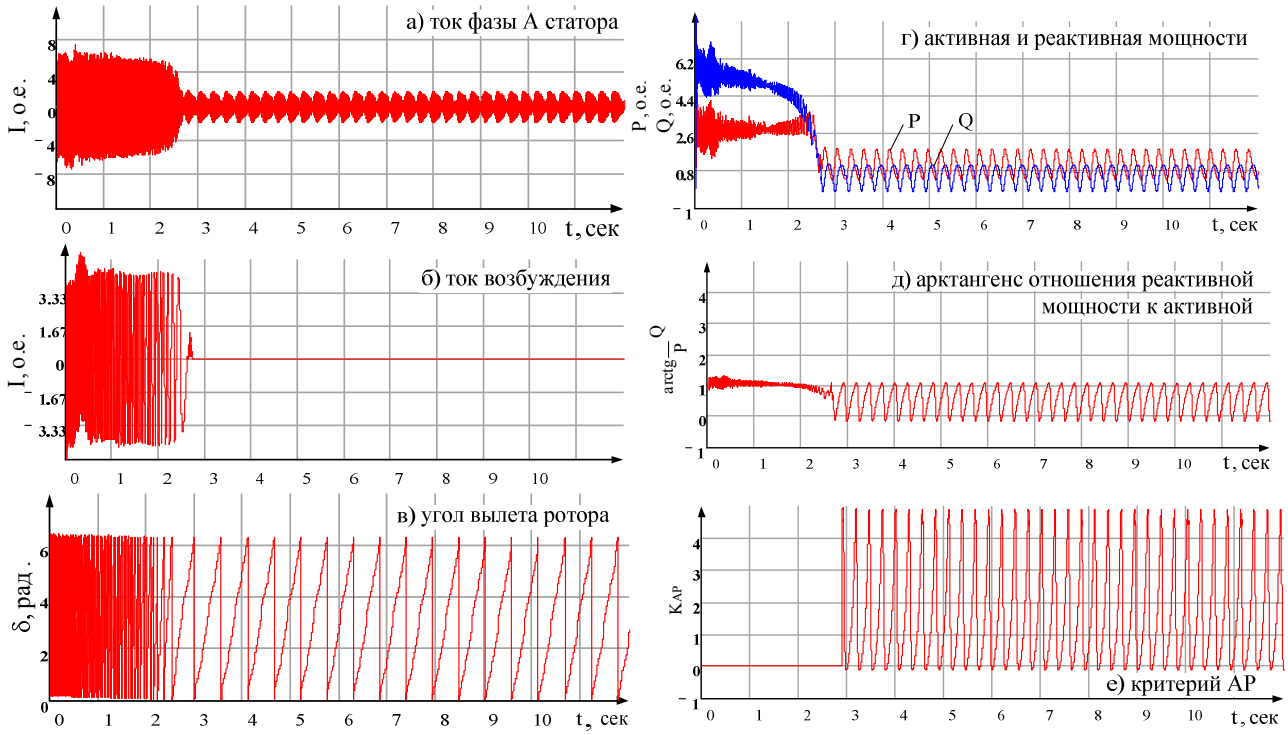


Рис. 2 Асинхронный режим СД при обрыве цепи в обмотке возбуждения.

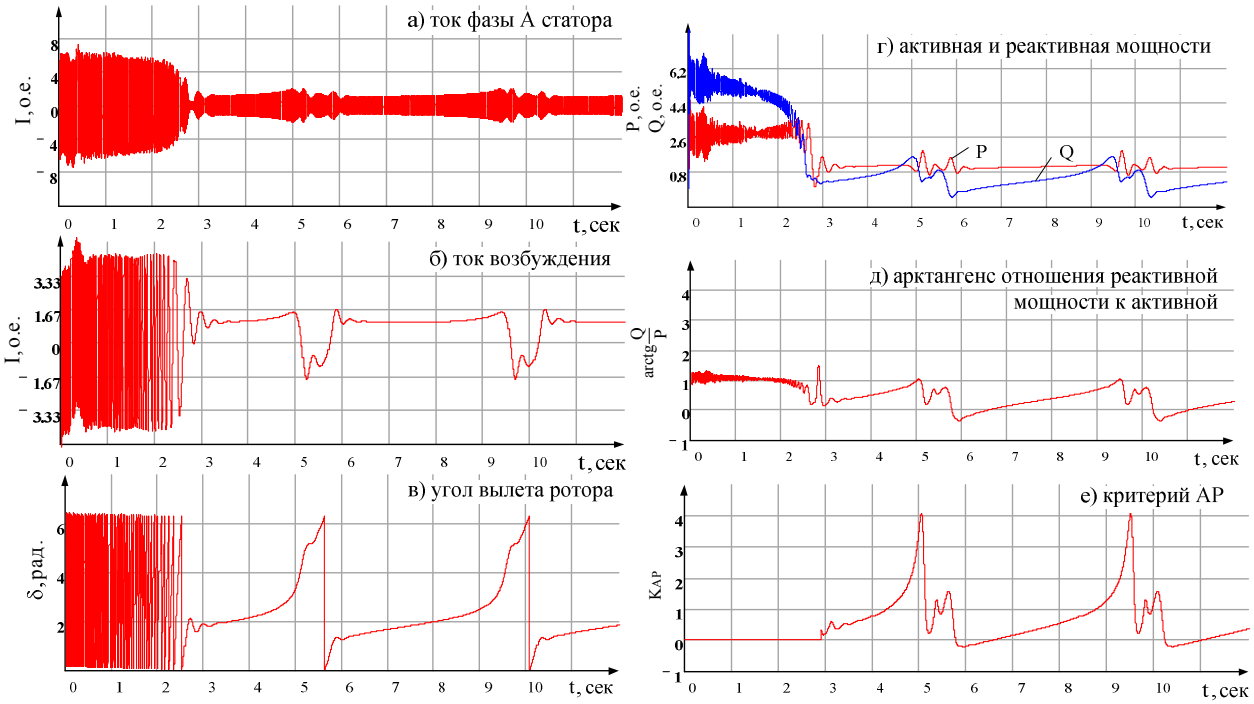


Рис. 3 Асинхронный режим возбужденного СД.

Критерий $K_{АР}(t)$ выявления АР описывается следующим аналитическим выражением:

$$K_{АР}(t)=\begin{cases}\dfrac{Q(t)}{P(t)}+\dfrac{Q^{n}(t)}{P^{n}(t)}, & \text{если} \quad Q(t)>0 \text{ и } t>T_{ПУСКА}\\ \dfrac{Q(t)}{P(t)}, & \text{если} \quad Q(t)<0\end{cases} \tag{2}$$

Значение показателя степени n в выражении (2) принимают от 1 до 2 в зависимости от типа СД и параметров его схемы замещения. Для примера на рис.4 показаны зависимости критерия $K_{АР}(t)$ и его составляющих от реактивной мощности Q(t) при P =1, и показателях степени n = 1,5 и 2,0.

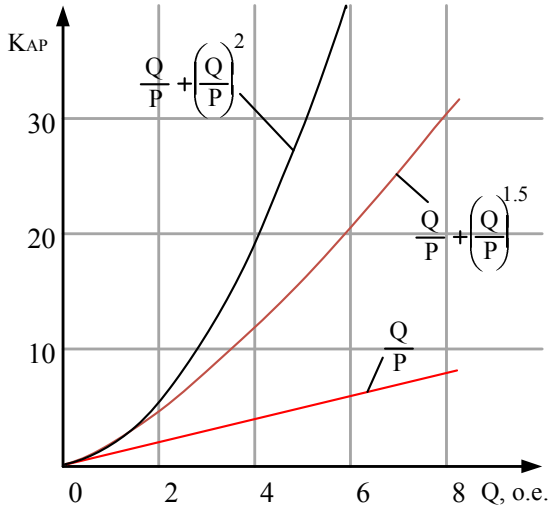


Рис. 4 Зависимость критерия $K_{АР}(t)$ от реактивной мощности Q и показателя степени n

В выражении (2) второй дополнительный член учитывает переход СД в режим потребления реактивной мощности, а также ее циклический рост и убывание за каждый проворот ротора и, как следует из рис.2, и рис. 3, он существенно превышает значение угла, определяемого по арктангенсу отношения реактивной мощности к активной. Кроме того, он более близок по величине и форме к углу вылета ротора, который имеет наибольшую информативность об АР. Отметим, что дополнительный член в (2) добавлен с учетом аналитического выражения производной от арктангенса, имеющей вид:

$$\frac{d\left[\text{arctg}\frac{Q(t)}{P(t)}\right]}{dt}=\left[1+\frac{Q^2(t)}{P^2(t)}\right]^{-1} \quad (3)$$

Преимуществом критерия АР по (2) является также его более простая реализация в микропроцессорных устройствах из-за исключения нелинейной функции арктангенса. Проведенные исследования также показали, что предложенный критерий может быть успешно применён и для явнополюсных СД. Условие срабатывания защиты от АР на основе предложенного критерия с учетом времени пуска двигателя $T_{ПУСКА}$ имеет следующий вид:

$$P(t) > 0 \text{ и } Q(t) > 0 \text{ и } t > T_{ПУСКА} \text{ и } K_{АР} > K_{УСТАВКИ} \quad (4)$$

Математическое моделирование режимов наброса и сброса нагрузки СД , а также режимов синхронных качаний показало, что ложной работы защиты от АР не наблюдается. В то же время было установлено, что этот принцип выполнения защиты может быть успешно применен и для выявления нарушения синхронной устойчивости узлов энергосистемы с двигательной нагрузкой.

Выводы.

1. Предложен новый критерий выявления АР синхронных двигателей, основанный на использовании линейной и нелинейной степенной зависимостей между отношениями активной и реактивной потребляемыми мощностями. Нелинейная составляющая критерия учитывается только при переходе СД в режим потребления и циклического изменения реактивной мощности. Использование этого критерия позволяет выявить АР турбодвигателей и явнополюсных СД как в случаях потери возбуждения, так и при АР возбужденных СД .

2.Эффективность работы предложенной защиты от АР подтверждена результатами математического моделирования для различного типа синхронных двигателей.

Список литературы: 1. Сивокобыленко В.Ф., Левшов А.В. Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима // Электрические станции, №2, 1989 С.75-80. **2.** Ванин В.Ч., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. Л.: Энергоатомиздат, 1991.-336 с. **3.** Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. М.:«Энергия», 1977.-216с. **4.** Гондуров С.А. Релейная защита электродвигателей напряжением 6-10 кВ терминалами БМРЗ: методика расчета/ С.А.Гондуров, С.В. Михалев, М.Г. Пирогов и др. **–** СПб.: ПЭИПК, 2013, 60 с. **5.** Сивокобыленко В.Ф. Лебедев К.В. Определение параметров схем замещения и характеристик синхронных турбодвигателей // Наукові праці ДонНТУ Серія «Електротехніка та електроенергетика» , Донецк ДонНТУ 2014. - №1(16). – С. 189-193. **6.** Сивокобыленко В.Ф. Ткаченко С.Н. Деркачев С.В. Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей // Журнал Электричество . – 2014.- №10. – С.38 – 44. **7.** Сивокобыленко В.Ф. Деркачев С.В. Математическая модель многомашинной системы для анализа поведения электродвигателей в режимах БАВР // Наукові праці ДонНТУ Серія «Електротехніка та електроенергетика», Донецк ДонНТУ 2014. - №1(16). – С. 171-178.

Bibliography (transliterated): 1. Sivokobylenko V.F., Levshov A.V. «Zashita synchronnych electrodvigateley ot asynchronnogo regima» // *Electricheskie stancii*, №2, 1989 P.75-80. Print. **2.** Vanin V.C., Pavlov G.M. *Releynaya zashita na elementah vychislitelnoy techniki*. Leningrad.: Energoatomizdat, 1991.-336 P. Print. **3.** Slodarg M.I. *Regimy raboty, releynaya zashita I avtomatika synchronnyh dvigateley*. Moskva. «Energia», 1977.-216 p. Print. **4.** Gondurov S.A. et al. *Releynaya zashita elektrodvigateley napryazeniem 6-10 kV terminalami BMRZ: metodika rascheta*: **–** SPb.: PEIPK, 2013, 60 p. Print. **5.** Sivokobylenko V.F. Lebedev V.K. «Opredelenie parametrov shem zameshenia i harakteristik synchronnyh turbodvigateley» // *Naukovi praci DonNTU Seria* «*Elektrotehnika ta elektroenergetika*», Donetsk, DonNTU 2014. - №1(16). – P. 189-193. Print. **5.** Sivokobylenko V.F. Tkachenko S.N. and Derkachev S.V. «Opredelenie parametrov shem zameshenia a harakteristik asynchronnyh dvigateley» // *Jurnal Elektichestvo*. – 2014.- №10. – P.38 – 44. Print. **6.** Sivokobilenko V.F. Derkachev S.V. «Matematicheskaya model mnogomashinnoy systemy dlya analisa povedenia elektrodvigateley v regimah BAVR» // *Naukovi praci DonNTU Seria* «*Elektrotehnika ta elektroenergetika*» , Donetsk, DonNTU 2014. - №1(16). – P. 171-178. Print.

Поступила (received) 02.07.2015

УДК 62-83

С. Г. ДЕЕВ, ст. преп., Запорожский национальный технический университет

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Введение. Большое распространение в современной промышленности, на транспорте и в других областях получают синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (СДПМ). По своим регулировочным характеристикам, массогабаритным показателям и энергопотреблению они имеют определённые преимущества по сравнению с другими типами существующих электродвигателей. Разработка и эксплуатация электроприводов с СДПМ осложняется наличием неопределённостей в таком электроприводе [2], и внешних воздействиях на него [3, 4]. Актуальной остаётся проблема энергосбережения, особенно в случаях использования электропривода в устройствах с автономными источниками питания и мобильных установках, как, например, в электротранспорте и электромобилях [1].

Цель работы. Синтез и анализ методов энергосберегающего робастного управления применительно к электроприводу с явнополюсным СДПМ.

Постановка задачи. Электропривод с СДПМ описывается следующей системой уравнений, записанных в синхронном базисе (d, q), связанном с вектором потокосцепления магнита [5, 6]

$$I\dot{\omega}=m+m_l\,, \tag{1}$$

$$m=1{,}5Z_p[\psi_m i_q+(L_d-L_q)i_d i_q]\,, \tag{2}$$

$$u_d=L_d pi_d+R_s i_d-L_q i_d\omega_e\,, \tag{3}$$

$$u_q=L_q pi_q+R_s i_q+L_d i_d\omega_e+\omega_e\psi_m\,, \tag{4}$$

где I – момент инерции ротора двигателя, ω – угловая скорость ротора, m – электромагнитный момент двигателя , m_l – неизвестный момент нагрузки, Z_p – число пар полюсов, ψ_m – магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, ω_e – электрическая угловая скорость ротора, L_d , L_q – индуктивности, i_d , i_q – составляющие токов статора, идущие на создание электромагнитного момента, u_d , u_q – напряжения, R_s – активное сопротивление меди статора.

1. Формирование робастного электромагнитного момента рассмотрено ранее в работах [3, 6, 7].

Примем I_0 , m_0 – номинальные известные значения; I_δ , m_δ – отклонения от номинальных значений. С учетом принятых обозначений уравнение (1) примет вид

$$I_0\dot{\omega}=m_0+f_m\,, \tag{5}$$

где неопределенность

$$f_m=-I_\delta\dot{\omega}+m_\delta+m_l\,.$$

Неопределённость вычисляется в наблюдателе неопределённости. Уравнение наблюдателя неопределённости определяется выражением

$$\dot{\hat{f}}_m=L[\hat{f}_m-(I_0\dot{\omega}-m_0)]\,, \tag{6}$$

где L – коэффициент усиления наблюдателя, $\hat{f}_m$ - оценка неопределенности f_m .

Для устранения необходимости использования производной скорости $\dot{\omega}$ вводим обозначение

$$\lambda=\hat{f}_m+LI_0\omega\,, \tag{7}$$

откуда следует уравнение наблюдателя

$$\hat{f}_m=\lambda-LI_0\omega\,. \tag{8}$$

с учетом (7) наблюдатель (6) принимает вид

$$\dot{\lambda}_m=L[\lambda-LI_0\omega+m_0]\,. \tag{9}$$

Преобразование позволяет вместо уравнения наблюдателя использующего $\dot{\omega}$, используется наблюдатель (8), (9), содержащий ω .

Комбинированный закон управления электромагнитным моментом задается в виде

$$m_0=m_{00}-\hat{f}_m\,, \tag{10}$$

где

$$m_{00}=-k_1(\omega-\dot{\omega}_p)\,, \tag{11}$$

k1 – коэффициент закона управления.

2. Регуляторы контуров тока. В приводе используются два робастных регулятора токов i_d и i_q , аналогичных регуляторам, рассмотренным в работах [6, 7]. Каждый из регуляторов тока включает в себя собственно регулятор и компенсатор с наблюдателем неопределённости. Датчики тока измеряют полный ток, состоящий из моментного тока и тока, соответствующего потерям в стали. В регуляторах токи потерь в стали, погрешности и изменения, связанные с отклонением от номинальных параметров и влиянием перекрёст-

© С.Г. Деев, 2015

ных связей, включены в неопределённости, которые оцениваться и компенсируются. В результате на выходе регуляторов тока формируются напряжения в базисе (d, q), которые после преобразования в трёхфазный базис ABC, используются в качестве управляющих сигналов для инвертора.

Исходная система при этом представлена с номинальными значениями параметров, на которую действует вектор неопределенности f_i .

Закон управления регулятора каждого из регуляторов тока тока имеет вид

$$u_p = k_{0^{-1}}[v(i_p - \hat{i}) - \hat{f}_i], \tag{12}$$

где v – постоянный коэффициент.

Для каждого контура тока синтезирован наблюдатель

$$p\hat{i} = -(T'_{s0})^{-1}\hat{i} + k_0 u_p + \hat{f}_i + l_1(\hat{i} - i), \tag{13}$$

$$p\hat{f}_i = l_2(\hat{i} - i), \tag{14}$$

где l_1 , l_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя неопределённости.

3. Минимизация потерь в электроприводе. Электрические потери в электроприводе включают потери в меди и стали [7, 8, 9, 10]

$$\Delta P = 1{,}5\,R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + 1{,}5\,R_c(i_{dc}^2 + i_{qc}^2), \tag{15}$$

где R_c – сопротивление, характеризующее потери в стали, i_{ds}, i_{qs} – полные токи статора, i_{dc}, i_{qc} – части составляющих токов статора, соответствующие потерям в стали, по осям d и q , при этом

$$i_{ds} = i_{dc} + i_d , \; i_{qs} = i_{qc} + i_q . \tag{16}$$

Сложность оптимизации по выражению (15) заключается в зависимости потерь мощности от переменных i_d , i_q и ω . Оптимальная зависимость соотношения токов i_d , i_q носит сложный характер

В данной работе для упрощения задачи оптимизации, на основании выражения (2) вводится новая переменная k так, чтобы можно было записать [7]

$$i_d = \frac{k - \psi_m}{L_d - L_q} , \; i_q = \frac{m}{1{,}5 Z_p k} . \tag{17}$$

Нелинейность магнитной системы в таком случае может быть учтена с помощью значений индуктивностей L_d , L_q , например [1, 12] (рис.1) с учётом того, что токи i_d , i_q связаны со значением тока статора i_s .

$$L_d = \frac{\psi_m - \psi_0 \cos\alpha}{i_d} , \; L_q = \frac{\psi_0 \sin\alpha}{i_q} . \tag{18}$$

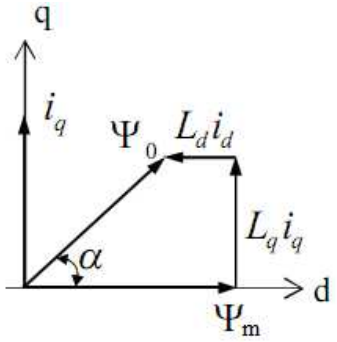


Рис.1. – Векторная диаграмма СДПМ

Для минимизации потерь в выражение (15) подставляются зависимости (17) и значения потерь в меди и стали [7] . Значение k , при котором потери мощности в электроприводе будут минимальными, определяется из уравнения

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial k} = 0 .$$

Найденное значение k с помощью выражений (17) позволяет определить значения программных токов i_{dp} и i_{qp} , соответствующих минимуму потерь.

На рис. 2 показана зависимость оптимального значения параметра k от угловой скорости ротора, рассчитанная по данным электродвигателя [7].

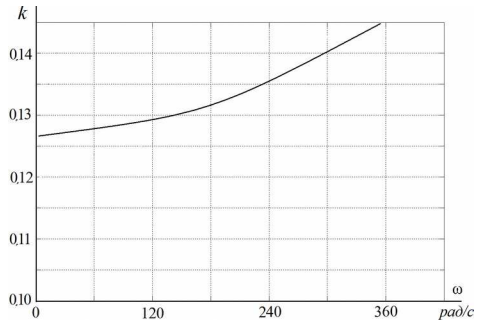


Рис.2. – Зависимость изменения параметра k от угловой скорости электропривода с СДПМ

Максимальное программное значение момента двигателя ограничивается максимально допустимым током статора

$$i_{s_{макс}} \geq \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \ . \qquad (19)$$

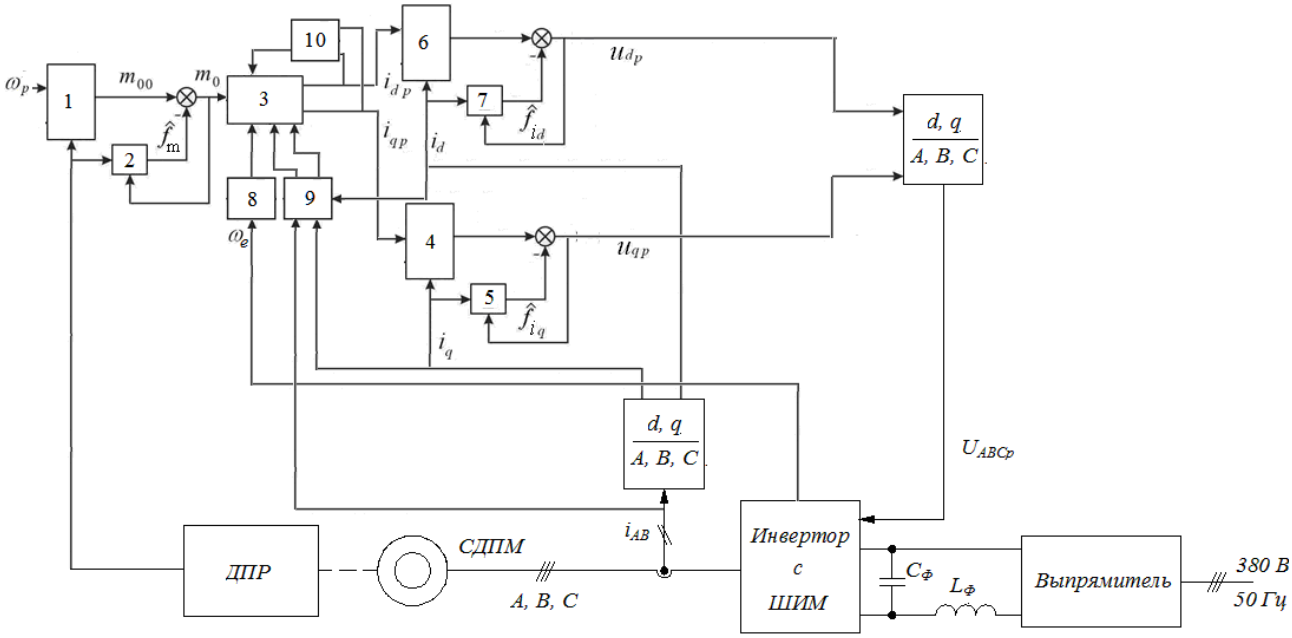


Рис.3. – Функциональная схема системы управления электроприводом.

4. Схема системы управления электроприводом показана на рис. 3. Формирователь момента 1, обеспечивающий робастное комбинированное управление с наблюдателем неопределённости 2, выполнен по уравнениям (5)–(11). Блок оптимизации 3 обеспечивает расчёт оптимальних программных токов i_{dp} и i_{qp} по уравнениям (17). Блок 9 определяет значения индуктивностей L_d , L_q , блок 8- текущее значение параметра k [7]. Регуляторы токов и компенсаторы неопределённости контуров токов i_d, i_q 6, 7 и 4, 5 соответственно построены по уравнениям (12)- (14) и уравнениям (19)–(21), приведенным в [7]. Регуляторы тока формируют программные напряжения в осях *d*, *q*, которые после преобразования в трехфазную форму подаются на инвертор в качестве управляющих сигналов. Блок 10 ограничивает максимально возможное значение програмного момента из условия ограничения максимально допустимого тока статора с учётом выражения (19).

Проведенное моделирование [11] подтвердило робастность разработанной системы.

Выводы. 1. Предложенный метод формирования статорных токов по критерию минимума потребляемой мощности обеспечивает формирование заданного электромагнитного момента и минимизацию энергопотребления в реальном времени и учитывает нелинейность магнитной цепи. 2. Простота расчёта оптимального значения токов i_d, i_q достигается за счёт введения дополнительного коэффициента k. 3. Робастность и простота управления электроприводом обеспечиваются за счёт применения робастных регуляторов электромагнитного момента и статорных токов.

Список литературы: 1. Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, Ki-Nam Kim. Equivalent circuit analysis of interior permanent magnet synchronous motor considering magnetic saturation. World Electric Vehicle Journal Vol.3. (2009), EVS24, Stavanger, Norway, May13-16, 2009. **2**. Толочко О.И. Особенности векторного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при учёте потерь в стали [Текст]/ О.И. Толочко, В.В. Божко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Кременчук:КрНУ, 2012.-Вип.3/2012(19) – с. 58–59. 3. Holtz J. Special section on sensorless control of synchronous machine drives/ Industrial electronics, IEEE TRANSACTIONS, 2006, Vol.2, p.350-458. **4**. Vas P. Sensorless and direct torque control. – Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1998–728 p.**5**. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст]/ А.В. Виноградов// Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленинаю: –Иваново, 2008, 298 с. **6.** Деев С.Г. Принципы формирования робастного управления синхронным электроприводом [Текст]/ С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Тематический выпуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Киев: Техника. – 2011. – №3. – с. 58–59. **7.** Деев С.Г. Робастное энергосберегающее управление синхронным электроприводом [Текст] / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Вісник національного університету «Харьковський політехнічний інститут» Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36(1009). – с. 97–99. **8.** Vaez S., John V.I., Rahman V.A. An On-line loss Minimization Conroller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion, 1999, №4, p.1435-1440. **9.** Monajemy R. Control and Dynamics of Constant Power Loss Based Operation of Permanent Magnet Motor Drive System. IECON'99. The 25th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999, p.1-6. **10.** Деев С.Г. Энергетические и регулировочные характеристики многодвигательных электроприводов переменного тока [Текст] / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Вісник Кременчуцького державного університету. – Кременчук: КДУ. – 2011. – Випуск 1/2011, Ч. 1. – с. 136–137. **11**. Деев С.Г. Робастное управление електроприводом с синхронным двигателем с постоянными магнитами [Текст] / С.Г. Деев, Е.М. Потапенко // Электротехнические и компьютерные системы. Тематический выпуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Киев: Техника. – 2014. – №15 (91). – с. 75–78. **12.** Щур І.З. Система керування синхронною машиною з постійними магнітами з максимальною енергетичною ефективністю при ослабленні поля. [Текст] / І.З. Щур, М.Ф. Манзюк // Вісник національного університету «Харьковський політехнічний інститут» Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36(1009) с. 263-266.

Bibliography (transliterated): 1. Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, Ki-Nam Kim. Equivalent circuit analysis of interior permanent magnet synchronous motor considering magnetic saturation. World Electric Vehicle Journal Vol.3. (2009), EVS24, Stavanger, Norway, May13-16, 2009. **2.** Tolochko O.I. and Bozhko V.V. Osobennosti vektornogo upravleniya sinhronimi electrodvigateliami s postoiannimi magnitami pri uchiote poter v stali [Features vector control of synchronous motors with permanent magnets in registered losses in the steel] (2012) Electromehanichni i energosberigauchi sistemi/ Tematicheskiy vipusk "Ploblemi avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika", Kremenchuk, Ukraine: Vol.3 – pp. 58–59. (In Russian).**3**. Holtz J. Special section on sensorless control of synchronous machine drives/ Industrial electronics, IEEE TRANSACTIONS, 2006, Vol.2, p.350-458. **4.** Vas P. Sensorless and direct torque control. – Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1998 – 728 p. **5.** Vinogradov A.B. Vectornoie upravlenie electroprivodami peremennogo toka [Vector Control AC Drives] (2008) Ivanovskiy gosudarstvenniy energeticheskiy institute imeni V.I. Lenina, Ivanovo, Russia, 298 p. (In Russian). **6.** Deev S.G. and Potapenko E.M. Principi formirovaniya robastnogo upravleniya sinhronnim elekroprivodom [Principles of formation of robust control synchronous electric drive], (2011). Tematicheskiy vipusk "Ploblemi avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika". – Kiev, Ukraine: Tehnika. Vol.3 – pp. 58–59. (In Russian). **7.** Deev S.G. and Potapenko E.M. Robastnoe energosberegaiutsheye upravlenie sinhronnim elekroprivodom [Robust energy-saving control synchronous electric drive], (2013). Vesnik natchionalnogo universiteta "Harkovkiy politehnicheskiy institute" Tematicheskiy vipusk "Ploblemi avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika". – HNU "HPI" Pabl.,, Kharkov, Ukraine, Vol.3 – pp. 58–59. (In Russian). **8.** Vaez S., John V.I., Rahman V.A. An On-line loss Minimization Conroller for Interior Permanent Magnet Motor Drives. IEEE TRANSACTIONS on Energy Conversion, 1999, Vol.4, pp.1435-1440. **9**. Monajemy R. Control and Dynamics of Constant Power Loss Based Operation of Permanent Magnet Motor Drive System. IECON'99. The 25th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999, pp.1-6. **10.** Deev S.G. and Potapenko E.M. Energeticheskie I regulirovochnie kharakteristiky mnogodvigatelnih electroprivodov peremennogo toka [Power and control characteristics multiengine AC drives] (2011) Visnik Kremenchuckogo derzhavnogo universitetu, Kremenchuk St.Univ Pabl., Kremenchuk, Ukraine, Vol.1, pp. 136–137. (In Russian). **11.** Deev S.G. and Potapenko E.M. Robastnoe upravlenie elekroprivodom s sinhronnim dvigatelem s postoyannimy magnitami. [Robust control synchronous electric drive] Electrotechnic and computer system. Tematicheskiy vipusk "Ploblemi avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika– Kiev, Ukraine: Tehnika. Vol.19(91) – pp. 75–78. (In Russian). **12.** Shchur I.Z.? Mandzuk M.F. Sistema keruvannia sinhronnoiu mashinoiu z postiynimi magnitami z maximalnoiu energetichnoiu efektivnistu pri oslableni polia [The control system of synchronous motor with permanent magnets with maximum energy efficiency with the weakening of the field], (2013). Vesnik natchionalnogo universiteta "Harkovkiy politehnicheskiy institute" Tematicheskiy vipusk "Ploblemi avtomatisovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika". – HNU "HPI" Pabl.,, Kharkov, Ukraine, Vol.3 – pp. 263–286. (In Ukrainian).

Получено (received) 27.08.2015

УДК 621.313

В.К. ТЫТЮК, канд.техн.наук, доцент ДВНЗ «Криворожский национальный университет»

ПУТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЯЕМОГО ЗАПУСКА

Постановка задачи. Особую значимость пусковым процессам придает, с одной стороны, тот факт, что, с одной стороны, работа практически всех производственных процесса начинается с запуска именно электрического двигателя, а с другой стороны –широким спектром воздействий пускового процесса на работе электромеханической системы (ЭМС) и окружающий ее техноценоз.

Процесс запуска ЭМС является одним из наиболее энергетически напряженных режимов работы ЭМС, что связано с необходимостью сообщения кинетической энергии движущимся частям ЭМС. Значительные пусковые токи обуславливают особый режим нагрева электродвигателя, а значительные знакопеременные составляющие электромагнитного момента вызывают значительные вибрации и удары в механической передаче ЭМС, что обуславливает ускоренный износ электромеханического и технологического оборудования в процессе запуска. Пусковые провалы напряжения приводят к появлению целого ряда экономических рисков, связанных с недовыпуском готовой продукции вследствие снижения производительности или вынужденного простоя оборудования. Таким образом, влияние пусковых процессов, особенно электроприводов большой мощности, на экономические показатели предприятия является недооцененным и мало изученным.

Поэтому развитие теории оптимальных ЭМС управляемого запуска будет способствовать повышению технико-экономических показателей ЭМС, что и определяют высокую актуальность работы.

Материалы исследования. Анализ процессов запуска электромеханической системы основывается на классических положениях и законах классической механики – законе Ньютона, законе сохранения момента импульса, [1].

Рассмотрим уравнение динамики вращательного движения в форме закона сохранения импульса для вращательного движения, которое задается выражением

$$\frac{d\left(J_{\Sigma}\cdot\omega\right)}{dt}=\left(T_{e}-T_{l}\right) \tag{1}$$

где J_{Σ} - суммарный приведенный к валу электропривода момент инерции ЭМС, T_e, T_l – электромагнитный момент электродвигателя и статический момент сопротивления рабочей машины соответственно.

Выполняя дифференцирование этого уравнения, получим следующее:

$$J_{\Sigma}\cdot\frac{d\omega}{dt}=\left(T_{e}-T_{l}\right)-\omega\cdot\frac{J_{\Sigma}}{dt} \tag{2}$$

Рассмотрим взаимовлияние ЭМС и её техноценоза.

Основными факторами, влияющими на развиваемый электроприводом вращающий момент, является состояние электроснабжающих сетей и техническое состояние самого электродвигателя.

Неидеальность сетей электроснабжения, а именно - отклонение фактических параметров питающего напряжения от номинальных значений, наличие несимметрии фазных напряжений, сложный гармонический состав сетевого напряжения – все это в разной степени снижает развиваемый электродвигателем вращающий момент. Неидеальность двигателя, которая возникает в ходе эксплуатации либо после некачественного ремонта, и проявляется в виде несимметрии электрических параметров обмоток статора и ротора, в несимметрии магнитной системы, также приводит к появлению токов обратных последовательностей, ухудшает пусковые свойства электродвигателей.

Существенное влияние на процесс запуска ЭМС оказывает рабочая машина ЭМС, определяющая параметры и характер изменения момента сопротивления электропривода $\boldsymbol{T_l}$ и суммарного приведенного момента инерции $\boldsymbol{J_{\Sigma}}$. Механические характеристики реальных механизмов лишь приближенно описываются известной формулой Бланка в основном из-за того, что в момент трогания силы и моменты сопротивления покоя могут превышать их значения при установившемся движении [2]. Существование проблемы трогания констатируется в работах [3, 4], а обобщающие результаты исследований и классификация механизмов с особыми условиями запуска приведены в [5].

Рассмотрим основные направления обратного воздействия процесса запуска ЭМС на окружающий техноценоз.

Процесс запуска ЭМС является одним из наиболее энергетически напряженных режимов работы ЭМС, что связано с необходимостью сообщения кинетической энергии движущимся частям ЭМС. Работа в пусковом режиме, близком к режиму короткого замыкания, сопровождается 5–7 – кратными пусковыми токами, значительными потерями в обмотках электрической машины, и, соответственно, значительным энергопотреблением электрической машины.

© В.К. Тытюк, 2015

Анализ многочисленных исследований надежности электрических машин, [6, 7], показывает существенное влияние пусковых процессов ЭМС на износ электромеханического и технологического оборудования и его остаточный технический ресурс.

Пусковые провалы напряжения приводят к появлению целого ряда экономических рисков. Эти риски связаны со следующими основными факторами:

- вследствие снижения напряжения на период запуска возникает риск недовыпуска готовой продукции, связанный со снижением производительности технологических механизмов, электроприводы которых подключены к общему узлу электроснабжения. В сложных случаях может происходить отключение этих электроприводов с полной остановкой технологических механизмов;

- вследствие неудавшегося запуска возникает риск недовыпуска готовой продукции, связанный с вынужденным простоем технологического оборудования на период времени, необходимый для подготовки и проведения повторного запуска. Для крупных СД этот период времени регламентируется правилами эксплуатации и может достигать двух часов.

Следует учитывать вероятностный характер этих дополнительных рисков. Вероятность их возникновения и вероятная величина экономического ущерба зависят от множества внешних факторов, находящихся вне зоны влияния и контроля запускаемой ЭМС.

Снижение влияния пусковых процессов ЭМС на техноценоз достигается применением специальных пусковых устройств. Очевидно, что различные траектории запуска ЭМС будут иметь не только различное время запуска, но также и различные затраты на осуществление процесса запуска. Таким образом, задачу оптимизации процесса запуска ЭМС можно отнести к классу задач энергоресурсосбережения, когда необходимо установить некоторый разумный компромисс между затратами на осуществление процесса запуска, которые состоят из затрат электроэнергии, износа электромеханического оборудования и риском дополнительного экономического ущерба. При создании оптимальных ЭМС управляемого запуска необходимо учитывать и величину положительного эффекта, создаваемого ЭМС управляемого запуска. В современной научно-технической литературе принципиально не освещен вопрос о том, в чем же состоит «полезность» процесса запуска, каким образом положительный эффект процесса запуска влияет на показатель качества траектории запуска.

В современной теории пусковых разработаны физико-математические модели электродвигателя и рабочей машины, позволяющие анализировать режимы их работы, выполнены исследования влияния пусковых режимов на надежность и технический ресурс элементов ЭМС, развита схемотехника построения преобразовательных устройств, которые могут реализовывать самые сложные законы управления питающим напряжением, синтезированы алгоритмы управляемого запуска для механизмов со сложными условиями запуска.

Научная проблема состоит в том, что современная теория пусковых ЭМС, ограниченная рамками технической модели, не содержит методов построения оптимальных ЭМС, обеспечивающих согласованное с экономической целью производственной системы управление процессом запуска.

ЭМС является одной из многих подсистем предприятия и, естественно, её работа должна быть подчинена достижению системной цели предприятия. А эта цель, к огромному сожалению, лежит не в технической, а в чисто экономической плоскости.

Как и всякая производственная система, ЭМС для выполнения своих функций использует входные продукты и энергию, а по завершении успешного запуска создает полезный выходной продукт, а значит создает и добавленную стоимость. Этот процесс существует объективно, но не затронут в современной теории пусковых ЭМС.

Сформулируем цель функционирования ЭМС как обеспечение максимально возможной величины создаваемой в процессе запуска добавленной стоимости.

Развитые в рамках современной теории пусковых ЭМС модели оперируют с сигналами технического уровня и не содержат блоков и модулей, необходимых для определения величины входных и выходных продуктов. Например, для определения сигналов электрической мощности нам нужны вычислительные блоки, использующие сигналы тока и напряжения. Аналогичные элементы понадобятся нам и для вычисления прочих сигналов продуктового уровня модели ЭМС.

Что же именно является входными и выходными продуктами ЭМС?

В общем случае в процессе запуска может выполняться основной технологический процесс, например, осуществляться некоторое перемещение груза. Поэтому на входе и выходе ЭМС присутствуют вектор входных и выходных продуктов технологического процесса, выполняемого ЭМС.

Одним из важнейших входных продуктов процесса запуска является величина технического ресурса оборудования, использованного в процессе запуска.

Для реализации запуска ЭМС использует электрическую энергию.

Существенным отличием ЭМС является то, что она создает уникальный, присущий только этой системе выходной продукт, который проявляется в виде кинетической энергии движущихся частей ЭМС. Очевидно, что механизм, находящийся в состоянии равномерного движения обладает более высокой ценностью, чем тот же механизм, находящийся в состоянии покоя.

Формирование сигналов продуктового уровня - потребляемой электроэнергии, износа оборудования и выходного продукта ЭМС осуществляется функциональными преобразователями на основе технических сигналов ЭМС.

Внутренняя структура таких функциональных преобразователей рассматривалась в работах автора [8, 9].

Столь сложный, разнородный состав входных и выходных продуктов процесса запуска обуславливает сложность их применения для задачи оценки качества процесса запуска. Так как входные и выходные продукты ЭМС рассматриваются в их количественном выражении, то их значения нельзя объединять между собой из-за проблемы размерности.

Для преодоления проблемы размерности необходимо применить полное агрегирование входных и выходных продуктов в один класс с применением сопоставимых единиц измерения. Для технических систем в качестве таких единиц измерения целесообразно использовать стоимостные оценки, как экономически обоснованную разновидность метода экспертных оценок. Такой подход дополнительно существенно снижает субъективность при определении числовых значений весовых коэффициентов.

При использовании этого подхода векторы продуктов ЭМС преобразуются в сигналы стоимостных оценок и агрегируются в одномерные сигналы суммарной стоимостной оценки продуктов, которые после интегрирования за время запуска образуют скалярные характеристики процесса запуска - интегральные стоимостные оценки входных и выходных продуктов процесса запуска.

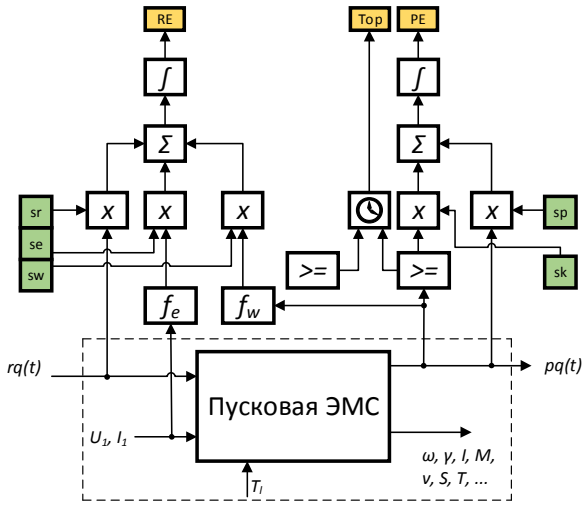


Рисунок 1 - Структурная схема подсистемы определения кибернетических показателей процесса запуска ЭМС

Предложенный подход позволяет последовательно перейти от анализа мгновенных значений технических сигналов через стоимостные оценки продуктов запуска к анализу процесса запуска, основанном на трех скалярных показателях: *RE* – интегральная величина стоимости входных продуктов ЭМС (экономические затраты); *PE* - интегральная величина стоимости выходных продуктов ЭМС (экономический доход); *Top* – длительность процесса запуска.

В силу универсальности этих показателей, присущих любой пусковой ЭМС, независимо от ее конструкции, первые две характеристики процесса запуска следует отнести к кибернетическому уровню сигналов модели ЭМС. На рис.1 представлена структурная схема подсистемы определения кибернетических показателей процесса запуска ЭМС, реализующая изложенную выше методологию.

На основании анализа научной литературы, [10, 7, 11], в качестве критерия качества процесса запуска был обоснован критерий эффективности процесса запуска, использующий в своей структуре все кибернетические характеристики процесса запуска:

$$E = \frac{\left(PE - RE - FE\right)^2}{PE \cdot RE \cdot T_{op}^2} \qquad (3)$$

где *PE, RE* – интегральная величина стоимости выходных и входных продуктов процесса запуска ЭМС; Top – длительность процесса запуска; *FE* – интегральная величина дополнительных рисков процесса запуска.

Для изучения поведения показателя эффективности процесса запуска было использовано математическое моделирование. По приведенной выше структурной схеме была реализована подсистема определения показателя эффективности процесса запуска, которая подключалась к моделям электроприводов постоянного и переменного тока. В качестве параметра управления рассматривалось изменение времени линейной развертки управляющего напряжения преобразователя. Предложенная структура подсистемы определения показателя эффективности процесса запуска является инвариантной относительно типа электропривода и конструкции преобразовательного устройства. Результаты исследований показателя эффективности процесса запуска представлены на рис.2.

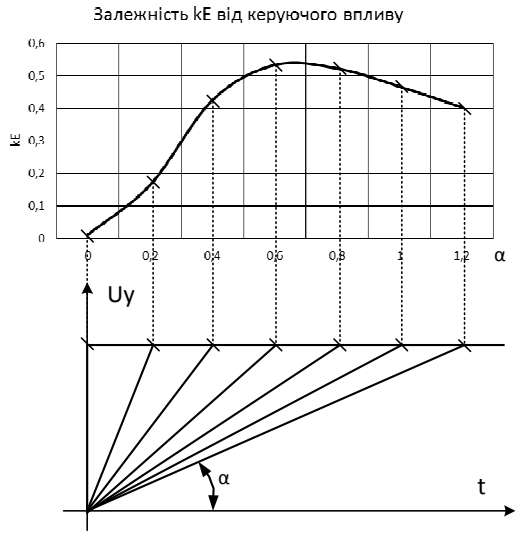


Рисунок 2 – Зависимость показателя эффективности процесса запуска от длительности линейной развертки управляющего напряжения

Зависимость показателя эффективности процесса запуска от времени развертки имеет явно выраженный экстремальный характер для всех рассмотренных типов электроприводов.

Выводы. Современная теория пусковых ЭМС была обогащена схемотехническим решением универсальной надстройки для определения кибернетических показателей пускового процесса – интегральных стоимостных оценок входных и выходных продуктов. Впервые введен показатель эффективности процесса запуска и обоснована возможность его применения для выбора оптимальной траектории запуска ЭМС. Подтверждена независимость синтезированной структуры определения показателя эффективности процесса запуска от конструкции ЭМС. Установлен экстремальный характер критерия эффективности процесса запуска от управляющих воздействий, что позволяет однозначным образом установить оптимальную траекторию запуска из множества доступных. Максимизация вклада ЭМС управляемого запуска в целевой продукт производственной системы достигается расширением структуры пусковой ЭМС, обеспечивающей измерение количественных оценок входных и выходных продуктов процесса запуска, определение интегральной величины стоимостных оценок входных и выходных продуктов процесса запуска, определение времени процесса запуска и формирование управляющего сигнала, рассчитанного по критерию эффективности процесса запуска.

Список литературы: 1. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика. Теоретическая физика.. — М.: Наука, 1988. — Т. 1 : 214 с. **2**. *Гладырь А.И.* Трогание и пуск как фазы единого процесса // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов Кременчугского государственного политехнического университета.– Кременчуг: КГПУ. — 2001. — 1(10). — С. 24-29. **3**. *Клепиков В.Б., Кутовой Ю.Н.* К природе автоколебательных режимов в электроприводах шаровых мельниц // Науковий вісник Дніпропетровського національного гірничого університету. — 2004. — Вип. 3. — С. 29-30. **4**. *Фираго Б.И., Павлячек Л.Б.* Теория Электропривода. — Мн: ЗАО "Техноперспектива", 2004. — 527 с. **5**. *Черный А.П. Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н.* Пусковые системы нерегулируемых электроприводов. — Кременчуг : Ч.П. Щербатых А.В., 2006. **6**. *Ванеев Б.Н., Главный В.Д., Гостищев В.М., Сердюк Л.И.* Надежность асинхронных электродвигателей: Под ред Б.Н. Ванеева / Под ред. Б.Н. Ванеева. — К.:Техніка, 1983. — 143 с. **7**. *Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С.* Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем. — Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. — 246 с. **8**. *Тытюк В.К., Харченко В.В.* Разработка инструментальных средств для измерения мощности в математических моделях // Вісник Криворізького технічного університету. — 2012. — Вип. 31.. — С. 211-215. **9**. *Титюк В.К., Михайленко А.Ю.* Математична модель визначення вартісної оцінки експлуатаційного зносу обладнання // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. — 2010. — Вип.3(11). — С. 139-141. **10**. *Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А.* Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ, Кременчуг. — 2002. — Вып.1. — С. 81-85. **11**. *Луценко И.А.* Основы теории эффективности. — Канада : Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., 2012. — 65 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Landau L. D., Lifshits E. M.* Mehanika. Teoreticheskaya fizika.. — M.: Nauka, 1988. — T. 1 : 214 c. **2.** *Gladyir A.I.* Troganie i pusk kak fazyi edinogo protsessa // Problemyi sozdaniya novyih mashin i tehnologiy. Sb. nauchnyih trudov Kremenchugskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta.– Kremenchug: KGPU. — 2001. — 1(10). — C. 24-29. **3.** *Klepikov V.B., Kutovoy Yu.N.* K prirode avtokolebatelnyih rezhimov v elektroprivodah sharovyih melnits // Naukoviy vIsnik DnIpropetrovskogo natsIonalnogo gIrnichogo unIversitetu. — 2004. — Vip. 3. — C. 29-30. **4.** *Firago B.I., Pavlyachek L.B.* Teoriya Elektroprivoda. — Mn: ZAO "Tehnoperspektiva", 2004. — 527 c. **5.** *Chernyiy A.P. Gladyir A.I., Osadchuk Yu.G., Kurbanov I.R., Voshun A.N.* Puskovyie sistemyi nereguliruemyih elektroprivodov. — Kremenchug : Ch.P. Scherbatyih A.V., 2006. **6.** *Vaneev B.N., Glavnyiy V.D., Gostischev V.M., Serdyuk L.I.* Nadezhnost asinhronnyih elektrodvigateley: Pod red B.N. Vaneeva / Pod red. B.N. Vaneeva. — K.:TehnIka, 1983. — 143 c. **7.** *Chernyiy A.P., Rodkin D.I., Kalinov A.P., Vorobeychik O.S.* Monitoring parametrov elektricheskih dvigateley elektromehanicheskih sistem. — Kremenchug: ChP Scherbatyih A.V., 2008. — 246 c. **8.** *Tyityuk V.K., Harchenko V.V.* Razrabotka instrumentalnyih sredstv dlya izmereniya moschnosti v matematicheskih modelyah // VIsnik KrivorIzkogo tehnIchnogo unIversitetu. — 2012. — Vip. 31.. — C. 211-215. **9.** *Tityuk V.K., Mihaylenko A.Yu.* Matematichna model viznachennya vartIsnoYi otsInki ekspluatatsIynogo znosu obladnannya // VIsnik Kremenchutskogo polItehnIchnogo unIversitetu. — 2010. — Vip.3(11). — C. 139-141. **10.** *Rodkin D.I., Chernyiy A.P., Martyinenko V.A.* Obosnovanie kriteriev kachestva preobrazovaniya energii v elektromehanicheskih sistemah // Problemyi sozdaniya novyih mashin i tehnologiy. Sb. nauchnyih trudov KGPU, Kremenchug. — 2002. — Vyip.1. — C. 81-85. **11.** *Lutsenko I.A.* Osnovyi teorii effektivnosti. — Kanada : Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., 2012. — 65 c.

Поступила (received) 10.07.2015

УДК-62-832

А. Н. МОИСЕЕВ, канд. техн. наук, старш. научн. сотр., НТУ «ХПИ»

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТУРБОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Введение. Назначение газораспределительных станций (ГРС) и газораспределительных пунктов (ГРП) понизить высокое давление газовой магистрали до значений необходимых потребителю. Обычно это осуществляют, как правило, путем дросселирования. Зачастую ГРС и ГРП расположены в отдалении от электрических сетей, поэтому подведение к ним линий электроснабжения требует значительных капиталовложений. Известно, что понижение давления можно осуществить с помощбю турбодетандера [1], с одновременным преобразованием избыточного давления газа в механическую энергию.

Постановка задачи. Обосновать построение автономного источника электропитания используя турбодетандер, в качестве источника механической энергии, определить рациональную структуру силовой электрической части и принцип регулирования выходных параметров. При этом учесть, что понижение давления газа сопровождается существенным понижением его температуры и выпадением конденсата, в тоже время температура газа на выходе с ГРС и ГРП должна быть не ниже 10^0С.

Исходя из этих требований, представляется целесообразным силовую часть источника электроэнергии для вышеуказанных потребителей выполнить по структуре «Турбодетандер-генератор-выпрямитель-автономный инвертор» [3, 4]. Такое исполнение позволяет обеспечить автономность источника электроэнергии, то есть устранить значительные затраты на подведение к ГРП и ГРС линий электропитания, сократить потери энергии за счет понижения давления не с помощью дросселирования, а за счет использования турбодетандера.

Материалы исследования. Наиболее распространенным вариантом исполнения автономного источника электропитания для ГРС и ГРП в настоящее время являются генераторные установки с двигателями внутреннего сгорания. Произведем оценку затрат на топливо по данному варианту, на примере автономного источника типа «Вепрь АДП 12-Т400 ВЛ-БС» с использованием дизельного двигателя внутреннего сгорания, исходя из коэффициента загрузки $К_з$=0,6 и к.п.д. = 40. Вышеуказанный автономный источник состоит из двигателя внутреннего сгорания, который сжигает V_0 = 4,36 литра топлива в час, и генератора который рассчитан на номинальную активную мощность Р = 9,6 кВт. Стоимость такой установки составляет $С_У$ = 54732 грн.[5].

При сжигании дизтоплива для выработки номинальной мощности за сутки необходимо сжечь

$$V_c = V_o \cdot К_з \cdot 24, \qquad (1)$$

где V_c – объем топлива за сутки, л;

V_o – объем топлива за час, л.

То есть за год, при стоимости дизтоплива $С_д$ = 20 грн. за литр, годовые затраты на топливо составляют

$$С_г = V_o \cdot К_з \cdot 24 \cdot С_д \cdot 365, \qquad (2)$$

или 458323 грн.

Расходы на обслуживание и ремонт составляют 10-15% от стоимости установки $Э_р = (0,1 \div 0,15)\ С_у$. Итого расходы на первый год эксплуатации равны

$$С_\Sigma = С_у + Э_р + С_г , \qquad (3)$$

или 558887 грн.

Кроме расходов на оплату топлива и обслуживание необходимо учесть дополнительные расходы на его транспортировку с баз нефтепродуктов до ГРС и ГРП, которые иногда находятся в отдалении от линий электроснабжения. Следует так же указать на негативный экологический эффект, вызываемый сжиганием нефтепродуктов и сопровождаемый выбросами в атмосферу продуктов горения. Существенным недостатком данного варианта являются значительные эксплуатационные расходы.

Другим вариантом автономного источника электропитания мог бы стать ветрогенератор [6]. В этом случае, как с экологической точки зрения, так и с точки зрения отсутствия затрат на энергоносители, данный вариант представляется благоприятным. Однако для ветрогенератора характерна зависимость вырабатываемой электроэнергии от наличия ветра достаточной силы. В условиях необходимости круглосуточного обеспечения ГРП и ГРС электроэнергией при данном варианте для полного удовлетворения нужд ГРС и ГРП потребовалось бы создание накопителя электроэнергии достаточно большой емкости, который бы обеспечивал ею ГРП и ГРС в периоды слабого ветра и его отсутствия. Оценим вариант системы автономного энергообеспечения на основе вертикального ветрогенератора EuroWind, мощностью 8кВт, который способен в месяц вырабатывать 2100 кВт·мес. (при среднегодовой скорости ветра 6 м/с). Максимальный запас энергии для автономной работы от ак-

© А.Н. Моисеев, 2015

кумуляторной батареи (АКБ) составляет 80 кВт·час. Автономная установка EuroWind должна включать в свой состав генератор EuroWind VS-10, коническую мачту 5,5м на которую устанавливается генератор, 54 аккумулятора AGM 200Ач, и инвертор 8 кВт 220В, посредством которого осуществляется преобразование постоянного напряжения в переменное. Стоимость перечисленного оборудования составляет 58924$ [7].

Однако даже при наличии буферной аккумуляторной батареи, обеспечивающей при безветрии бесперебойное питание, в случае отсутствия ветра более 3-7 дней, нельзя дать 100% гарантии бесперебойного электропитания, что для ГРС и ГРП недопустимо.

Рассмотрим целесообразность построения автономного источника электропитания для ГРП и ГРС на основе использования солнечной энергии. Данный вариант безупречен с экологической точки зрения, однако его недостатком является невыработка электроэнергии в ночные периоды и также снижение ее генерирования при облачной погоде. Кроме того этот вариант так же потребовал бы солнечной батареи значительно большей мощности по сравнению с номинальной нагрузкой для заряда буферной аккумуляторной батареи в дневной период и для обеспечения электроэнергией в ночной. Произведем стоимостную оценку системы автономного энергообеспечения на примере установки Солар48 8-160-Д3 мощностью 6 кВт, способной вырабатывать 1200 кВт·мес., Для обеспечения электропитания в ночное время необходимо иметь 32 аккумулятора AGM 200Ач, которые обеспечивали бы запас энергии на 48 кВт·час. Получение переменного напряжения обеспечивается двумя инверторами по 3 кВт 220 В Стоимость такого источника электропитания составляет 39530$. [8].

Сопоставление вышеприведенных данных показывает что рассмотренные варианты требуют либо значительных капитальных затрат, либо больших эксплуатационных расходов.

Рассмотрим целесообразность использования в качестве источника первичной энергии энергию газа, транспортируемого через ГРП и ГРС. В этом случае, с помощью турбодетандера, можно обеспечить создание механической энергии, необходимой для вращения электрогенератора и преобразование ее в электрическую энергию.

Достоинством данного решения являются:

– отсутствие необходимости подвода линий электропитания;

– хорошую технологическую сопрягаемость процесса выработки электроэнергии с транспортировкой газа;

– исключение необходимости подвоза топливных энергоресурсов для выработки электроэнергии;

– отсутствие экологически вредного воздействия на окружающую среду;

– экономичность процесса выработки электроэнергии за счет использования энергии газа при снижении давления в системах потребления.

Расчеты показывают, что стоимость электромеханического комплекса с турбодетандером мощностью 10 кВт не превышает 100 – 150 тыс. грн., т.е., многократно меньше ранее рассмотренных вариантов. Вышеуказанные преимущества определяют *целесообразность построения автономных источников электропитания для ГРС и ГРП с использованием в качестве источника механической энергии турбодетандера*.

Определим также другие принципы построения электромеханического комплекса автономного электропитания с турбодетандером для газораспределительных магистралей с учетом особенностей технологии газораспределения и требований к автономному источнику электроэнергии на ГРС и ГРП.

Использование турбодетандера для получения электрической энергии предполагает последовательное преобразование одного вида энергии в другой, а так же преобразование параметров электрической энергии [3,4]. На первом этапе тепловая энергия газа преобразуется турбодетандером в механическую энергию вращения его вала сочлененного с валом турбодетандера.

Электрогенератор производит преобразование данной механической энергии в электрическую энергию. Электрогенератор может представлять собой машину постоянного тока с независимым возбуждением, синхронный генератор или асинхронный. Как известно для электрических машин двух первых типов необходимо наличие первичного источника электропитания для цепей возбуждения (либо индуктора). Генератор постоянного тока требует, кроме того, больше эксплуатационных расходов, вследствие необходимости периодической смены щеток и проточки коллектора. Кроме того первые два типа генератора уступают асинхронному генератору по удельным весогабаритным и стоимостным показателям. Исходя из вышеприведенных преимуществ, для разрабатываемого источника электропитания, в качестве *преобразователя механической энергии в электрическую, целесообразно выбрать асинхронный генератор с самовозбуждением*. Целесообразность такого выбора объясняется отсутствием необходимости иметь дополнительный источник электрической энергии для возбуждения генератора, имеющего в начальный момент пуска лишь малое значение остаточной индукции магнитной системы. Под самовозбуждением понимают процесс нарастания выходного напряжения после начала вращения ротора генератора с малым начальным значением остаточной индукции. Процесс нарастания должен завершиться установившимся значением выходного напряжения заданной величины. Для успешного самовозбуждения необходимо, чтобы от периода к периоду происходило увеличение максимальных значений магнитной индукции, достигаемых при перемагничивании магнитной системы. Это обеспечивается наличием подключаемых на зажимы обмоток статора конденсаторов самовозбуждения.

Однако известно, что выходное напряжение асинхронного генератора с самовозбуждением существенно зависит от величины нагрузки, которая может изменяться в достаточно широких пределах.

В данной работе предлагается учесть и использовать технологические особенности газораспределения ГРС и ГРП. Как уже отмечалось, газ на выходе ГРС и ГРП имеет пониженную температуру, в то время как ее значение не должно быть ниже уставленной величины. Для обеспечения этого, газ подогревается, для чего используется сжигание части транспортируемого газа. Очевидно, при малых нагрузках на стороне переменного напряжения можно использовать недостающую до номинального значения часть электрической нагрузки для подогрева газа, с помощью тепловых электронагревательных устройств (ТЭН). Автоматически поддерживая суммарную нагрузку АГ на номинальном уровне, можно обеспечить стабильность его выходного напряжения и высокий КПД. Отсюда вытекает *целесообразность использования для стабилизации нагрузки АГ регулируемой балластной нагрузки, в виде ТЭНов подогрева газа*.

Вышеприведенный анализ позволяет сформулировать следующие принципы построения рационального источника электропитания для ГРС и ГРП:

– использовать в качестве источника механической энергии турбодетандер;

– преобразование механической энергии в электрическую осуществлять асинхронным генератором;

– стабилизацию выходного напряжения генератора осуществлять за счет регулируемой балластной нагрузки, в виде теплоэлектронагревательных элементов, подогревающих газ.

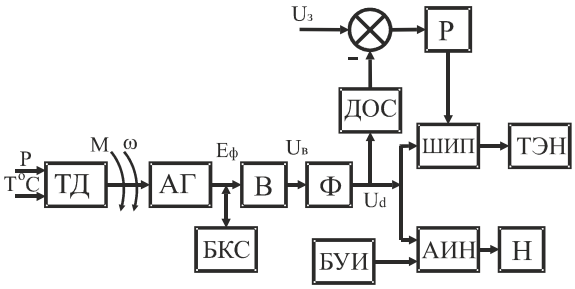


Рис 1 – Функциональная схема автономного источника питания

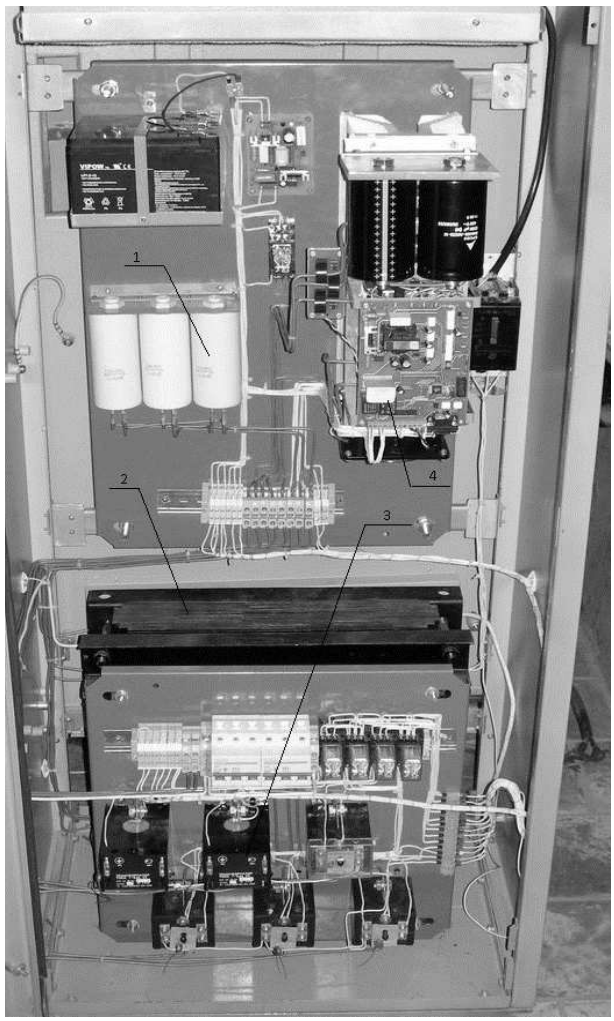


Рис. 2 – Функциональная схема автономного источника питания

С учетом вышеуказанных принципов предлагается функциональная схема автономного источника электропитания для ГРС и ГРП, представленная на рис. 1, где ТД – турбодетандер, выполняющий роль преобразователя энергии газа в механическую энергию вращения вала; АГ – асинхронный генератор, преобразующий механическую энергию в электрическую энергию 3^x фазного переменного тока; БКС – блок конденсаторов самовозбуждения, обеспечивающий самовозбуждение АГ, при отсутствии дополнительных источников электропитания, а также устойчивый режим работы АГ; В – Выпрямитель, преобразующий 3^x фазное переменное напряжение в постоянное; Ф – емкостной фильтр, сглаживающий пульсации выпрямленного напряжения; ШИП – широтно-импульсный преобразователь, который автоматически регулирует нагрузку АГ, поддерживая стабильность выпрямленного напряжения; АИН – автономный инвертор напряжения, преобразующий постоянное напряжение в переменное напряжение требуемого значения и формы; ДОС – датчик обратной связи по напряжению. При сравнении с сигналом задания формирует управляющий сигнал ключа широтно-импульсного преобразователя, изменяя время его включенного состояния и, соответственно, среднего тока балластной нагрузки; БУН – блок управления инвертором. Формирует импульсы управления ключами АИН, обеспечивая, за счет ШИМ модуляции, качественный гармонический состав синусоидального переменного напряжения; ТЭН – теплоэлектронагреватель, выполняющий двойную функцию: во-первых – подогрева газа, недоиспользованной мощностью по отношению к номинальной нагрузке инвертора, во-вторых – выполняет совместно с ШИП роль балластной регулируемой нагрузки на уровне номинальной, что в свою очередь обеспечивает стабильность выходного напряжения генератора; Н – нагрузка.

Преобразование энергии газа в магистральном трубопроводе происходит в следующей последовательности:

Газ от магистрали, подача которого регулируется вентилями, подается на ТД колесо которого, под давлением газа, приходит во вращение. Давление газа на выходе ТД понижается до значений требуемых потребителями. Вращательное движение ТД предается сочлененному с ним валами АМ, работающей в генераторном режиме и создающий для ТД тормозной момент. Благодаря наличию, подключенных к статорным обмоткам, конденсаторов самовозбуждения обеспечивается наличие переменного намагничивающего тока в статорной обмотке. Наводимое в статорных обмотках переменное напряжение выпрямляется неуправляемым мостовым выпрямителем, что исключает наличие постоянной составляющей магнитного потока в магнитной системе машины. Выпрямленное напряжение сглаживается емкостным фильтром, выполненным на основе электролитических конденсаторов. Это напряжение является напряжением питания для АИН, преобразующего постоянный ток в переменный, требуемый для нагрузок ГРС и ГРП, согласно технического задания. Вторым потребителем постоянного тока является ШИП с балластной нагрузкой в виде ТЭН, величина балластной нагрузки регулируется ШИП, благодаря регулятору напряжения, таким образом, чтобы изменение балластной нагрузки компенсировало изменение нагрузки инвертора, поддерживая при этом, напряжение на выходе выпрямителя, на заданном уровне. Такой принцип регулирования напряжения в свою очередь обеспечивает достаточную стабильность рабочей точки АГ, что очень важно, в связи с существующей зависимостью выходного напряжения от величины нагрузки.

С учетом сформулированных принципов, на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» изготовлено и передано для эксплуатации в ЧАО «Турбогаз» 4 комплекта электрооборудования источника электропитания, один из которых установлено на ООО «ГАЗПРОМТРАНСГАЗ ВОЛГОГРАД» (Российская Федерация) на станции ЛПУ МГ АГРС-5, что подтверждено соответствующим актом внедрения. Фото разработанного источника представлены на рис. 2.

Список литературы: 1. Truston A. Recovering energy in gas pressure reduction / Truston A. //Constr. and Instrum. – 1991. – №5., 2. Язик А.В. Утилизация потенциальной энергии газа на газораспределительных станциях в детандерных установках / ВНИИЭГазпром. – 1988. – вып. 4., 3. В.Б. Клепиков, В.И. Колотило, А.Н. Моисеев, Е.Ф. Банев. Синтез структуры источника электроэнергии для газотранспортной сети / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. –Кременчук: КДПУ. – 2007. – Ч.2, вип. 4(45). – С. 29 – 30., 4. В.Б. Клепиков, В И. Колотило, А.Н. Моисеев, Е.Ф. Банев. Обеспечение качества выходного напряжения энергосберегающего автономного источника электроэнергии для газотранспортных сетей / Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – Тематичний вип. – С. 543 – 544., 5.Макропром [электронный ресурс]. Режим доступа: http://http://www.mpelectro.su/dir/vepr/vepr_adp12_t400v_bc/34-1-0-90., 6. Freris, L. Wind Energy Conversion Systems / Freris,
L. – London: Prentice Hall, 1990. 7. Украинская альтернативная энергетика [электронный ресурс]. Режим доступа: http://wind.ae.net.ua.

Bibliography (transliterated): Truston A. Recovering energy in gas pressure reduction / Truston A. //Constr. and Instrum. – 1991. – №5. , 2. Yazik A.V. Ytilizacija hjtencialmoi energii gaza na gazorashredelitelnix stancijax v detandernix ystanovkax / VNIIE-Gasprom. – 1988. – 4., 3. Klepikov V.B., Kolotilo V.I., Moiseev A.N., Banev E.F. Sintez stryktyri istochnika elektroenergii dlja gazotransportnix / Vistnik Kremenchytskogo derjavnogo politexnichnogo yniversitety imeni Mixaila Ostrogradskogo. –Kremenchyk: KDPY. – 2007.2.4(45). 29 – 30. print, 4. Klepikov V.B., Kolotilo V.I., Moiseev A.N., Banev E.F. Obespechenie kachestva vixodnogo naprjajenija avtonomnogo istochnika elektroenergii / Dniprodzerjinsk : DDTY – 2007. 543–544 print., 5.Makroprom [elektronnii resyrs]. Rejim dostypa: http://http://www.mpelectro.su/dir/vepr/vepr_adp12_t400v_bc/34-1-0-90., 6. Freris, L. Wind Energy Conversion Systems / Freris, L. – London: Prentice Hall, 1990. 7. Ykrainskajaalternativnaja energetika [elektronnii resyrs]. Режим доступа: http://wind.ae.net.ua.

Поступила (received) 24.08.2015

УДК 621.3

А.А. ЧЕРНО, канд. техн. наук, доц. кафедры компьютеризированных систем управления, НУК, Николаев;
А.П. ГУРОВ, канд. техн. наук, проф. кафедры автоматики, НУК, Николаев

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА КПД

Введение. В современной промышленности для обеспечения многих технологических процессов широкое применение нашли вибрационные установки. К таким процессам относятся: вибрационное уплотнение бетонных смесей, вибрационное транспортирование, сепарация и многие другие [1]. Из известных видов вибрационных приводов наиболее перспективным является электромагнитный привод, обладающий такими преимуществами, как высокая надежность, большой рабочий ресурс, высокий коэффициент полезного действия (КПД) при работе в околорезонансном режиме, простота управления амплитудой колебаний, возможность создавать вибрации с частотами выше 100 Гц [3]. Устойчивая работа электромагнитного вибрационного привода в режиме, близком к резонансному, обеспечивается путем автоматического управления его частотой и амплитудой [7]. При этом частота должна выбираться из условия максимальной энергетической эффективности. Поэтому, актуальной задачей является определение частот, обеспечивающих максимальный КПД электромагнитного привода вибрационных установок.

Анализ последних исследований. В работе [6] путем численного моделирования проведены исследования энергетических характеристик управляемого электромагнитного вибрационного привода при варьировании частотой тока в обмотке вибратора, а также определена оптимальная частота, обеспечивающая максимум КПД. Этот результат может быть использован только для фиксированных параметров привода, рассмотренного в [6] в качестве примера.

Целью данной работы является получение регрессионной модели, позволяющей определять оптимальную по критерию максимума КПД частоту электромагнитного вибрационного привода для разных значений его параметров.

Материал исследования. Возьмем за основу вибрационный привод, рассмотренный в [6]. Он включает в себя электромагнитный вибратор и преобразователь частоты. Вибратор состоит из двух одинаковых электромагнитов, каждый из которых содержит U-образные сердечник и якорь с размещенной на них 4-хсекционной обмоткой. Магнитопровод изготовлен из шихтованной электротехнической стали 3413, толщина листа 0,35 мм. Сердечники жестко закреплены на неподвижной части вибратора, а якоря − на подвижной. Обмотки электромагнитов подключены параллельно. Основные параметры вибратора: b_m − ширина магнитопровода; h_m − толщина магнитопровода; H_{core} − высота сердечника; H_{anchor} − высота якоря; b_{pole} − ширина полюса; δ_0 − начальная величина воздушного зазора; W − число витков обмотки; R − активное сопротивление обмотки; n_{el} − число электромагнитов; c − жесткость упругой связи между подвижной и неподвижной частью; b_{spr} − коэффициент вязкого трения в пружинах вибратора; X_n − номинальная амплитуда относительных колебаний подвижной и неподвижной части; $P_{out.n}$ − номинальная выходная мощность. Значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 − Параметры электромагнитного вибратора

b_m, мм	h_m, мм	H_{core}, мм	H_{anchor}, мм	b_{pole}, мм	δ_0, мм	W	R, Ом	n_{el}	c, МН/м	b_{spr}, Н/(м/с)	X_n, мм	$P_{out.n}$, Вт
89	50	71	58	24	1,8	800	2,8	2	10	100	1	250

Преобразователь частоты включает в себя однофазный диодный выпрямитель, дроссель и однофазный инвертор, состоящий из 4-х транзисторов IGBT, включенных по мостовой схеме. Основные параметры преобразователя: f_{PWM} − частота сигнала широтно-импульсной модуляции; E_{on}, E_{off} и E_{rec} − потери энергии соответственно при открытии, закрытии транзистора и восстановлении встречного диода при стандартных значениях тока и напряжения I_{st} и U_{st}, приведенных в справочнике; U_{CE} − прямое падение напряжения на открытом транзисторе; U_{IF} − прямое падение напряжения на встречном диоде инвертора; U_{RF} − прямое падение напряжения на диоде выпрямителя; R_r − активное сопротивление обмотки дросселя. Значения параметров преобразователя частоты приведены в таблице 2.

Кроме перечисленных параметров электромагнитного привода, для расчета его энергетических характеристик необходимо также знать резонансную частоту виброустановки ω_r и частоту вибрации ω, которая в данной задаче является оптимизируемой величиной. Для рассматриваемой колебательной системы $\omega_r = 278$ рад/с (44,3 Гц).

© А.А. Черно, А.П. Гуров, 2015

Таблица 2 − Параметры преобразователя частоты

f_{PWM}, кГц	E_{on}, мкДж	E_{off}, мкДж	E_{rec}, мкДж	I_{st}, А	U_{st}, В	U_{CE}, В	U_{IF}, В	U_{RF}, В	R_r, Ом
8	390	150	35	10	400	1,75	1,9	0,8	0,2

Для упрощения задачи, в качестве оптимизируемой величины будем рассматривать не абсолютное значение частоты ω, а относительную частоту $\omega^* = \omega/\omega_r$. В работе [6] показано, что оптимальная частота отличается от резонансной ($\omega^*_{opt} < 1$), а ее значение зависит от величины выходной мощности P_{out}. Для того, чтобы из упомянутых выше параметров выделить факторы, которые также влияют на величину ω^*_{opt}, проанализируем физические явления, которые вызывают несоответствие между резонансной и оптимальной частотами.

На рис. 1 приведены временные диаграммы электромагнитной силы F, величины воздушного зазора δ и тока в обмотке I для частот $0{,}95\omega_r$ и ω_r, рассчитанные с помощью динамической модели, описанной в [5]. На частоте $0{,}95\omega_r$ амплитуда электромагнитной силы больше, чем при резонансе, но отставание относительного перемещения от силы по фазе − меньше. Поэтому, максимальным значениям силы на частоте $0{,}95\omega_r$ соответствуют значения воздушного зазора $\delta = 1$ мм, а на резонансной частоте − $\delta = 1{,}5$ мм. При меньшей величине зазора большее значение электромагнитной силы может быть получено при меньшей МДС, и, следовательно, при меньших потерях мощности. Поэтому, при уменьшении частоты вниз от резонансной, наблюдается увеличение КПД электромагнитного привода, обнаруженное в [6].

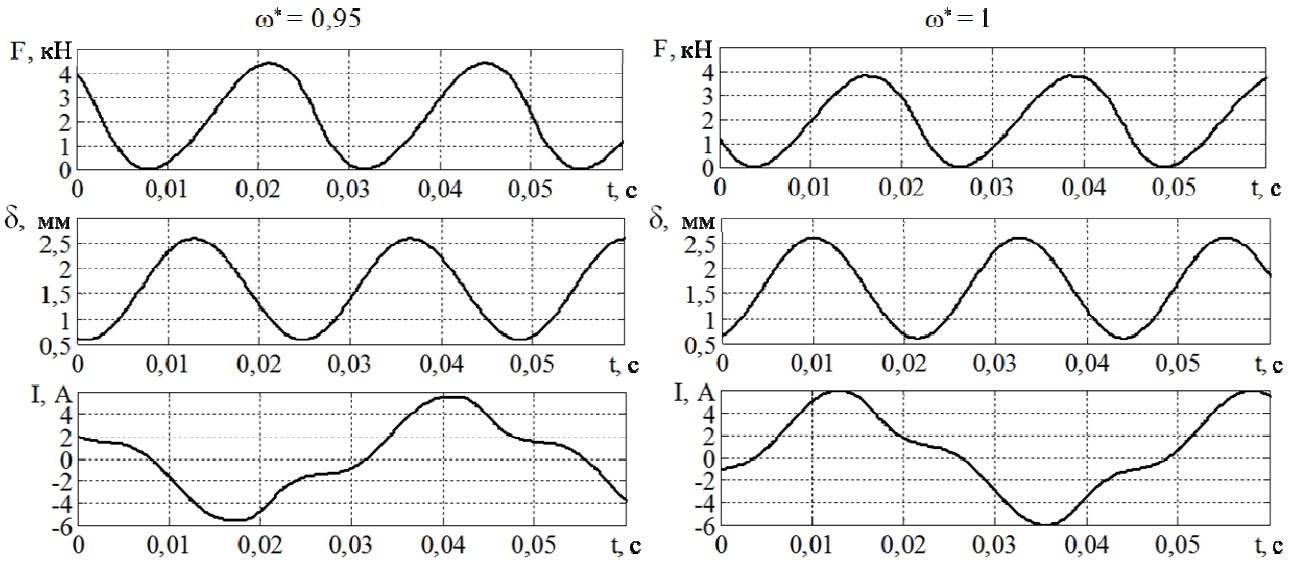


Рис. 1 Временные диаграммы электромагнитной силы, воздушного зазора и тока в обмотке вибратора

Таким образом, смещение оптимальной частоты в дорезонансную область обусловлено изменением величины воздушного зазора во времени. Следовательно, величина ω^*_{opt} зависит от факторов, оказывающих непосредственное влияние на пределы изменения воздушного зазора и на его фазу относительно электромагнитной силы. Этими факторами являются: жесткость пружин вибратора c, начальная величина воздушного зазора δ_0, амплитуда относительных колебаний якоря и сердечника X и выходная мощность P_{out}.

Поскольку величина δ_0 выбирается в зависимости от требуемой амплитуды X, эти два фактора нельзя считать независимыми. Поэтому, вместо δ_0 будем рассматривать величину $\delta'_0 = \delta_0 - X$.

Составим матрицу планирования численного эксперимента в соответствии с ортогональным планом второго порядка [2]. Для этого введем кодированные факторы $x_0, x_1, \ldots, x_{14}$, связанные с величинами c, δ'_0, X, P_{out} и между собой уравнениями:

$$x_1 = \frac{c}{2\cdot 10^6\,\text{Н}} - 4;\ x_2 = \frac{\delta'_0}{0{,}2\cdot 10^{-3}\,\text{м}} - 5;\ x_3 = \frac{X}{0{,}2\cdot 10^{-3}\,\text{м}} - 6;\ x_4 = \frac{P_{out}}{62{,}5\,\text{Вт}} - 3;$$

$$x_5 = x_1^2 - 0{,}8;\ x_6 = x_2^2 - 0{,}8;\ x_7 = x_3^2 - 0{,}8;\ x_8 = x_4^2 - 0{,}8;$$

$$x_9 = x_1x_2;\ x_{10} = x_1x_3;\ x_{11} = x_1x_4;\ x_{12} = x_2x_3;\ x_{13} = x_2x_4;\ x_{14} = x_3x_4.$$

Фактор $x_0 = 1$.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 3 (столбцы 6 − 20).

Таблица 3 − Значения факторов и результаты полного факторного эксперимента

№; , МН/	δ_0', мм	X, мм	P_{out}, Вт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	ω^*_{opt}	$\tilde{\omega}^*_{opt}$	$\Delta\omega^*_{opt}$
1	6	0,8	1	125	1	−1	−1	−1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1	0,929	0,932	0,003
2	10	0,8	1	125	1	1	−1	−1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	−1	−1	1	1	1	0,966	0,964	0,002
3	6	1,2	1	125	1	−1	1	−1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	1	1	−1	−1	1	0,954	0,953	$7\cdot10^{-4}$
4	10	1,2	1	125	1	1	1	−1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	−1	−1	−1	−1	1	0,975	0,973	0,002
5	6	0,8	1,4	125	1	−1	−1	1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	−1	1	−1	1	−1	0,964	0,958	0,006
6	10	0,8	1,4	125	1	1	−1	1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	1	−1	−1	1	−1	0,98	0,987	0,007
7	6	1,2	1,4	125	1	−1	1	1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	−1	1	1	−1	−1	0,97	0,97	$7\cdot10^{-5}$
8	10	1,2	1,4	125	1	1	1	1	−1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	−1	1	−1	−1	0,984	0,986	0,002
9	6	0,8	1	250	1	−1	−1	−1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	−1	1	−1	−1	0,926	0,922	0,004
10	10	0,8	1	250	1	1	−1	−1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	−1	1	1	−1	−1	0,959	0,96	0,001
11	6	1,2	1	250	1	−1	1	−1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	1	−1	−1	1	−1	0,956	0,95	0,006
12	10	1,2	1	250	1	1	1	−1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	−1	1	−1	1	−1	0,972	0,976	0,004
13	6	0,8	1,4	250	1	−1	−1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	−1	−1	−1	−1	1	0,924	0,927	0,003
14	10	0,8	1,4	250	1	1	−1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	1	1	−1	−1	1	0,963	0,962	$8\cdot10^{-4}$
15	6	1,2	1,4	250	1	−1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	−1	−1	−1	1	1	1	0,945	0,946	$8\cdot10^{-4}$
16	10	1,2	1,4	250	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1	0,971	0,969	0,002
17	5,172	1	1,2	187,5	1	−1,414	0	0	0	1,2	−0,8	−0,8	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,919	0,925	0,006
18	10,83	1	1,2	187,5	1	1,414	0	0	0	1,2	−0,8	−0,8	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,969	0,964	0,005
19	8	0,717	1,2	187,5	1	0	−1,414	0	0	−0,8	1,2	−0,8	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,948	0,947	0,001
20	8	1,283	1,2	187,5	1	0	1,414	0	0	−0,8	1,2	−0,8	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,964	0,966	0,002
21	8	1	0,917	187,5	1	0	0	−1,414	0	−0,8	−0,8	1,2	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,947	0,951	0,004
22	8	1	1,483	187,5	1	0	0	1,414	0	−0,8	−0,8	1,2	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,968	0,965	0,003
23	8	1	1,2	99,11	1	0	0	0	−1,414	−0,8	−0,8	−0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	0,978	0,977	0,001
24	8	1	1,2	275,9	1	0	0	0	1,414	−0,8	−0,8	−0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	0,955	0,957	0,002
25	8	1	1,2	187,5	1	0	0	0	0	−0,8	−0,8	−0,8	−0,8	0	0	0	0	0	0	0,956	0,954	0,002

Для каждой из 25 комбинаций значений факторов с помощью вычислительной программы, основанной на динамической модели, предложенной в [5], и формулах, приведенных в [6], были рассчитаны значения КПД электромагнитного вибрационного привода η при разных значениях частоты. Путем интерполяции полученных зависимостей определены непрерывные функции $\eta_i(\omega^*)$, где i − номер опыта (№ строки в таблице 3). Для каждой из полученных функций была выделена область, где находится максимум и отсутствуют другие экстремумы, и в этой области методом половинного деления решено уравнение

$$\frac{d\eta_i}{d\omega^*} = 0 .$$

В результате были получены оптимальные значения частоты ω^*_{opt}, приведенные в таблице 3 (21-й столбец).

Для получения регрессионной модели выполним аппроксимацию зависимости ω^*_{opt} от факторов методом наименьших квадратов. Согласно [2], коэффициенты аппроксимирующей функции определяются выражениями:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_j)_i \omega^*_{opt_i}}{\sum_{i=1}^{N} (x_j)_i^2},$$

где $j = 0..m-1$; $m = 15$ − число кодированных факторов; $N = 25$ − число опытов. Полученные коэффициенты (табл. 4) отражают степень влияния каждого фактора x_j на функцию отклика ω^*_{opt}.

Таблица 4 − Коэффициенты аппроксимирующей функции

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
$\times10^{-3}$														
957,7	13,64	6,931	4,685	−6,926	−4,95	1,05	1,8	6,3	−3	−7,5	1,625	−2,375	1,75	−5,25

Уравнение регрессии:

$$\hat{\omega}^*_{opt}(x_1, x_2, ..., x_{m-1}) = \sum_{j=0}^{m-1} b_j x_j . \quad (1)$$

Значения аппроксимирующей функции в точках проведения численного эксперимента приведены в таблице 3 (22-й столбец). Сравнив их со значениями функции отклика ω^*_{opt}, определим абсолютные погрешности:

$$\Delta\omega^*_{opt} = \left|\omega^*_{opt} - \hat{\omega}^*_{opt}\right| .$$

По приведенным в таблице 3 значениям $\Delta\omega^*_{opt}$ видно, что если определять относительную частоту по уравнению (1), она будет отличаться от оптимальной не более, чем на 0,007. При этом КПД уменьшится не более, чем на $3{,}7\cdot10^{-3}$.

Оценить адекватность полученной регрессионной модели можно также, определив множественный коэффициент детерминации [4]:

$$R^2_d = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{\omega}^*_{opt_i} - \overline{\omega}^*_{opt}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\omega^*_{opt_i} - \overline{\omega}^*_{opt}\right)^2} = 0{,}961 ,$$

где $\overline{\omega}^*_{opt}$ − среднее значение функции отклика:

$$\overline{\omega}^*_{opt} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\omega^*_{opt_i} = 0{,}958 .$$

Полученное значение коэффициента детерминации показывает, что построенная регрессионная модель учитывает 96,1% изменений оптимальной частоты, вызванных рассматриваемыми факторами.

Выводы. Оптимальное значение частоты колебаний вибрационной установки с электромагнитным приводом по критерию максимума КПД зависит от жесткости пружин вибратора, начальной величины воздушного зазора, амплитуды относительных колебаний якоря и сердечника, а также от выходной мощности привода. Полученная регрессионная модель позволяет определить оптимальную частоту в зависимости от перечисленных факторов, поэтому она может быть использована при управлении частотой электромагнитного вибрационного привода с целью обеспечения его максимальной энергетической эффективности.

Список литературы: 1. Вибрации в технике: Справочник: в 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4: Вибрационные процессы и машины / Под ред. *Э.Э. Лавендела*, 1981. – 509 с. **2.** *Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.* Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с. **3.** *Ланець О.С.* Високоефективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 324 с. **4.** *Монтгомери Д.К.* Планирование эксперимента и анализ данных. – Ленинград: Судостроение, 1980. – 384 с. **5.** *Черно А.А.* Динамическая модель электромагнитного вибрационного привода // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С. 37 – 43. **6.** *Черно А.А., Монченко М.Ю.* Исследование энергетических характеристик электромагнитного вибрационного привода // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки", Миколаїв: НУК, 2015, Інтернетресурс: http: //conference.nuos.edu.ua. **7.** *Cherno, A.A.* "Control of Resonant Electromagnetic Vibrational Drive Using a Digital Filtering Algorithm Based on Discrete Fourier Transform", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 46, Issue 7. 2014, pp. 53 − 68.

Bibliography (transliterated): 1. Lavendel, E.E. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t., T. 4: Vibratsionnyie protsessy i mashiny*, Mashinostroenie, Moscow, USSR, 1981. Print. **2.** Ivobotenko, B.A., Ilyinskiy, N.F. and Kopylov, I.P. *Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike*, Energiya, Moscow, 1975. Print. **3.** Lanets, A. *Vysokoefektyvni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia): Monohrafiia*, Lviv: NULP, 2008. Print. **4.** Montgomeri, D.K. *Planirovaniye eksperimenta i analiz dannykh*, Sudostroeniye, Leningrad, 1980. Print. **5.** Cherno, A.A. "Dinamicheskaia model elektromagnitnogo vibratsionnogo privoda", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 2, 2014, pp. 37 – 43. Print. **6.** Cherno, A.A., Monchenko, M.J. "Issliedovaniie energeticheskikh kharakteristik elektromagnitnogo vibratsionnogo privoda." *Materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu "Suchasni problemy avtomatyky ta elektrotekhni*ky", Mykolayiv, NUOS, 2015, http://conference.nuos.edu.ua. **7.** *Cherno, A.A.* "Control of Resonant Electromagnetic Vibrational Drive Using a Digital Filtering Algorithm Based on Discrete Fourier Transform", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 46, Issue 7. 2014, pp. 53 − 68. Print.

Поступила (received) 27.08.2015

УДК 621.321.

В.Г. СИЧЕНКО, д-р техн. наук, с.н.с., зав. каф. «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ІНТЕГРАЦІЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СИСТЕМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ. Сьогодення сучасної енергетики обумовлюється зростаючим обсягом електроенергії отриманої від відновлюваних джерел. В основі цього процесу є необхідність вирішення екологічних проблем, охорони довкілля і складнощі енергетичної політики у світі, обумовленої, серед іншого, і зростаючим дефіцитом традиційних енергетичних ресурсів. Нині альтернативні джерела електроенергії нестримно розвиваються, збільшується кількість постачальників і змінюються умови надання послуг з електропостачання. Україна за останні декілька років добилася значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій. На сьогодні у світі існують приклади успішного впровадження використання електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел, в системі електричної тяги. Так, наприклад, у 2011 році було відкрито рух поїздів за маршрутом Париж-Амстердам з використанням енергії сонця від фотобатарей, встановлених на маршруті руху поїзда. ВАТ "РЖД" також має намір використовувати альтернативні джерела енергії для залізниць Росії. На сьогодні електроенергія від фотобатарей забезпечує потреби станції Комсомольська (Краснодарський край). В подальшому передбачається, що використання енергії вітру дасть максимальний ефект на Північній залізниці та на Сахаліні, а сонячних батарей – на Північно-Кавказькій залізниці [1]. На сьогоднішній день в Україні також реалізовано пілотний проект паралельної роботи СЕС та зовнішньої системи електропостачання для живлення шин 10 кВ на тяговій підстанції Самбір.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Науково-практичні аспекти розробки і впровадження систем децентралізованого виробництва як традиційної, так і альтернативної енергетики малої і середньої потужності досліджені у багатьох наукових роботах відомих вітчизняних і зарубіжних вчених. Вагомий внесок у вирішення цієї проблеми внесли С. П. Денисюк, А.В. Кириленко, А.В. Крюков, А.В. Праховник, Є.І. Сокол, А.С. Яндульский, Caldon R., Conti S. та ін. [2-12]. На думку вчених, децентралізація виробництва електроенергії є важливою складовою інноваційно-технологічного забезпечення структурного реформування енергетичної галузі з метою підвищення її ефективності і дозволяє, серед іншого,: зменшити втрати електроенергії при транспортуванні через максимальне наближення джерела до споживача, зменшити число і довжину магістральних ЛЕП, зменшити наслідки аварій на центральних електростанціях і головних ЛЕП, забезпечити взаємне багатократне резервування електрогенеруючих потужностей.

Сферами застосування джерел розподіленої генерації на залізничному транспорті, як слідує з аналізу наукових публікацій, можуть бути наступні напрями: об'єкти залізничного транспорту в регіонах з нестійким електропостачанням; створення транспортно-енергетичних коридорів, що поєднують траси залізниць і автомобільних доріг, високовольтні лінії електропередач і лінії зв'язку; підвищення якості електроенергії; живлення автономних об'єктів інфраструктури залізничного транспорту з використанням нетрадиційних поновлюваних джерел енергії. Установки розподіленої генерації можуть бути застосовані для зниження відхилень і несиметрії напруги в системах електропостачання нетягових споживачів. Реалізовані пілотні проекти по застосуванню сонячної енергії для потреб залізничного транспорту показують їх високу технологічність і ефективність.

Постановка задачі дослідження. У розрізі розвитку нетрадиційних джерел електричної енергії та інтеграції їх у загальну енергетичну систему держави, зокрема сонячних та вітрових електростанцій, виникає задача щодо погодження передпроектної та проектної документації суб'єктів господарювання та окремих компаній, а також технічних умов на приєднання названих типів генерації до електричних мереж Укрзалізниці. При цьому необхідно мати на увазі, що електричні мережі Укрзалізниці мають специфічні особливості функціонування пов'язані, в першу чергу, з необхідністю забезпечення безпеки руху поїздів та нестаціонарним характером електроспоживання.

Викладення основного матеріалу. Інтеграція сонячних електростанцій в систему тягового електропостачання постійного струму вимагає розробки нових принципів проектування, функціонування та керування режимами роботи тягового електропостачання. Необхідність їх розробки обумовлена наступними факторами: змінюється структура електричної системи, потужність генерації сонячних джерел електроенергії визначається зовнішніми факторами (в першу чергу інтенсивністю сонячного випромінювання) і мало залежить від режиму роботи електричної мережі, до якої вони під'єднанні, сонячні установки можуть мати коливальний або переривчастий характер генерації потужності, що може призвести до сильних коливань потужності в системі та впливати на режими її роботи, більшість сонячних генераторів під'єднанні до мережі за допомогою силових електронних перетворювачів (інверторів), які дуже чутливі до рівнів напруг [7]. Звідси, необхідно вирішувати низку питань: визначення впливу СЕС на стабільність роботи тягових підстанцій, тягових та інших споживачів, що приєднані до шин тягової підстанції з

© Сиченко В.Г., 2015

урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій щодо особливостей приєднання даного типу генерації до електричних мереж залізниць, функціонування пристроїв релейного захисту та автоматики, забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів з необхідними якісними характеристиками, тощо.

Розглянемо поставлені питання більш детальніше.

1. Рекомендації щодо приєднання СЕС до шин тягових підстанцій. Проведені на кафедрі Електропостачання залізниць ДНУЗТ дослідження дозволили виявити наступні лімітуючі фактори при підключенні відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕ) до систем тягового електропостачання залізниць України: встановлена потужність головних знижувальних трансформаторів тягових підстанцій, комутаційні можливості вимикачів приєднань, наявність необхідних видів релейного захисту у складі відповідних розподільних установок тягових підстанцій та забезпечення їх чутливості.

Крім того, принципово різна фізична природа ВДЕ обумовлює відмінності у значеннях параметрів їх схем заміщення, що, в свою чергу, впливає на характер зміни струмів к.з. у приєднаних до них електроустановках.

З урахуванням викладеного вище, при розробці технічних умов на приєднання СЕС до об'єктів системи електропостачання залізниць України, за результатами проведених досліджень, пропонується наступне:

- при загальному аналізі можливості приєднання та формуванні Технічних умов на приєднання по технічним питанням необхідно керуватися вимогами чинних нормативних документів;

- враховуючи важливість забезпечення безперервного електропостачання тягових споживачів для гарантування безпеки руху, доцільну точку приєднання, пов'язаний з цим обсяг модернізації обладнання тягової підстанції та необхідність встановлення додаткових видів релейного захисту і автоматики необхідно визначати на основі техніко-економічного обґрунтування окремо для кожного нового об'єкта, що планується до підключення;

- з метою уникнення реверсного режиму роботи обладнання, забезпечення правильності та надійності роботи релейного захисту і автоматики тягових підстанцій електрифікованого залізничного транспорту, мінімізації витрат на реконструкцію електричних мереж та релейного захисту і автоматики при виборі точки приєднання до тягової підстанції перевагу слід надавати шинам вищої напруги (35 кВ, 110 кВ і вище).

- якщо на підставі техніко-економічного обґрунтування здійснюється приєднання до шин напруги 10 кВ тягової підстанції, рекомендовано здійснювати приєднання ВДЕ таким чином, щоб потужність приєднаного джерела не перевищувала потужності споживачів, яка розподіляється на даному рівні напруги та забезпечувалась відсутність реверсного режиму роботи обладнання і гальванічний розвя'зок електричних систем через трансформаторні підстанції районів електричних мереж.

- враховуючи різкозмінний характер тягового навантаження, великі пускові струми електровозів на фідерній зоні, приєднання ВДЕ безпосередньо до шин, від яких отримують живлення тягові агрегати (10 або 35 кВ) не допускається.

- не допускається також приєднання ВДЕ до ліній, комплектних трансформаторних підстанцій та шин розподільчих пристроїв 6-10 кВ станцій і перегонів, якщо вони мають електричний зв'язок із системами живлення пристроїв автоблокування та інших систем забезпеченя безпеки руху поїздів;

- враховуючи те, що фотоелектрична панель має високий внутрішній опір і відповідно струм СЕС в режимі к.з. незначно відрізняється від струму робочого режиму і є суттєво нижчим за струм к.з., зумовлений дією джерела системи зовнішнього електропостачання, при приєднанні електростанцій цього типу необхідно передбачати струмовий захист, який унеможливлює підживлення місця к.з. в системі тягового електропостачання за рахунок СЕС. Тому, для приєднань, через які підключена сонячна електростанція, доцільним є застосування струмового захисту з блокуванням по напрузі. Для унеможливлення підживлення точки к.з. на підстанції від ВДЕ доцільно доповнити діючу автоматику функцією відключення ВДЕ від шин тягової підстанції при виникненні к.з.;

- при приєднанні СЕС до шин ВН, СН або НН тягових підстанцій повинні бути перевірені на чутливість до струмів короткого замикання, що протікають по елементах електричної схеми від вітки живлення СЕС, що приєднується, релейні захисти, зокрема: відповідних секційних вимикачів; диференційних захистів силових трансформаторів; захистів основних фідерів, що відходять від шин, до яких приєднано СЕС; інші.

У випадку незабезпечення необхідної чутливості захисту, приймаються інші види захисту, або інші технічні рішення виконання приєднання. Повинна бути забезпечена чутливість струмових (або нових типів захистів) на лініях зв'язку СЕС з шинами тягових підстанцій при коротких замиканнях на цих лініях та на шинах приєднання.

- при приєднанні СЕС до шин тягових підстанцій повинні бути забезпечені вимоги щодо якості електроенергії в місці балансового розмежування електричних мереж власника СЕС та залізниці. Якість електроенергії, яка генерується ВДЕ, повинна задовольняти вимогам чинних нормативних документів. Необхідно також забезпечити доцільні рівні генерації вищих гармонік і реактивної потужності та умови синхронної роботи для забезпечення стійкості роботи електричної мережі.

2. Підвищення якості напруги в тяговій мережі постійного струму. Існуюча система тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити необхідні провізну та пропускну спроможності. Особливо гостро ця проблема проявляється при впровадженні швидкісного руху на лініях, освоєнні зростаючого об'єму вантажних і пасажирських перевезень. Тому важливим стає пошук сучасних

технічних рішень та перспективних напрямків розвитку систем тягового електропостачання [13].

Сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху. Використання існуючих засобів підсилення в багатьох випадках не забезпечує необхідних енергетичних показників і є досить дорогим. Зростаючий дефіцит енергоресурсів ставить задачу дослідити можливість використання незалежних джерел електричної енергії для живлення пунктів підсилення тягової мережі (ПП).

Перевага живлення ПП від сонячних батарей полягає в тому, що немає необхідності в монтажі додаткової живильної лінії від тягової підстанції і незалежність їх роботи від неї. До питань, підлягаючих вирішенню слід віднести: тип джерела поновлюваної електричної енергії; компенсація впливу погодних умов на рівень генерованої енергії; схемотехніка, компонування і елементна база; техніко-економічне обгрунтування їх застосування з прив'язкою до надійності забезпечення живлення тягового навантаження з необхідними енергетичними характеристиками. Схема лінійного ПП складається з однофазного інвертора на IGBT транзисторах, перетворюючого трансформатора і випрямляча. Для зменшення вагогабаритних розмірів трансформатора використовується напруга підвищеної частоти (700 Гц), а сердечник трансформатора виконаний з аморфного сплаву [12].

Варіант структури системи електропостачання залізниці постійного струму, що використовує сонячні генератори електричної енергії, встановлені на земельній смузі відчуження залізниці приведений в [12]. Структурна схема пропонованого удосконалення тягової мережі представлена на рис. 1 для трьох ПП (ординати встановлення ПП, відповідно – 5, 10 та 15 км при відстані між тяговими підстанціями 20 км).

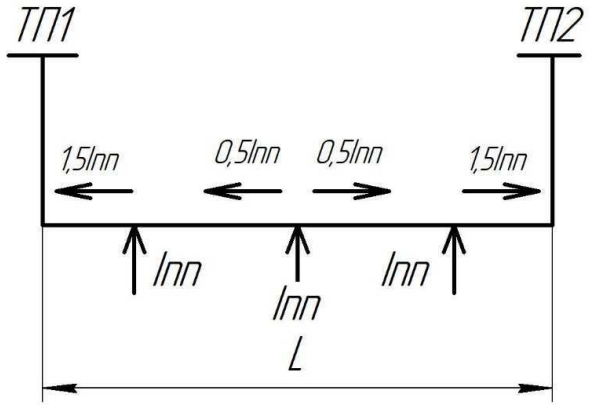


Рис. 1. Структурна схема живлення тягової мережі з трьома ПП: ТП1, ТП2 – тягові підстанції; Іпп1, Іпп2, Іпп3 – струми відповідно трьох підсилюючих пунктів; L - довжина міжпідстанційної зони.

Необхідно зазначити, що кількість і потужність ПП має визначатись за двома критеріями: компенсації втрат напруги та забезпечення нормативу необхідної питомої потужності тягової мережі. За умовами організації руху поїздів при нормальному режимі руху, в залежності від реальних довжин блок-дільниць, відстань між поїздами може складати 3,5-5 км, тому, в першому наближенні, розглянутий вище приклад (рис. 1) може бути прийнятий за основу для попередніх розрахунків, результати яких зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Показники	Існуюча система електропостачання	Система електропостачання з підсилюючими пунктами		
		Кількість перетворюючих пунктів		
		1	2	3
Витрата енергії E, кВт·год	1980	1620	1620	1590
Зниження витрати енергії ΔE, кВт·год	—	360	360	390
Втрати потужності ΔP, кВт	2018,25	1503,9	1307,5	900,9
Потужність ПП P, кВт	—	1800	900	650

Як показують виконані розрахунки, нормований рівень напруги для швидкісного руху витримується, при цьому втрати електричної енергії зменшуються до 50 % при зменшенні витрат на тягу майже на 20 %.

Звідси, зробимо висновок, що для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачі електровозу, зменшення втрат потужності та електроенергії доцільним є встановлення трьох підсилюючих пунктів на приведеній міжпідстанційній зоні. Потужність таких пунктів може знаходитись у межах 600-700

кВт. Кожен ПП може керуватися на основі закону, який формується в ході реального часу. Вид цього закону визначається значенням координати та струму електрорухомого складу, який розташовується в міжпідстанційній зоні. Проведемо розрахунок тягової мережі з ПП, які рівномірно розташовані на міжпідстанційній зоні, з метою забезпечення мінімальних втрат потужності в тяговій мережі згідно розрахункової схеми, представленої на рис. 1.

Для розрахунку використовуємо такі дані: довжина ділянки - 20 км; відстань між підсилюючими пунктами - 5 км; потужність підсилюючих пунктів - 650 кВт; струм електровоза при номінальній напрузі - 3000 А; питомий опір тягової мережі М120 +2 МФ100 + Р65 - 0,069 Ом / км; схема живлення тягової мережі - двостороння.

У якості цільової функції приймаємо втрати потужності ΔP в тяговій мережі, які необхідно мінімізувати. В результаті отримуємо функцію чотирьох змінних:

$$\Delta P=f(I_{пп1},I_{пп2}, I_{пп3}, x) \quad (1)$$

Таким чином, залежно від координати розташування поїзда, струми підсилюючих пунктів повинні мати таке значення, щоб забезпечувався мінімум цільової функції ΔP, тобто відповідати критерію оптимізації.

Використовуючи розроблену методологію розрахунку [14], визначимо струми підсилюючих пунктів, при яких забезпечуються мінімальні втрати потужності. Результати розрахунків змін напруги і втрат потужності представлені на рис. 2., 3.

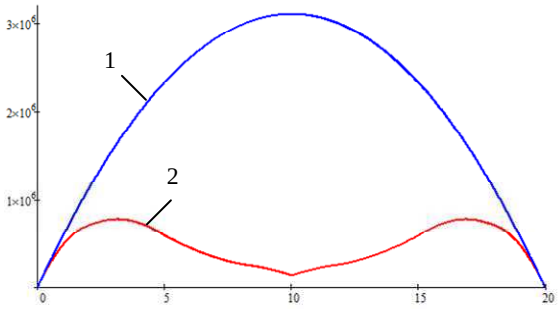


Рис. 2. Миттєві втрати потужності на ділянці з двостороннім живленням: 1 – без підсилення, 2 – з ПП

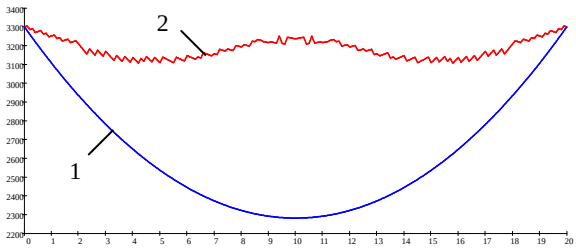


Рис. 3. Миттєві значення напруги на ділянці з двостороннім живленням: 1 – без підсилення, 2 – з ПП

Таким чином обрані підсилюючі пункти відповідають встановленим критеріям для впровадження високошвидкісного руху: забезпечують підтримання необхідного рівня напруги не нижче 2900 В, а також мінімальні втрати потужності у тяговій мережі.

Висновки.

1. Інтеграція сонячної генерації в систему тягового електропостачання постійного струму може здійснюватись по декільком напрямкам: паралельна робота СЕС з системою зовнішнього електропостачання за умови дотримання приведених рекомендацій; живлення власних потреб тягових підстанцій у буферному режимі по відношенню до існуючої схеми живлення; підсилення тягової мережі для забезпечення необхідного рівня напруги та зменшення втрат потужності.

2. Зважаючи на нестабільний рівень генерації СЕС та нестаціонарний характер тягового навантаження створення пропонованих пунктів підсилення тягової мережі повинне передбачати застосування накопичувачів електричної енергії, здатних віддавати енергію в різкозмінних режимах.

3. Для підвищення ефективності функціонування системи тягового електропостачання постійного струму з пунктами підсилення, використовуючими сонячну енергію, необхідно розробити закони керування їх режимами в реальному часі у єдиній інтелектуальній системі тягового електропостачання.

Список літератури. 1. Сиченко В.Г. Аналіз впливу сонячної генерації на роботу тягових підстанцій електрифікованих залізниць. Сиченко В.Г., Бондар О.І., Прихода М.С. // Світлотехніка та електроенергетика, № 1, 2015, с. 10-18. 2. Интеграция объектов возобновляемой энергетики в низковольтные электрические сети. / Е.И. Сокол [и др.] // Відновлювальна енергетика XXI століття: XIII міжнародна науково-практична конференція. 2012. – С. 112-115. 3. Денисюк С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з роззосередженою генерацією / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янко, П.С. Колесник // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД. – Київ, 2011. – Спец. Вип. – С. 30-37. 4. Крюков А.В. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, М.О. Арсентьев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / ИрГУПС. – Иркутск, 2008. – №3 (19). – С. 81-87. 5. Кириленко, О. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки НАН України / ІЕД.– Київ, 2009.– Вип. 24 – С. 3–7. – ISSN 1727–9895. 6. Праховник А.В. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине / А.В. Праховник, В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, М.Т. Кокорина // Енергетика, економіка, технології, екологія: науковий журнал / НТУУ «КПІ». – Київ, 2012. – № 2(31). – С. 7-14. 7. Яндульський О.С. Моделювання і аналіз впливу сонячних електростанцій

на режими роботи електричної мережі/ О.С. Яндульський, О.В. Хоменко, А.А. Марченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету / ДонНТУ. – Донецьк, 2013. – № 1(14). – С. 324-329. 8. Caldon R. Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation / R. Caldon, A. Stocco, R. Turri // Electric Power Systems Research / 2008, vol. 78, iss. 12, pp. 2017–2023. 9. Conti S. Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation/ S. Conti // Electric Power Systems Research / 2009, vol. 79, iss. 1, pp. 49–56. 10. Claypool A. Аккумуляторные и солнечные источники питания для локомотивов и устройств сигнализации и связи / A. Claypool // Железные дороги мира/ 2007. – № 5. – С. 62-64. 11. Goldenberg Ph. Применение возобновляемых источников энергии на железных дорогах/ Ph. Goldenberg // Железные дороги мира/ 2013. – № 1. – С. 43-48. 12. *Гончаров Ю.П.* Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей / *Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, В.В. Замаруев и др.* // Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник наукових праць. - Маріуполь, 2015. - Випуск № 30. с. 200-211. 13. Сиченко В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць. Сиченко В.Г., Саєнко Ю.Л., Босий Д.О. / Дніпропетровськ. Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. - 344 с. 14. Сыченко В.Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающими пунктами. Сыченко В.Г., Босый Д.А., Косарев Е.Н. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. № 9, т. 2, 2014, с. 8-18

Bibliography. 1. Sychenko V., Bondar O., Prikhoda M. *Analysis of influence of solar generation to work traction substation of electrified railways*. Svitlotekhnika ta elektroenergetika, 2015. No. 1, pp. 10-18. 2. Sokol E.I. and others

Integration of renewable energy facilities in low-voltage electrical network. Renewable Energy XXI Century: XIII International Scientific and Practical Conference. 2012. pp. 112-115. 3. Denisyuk S.P., Derev'yanko D.G., Kolesnik P.S. *Modes optimization of power supply in local systems of decentralized generation*. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. IED. Kiyv, 2011. Special issue. pp. 30-37. 4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. *The use of distributed generation technologies in rail transport.* Modern technology. System analysis. Modeling. IrGUPS. – Irkutsk, 2008. No. 3 (19). pp. 81-87. 5. Kirilenko, O. V., Trach, I. V. *The technical operation of power systems with integration of distributed generation sources.* Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. IED. Kiyv, 2009. No. 24. pp. 3–7. ISSN 1727–9895. 6. Prakhovnik, A.V., Popov, V.A., Yarmolyuk, E.S., Kokorina, M.T. *Perspectives and the development of distributed generation in Ukraine.* Energy, economy, technology, ecology: scientific journal NTUU «KPI». Kiyv, 2012. No. 2(31). pp. 7-14. 7. Yandul's'kiy, O.S. Khomenko, O.V., Marchenko, A.A. *Modeling and analysis of the impact of solar power to the electrical grid modes.* Proceedings of Donetsk National Technical University / DonNTU. – Donets'k, 2013. No. 1(14). pp. 324-329. 8. Caldon R., Stocco A., Turri R. *Feasibility of adaptive intentional islanding operation of electric utility systems with distributed generation.* Electric Power Systems Research / 2008, vol. 78, iss. 12, pp. 2017–2023. 9. Conti S. *Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation.* Electric Power Systems Research, 2009, vol. 79, iss. 1, pp. 49–56. 10. Claypool A. *Battery and solar power supplies for locomotives and signaling and communication devices.* Railways of the world, 2007. No. 5. pp. 62-64. 11. Goldenberg Ph. *The use of renewable energy sources on the railways*. Railways of the world, 2013. No. 1. pp. 43-48. 12. Goncharov, Yu.P., Sokol, E.I., Zamaruev V.V. i dr. *Sistema preobrazovaniya energii, generiruemoy v polose otchuzhdeniya zheleznoy dorogi s pomoshch'yu solnechnykh paneley.* Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu: Zbirnik naukovikh prats. Mariupol, 2015. Iss. 30, pp. 200-211. 13. Sichenko, V. G., Saenko, Yu.L., Bosiy, D.O. *Yakist' elektrichnoї energiї u tyagovikh merezhakh elektrifikovanikh zaliznits'*. Dnipropetrovsk: PF "Standard-Service", 2015. 344 p. 14. Sichenko V.G., Sayenko Yu.L., Bosiy D.O. *Usovershenstvovanie metodologii rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s usilivayushchimi punktami. Energosberezhenie, energetika, energoaudit, 2014. No. 9. Vol. 2. pp. 8-18.*

Поступила (receive) 28.08.2015

УДК 628.94:535

П.П. ГОВОРОВ, д-р техн. наук, проф. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;
О.В. КОРОЛЬ, наук. співр. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;
Т.І. РОМАНОВА, канд. техн. наук, наук. співр. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ МІСТ

Вступ. До найактуальніших проблем сьогодення, що торкаються кожного жителя планети й від яких залежить майбутнє людства слід віднести забезпечення вимог до якості питної води. Наявність у питній воді патогенних бактерій, може призвести до техногенної катастрофи. Тому сучасні гігієнічні нормативні документи в розвинених країнах світу регламентують надзвичайно високі вимоги до якості питної води за мікробіологічними показниками. Проте існуючи методи очищення води, а також традиційні схеми її знезаражування не завжди спроможні забезпечити сучасні вимоги до якості питної води, гарантовано захистити населення від збудників інфекційних захворювань і не в повній мірі відповідають вимогам енергоефективності у зв'язку із застосуванням малоефективних джерел світла та методик розрахунку їх світлорозподілу.

Існуючі на сьогодняшний день джерела УФ-променів у бактерицидних установках побудовані на основі використання газорозрядних ртутно-аргонових або ртутно-кварцових ламп, в яких у процесі електричного розряду генерується УФ-випромінювання бактерицидного діапазону. Вони встановлюються у кварцовому чохлі в центрі металевого корпусу. Знезаражування відбувається під час протікання води в просторі між корпусом і чохлом при безпосередньому впливі УФ-променів на мікроорганізми. За цих умов наявність у воді завислих речовин призводить до поглинання світлового випромінювання, що знижує ефективність знезаражування. Це вимагає постійного чищення зовнішньої поверхні кварцового чохла від осаду, що накопичується, а також обумовлює відносно високі витрати електроенергії. Крім того, конструкція таких бактерицидних установок дозволяє здійснювати очистку тільки в місцях що мають дуже високу бактеріальну забрудненість, але на жаль в таких бактерицидних установках спостерігається відсутність ефекту післядії, що неприйнятно при транспортуванні води на значну відстань. У зв'язку з цим установки для знезараження води на основі бактерицидних ламп являються малоефективними, хоча досить привабливими взагалі. Тому пошук нових та вдосконалення існуючих технологій знезараження питної води є актуальною проблемою великої ваги.

Постановка задачі. Технологія ультрафіолетового опромінення при знезараженні питної та стічної води застосовується досить широко. Ультрафіолет дійсно може бути нездоланним бар'єром по відношенню до всіх відомих мікроорганізмів, у тому числі він дуже ефективний і проти мікроорганізмів стійких до впливу хімічних препаратів. Однак, для того, щоб УФ обладнання реально справлялося з поставленим завданням необхідно правильно задати потужність бактерицидного випромінювання, щоб забезпечити необхідний ефект знезараження. Зокрема, для знезараження побутових і міських стічних вод, повинна застосовуватися УФ доза не менше 30 мДж / см^2. Але на практиці матриця води настільки унікальна, що даної дози може бути як більш ніж достатньо, так і не достатньо зовсім [1]. Шляхи вдосконалення знезараження води та водопідготовки в цілому слід шукати в нових способах, що передбачають застосування більш гнучких та енергоефективних систем. Як свідчить аналіз [2] високі техніко-економічні показники забезпечують бактерицидні установки на основі світлодіодних джерел світла, які на рівні з покращеними енергетичними характеристиками забезпечують ще й можливість розосередження установки бактерицидної дії і багатоступеневе знезараження води. У той же час, дослідження процесів знезараження води та визначення вимог до бактерицидних установок на основі ультрафіолетових світлодіодних джерел світла досі не проводилось. Це стосується структури та параметрів бактерицидних установок на основі світлодіодних джерел світла, схем їх живлення та керування. Для електроспоживання установок знезараження води використовується в основному трифазна чотирипровідна система з глухозаземленою нейтраллю живильного трансформатора змінного струму напругою 380/220 В, з частотою 50 Гц [3]. Від неї живляться як трифазні, так і однофазні силові приймачі та освітлювальне навантаження [4].

Наряду з багатьма перевагами ця система має і ряд недоліків. Основні з них є:

- несиметричні режими, які виникають при випадковому вмиканні та вимиканні силових однофазних приймачів та освітлювального навантаження. При світлодіодних джерелах світла (СД ДС) несиметрія виникає навіть при однакових ефективних струмах в фазах за рахунок різних характерів СД ДС (індуктивного або ємнісного) та за рахунок різної деградації світлодіодів (СД), яка збільшується з часом та впливає на значне зниження світлового потоку освітлювальних приладів. Все це призводить до додаткових втрат, додаткових витрат електроенергії, збільшенню капітальних витрат на провідникові матеріали з кольорових металів. Крім того, в системі виникають вищі гармонічні складові струму і напруги, що також впливає на якість електроенергії, втрати та зниження коефіцієнту потужності [5];
- система змінного струму напругою 380/220 В не забезпечує повної електробезпеки оточуючих [6];
- при експлуатації системи 380/220 В є можливість несанкціонованого відбору електроенергії та ін.

© П.П. Говоров, О.В. Король, Т.І. Романова, 2015

Це стримує їх впровадження в діючі схеми обеззаражування води і обумовлює низьку енергетичну та світлотехнічну ефективність таких установок. Означене вище вимагає проведення досліджень по створенню науково-методичних основ створення бактерицидних установок на основі світлодіодних джерел світла та визначенню вимог до структур та параметрів бактерицидних установок на основі ультрафіолетових світлодіодних джерел світла.

Аналіз публікацій. На початку двадцятого століття між фахівцями йшли запеклі суперечки про переваги та недоліки СД ДС використання для цілей електропостачання мереж постійного і змінного струмів. Склалося так, що перевагу було віддано трифазним мережам змінного струму. Але майже за сто років перетворювальна техніка зазнала істотні зміни, і якщо ще 25 років тому інвертори і напівпровідникові перетворювачі були прерогативою оборонної промисловості, то сьогодні вони знаходять широке застосування в промисловості та побуті. Багато світлотехнічних приладів мають імпульсні блоки живлення, які можуть працювати як в ланцюгах змінного, так і постійного струму [7]. Більш того в [8] відмічається, що 80% потужності низьковольтного навантаження витрачається на постійному струмі, що вимагає повторних досліджень. Тому дослідження типів та варіантів живлення бактерицидних установок на основі СД Дс є актуальними.

Матеріали досліджень. Для дослідження проблеми підвищення ефективності систем знезараження систем водопостачання міст мікроорганізмами пропонується розподілена система знезараження води (рис. 1), основана на використанні енергоефективних ультрафіолетових світлодіодних джерел світла. Це відкриває можливість структурно розташовувати бактерицидні установки після кожної операції в системах водопостачання міст, що дає можливість уникнути повторного розвитку мікроорганізмів, так як при впливі на органічні клітини різних бактерій ультрафіолетовим випромінюванням спектрального складу від 200 до 400 нм спостерігається руйнація клітин.

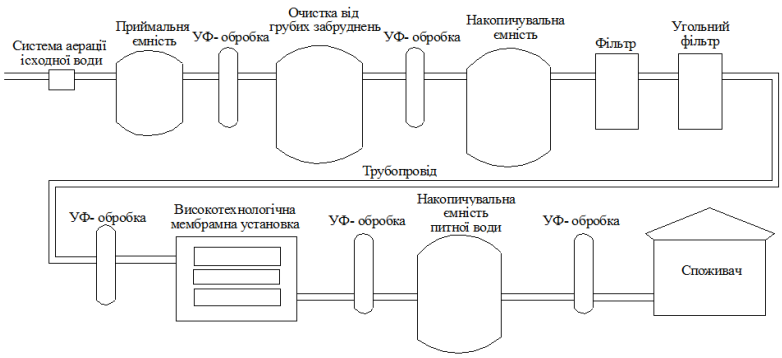


Рис. 1 – Структура системи очистки води на основі світлодіодних джерел світла

Оскільки призначення установки ультрафіолетового випромінювання - знешкодження бактерій, то бактерицидні властивості в них мусять мати лише фотони із енергією, яка здатна розірвати зв'язок молекул білкової речовини випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda \leq 300$нм. Дослідження процесів в установках бактерицидної дії [2] дозволило визначити область їх ефективної дії (рис. 2). Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 6, приводить до висновків, що найбільшу ефективність бактерицидних установок забезпечує джерела світла з довжиною хвилі 254 – 258 нм. В дослідницької лабораторії Nippon Telegraph and Telephone Corporation, під керівництвом доктора Йошитака Таннясу створено діоди на основі нітриду алюмінію, які дозволяють випромінювати світло в ультрафіолетовому діапазоні з довжиною хвилі 210 нм. Саме ці світлодіоди і розглядаються у якості об'єкту досліджень даної роботи. Однак широке впровадження таких джерел світла в установках бактерицидної дії вимагає дослідження способів та схем їх живлення.

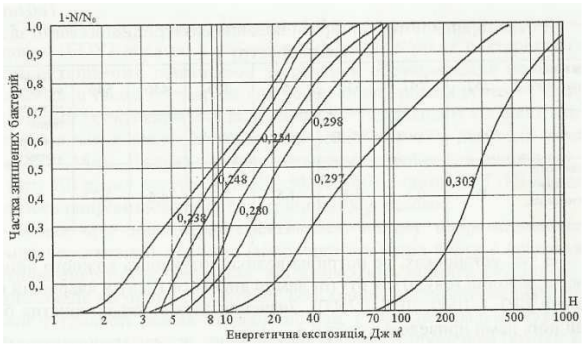
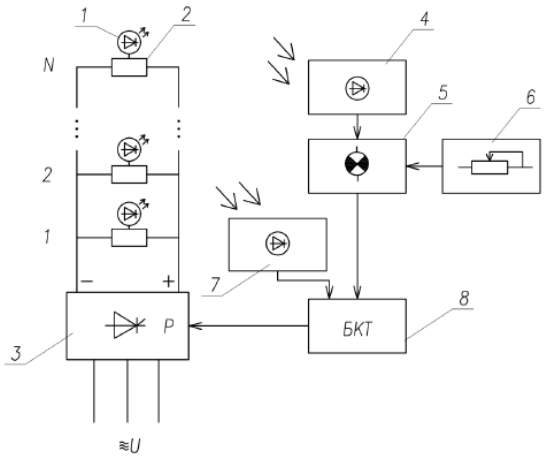


Рис. 2 – Спектр ефективної бактерицидної дії випромінювання

Для мінімізації рівня енерговитрат в системах знезараження води з урахуванням несиметрії і несинусоїдальності струмів і напруг в освітлювальних електричних мережах із СД ДС в роботі запропонована комплексна схема живлення споживачів, при якій живлення силових споживачів відбувається від мережі змінного струму, а освітлювальних – від мережі постійного струму. Для вирішення питань регулювання та симетрування струмів та напруг запропоновано використання в схемі живлення систем знезаражування симетруючого тиристорного регулятора напруги (СТРН) (рис. 3), застосування якого виключає виникнення несиметричних режимів у мережах живлення при випадковому включенні електроприймачів і деградації СД ДС, а також знижує рівень вищих гармонік на стороні трифазної мережі. В цьому випадку відкривається можливість для живлення СД ДС постійним струмом через драйвери DC/DC спрощеної конструкції.

Застосування в системі живлення СД ДС зворотного зв'язку за світловим потоком Ф (рис. 3) дозволяє додатково підтримувати задане значення світлового потоку незалежно від режиму та деградації СД ДС, шляхом зміни кута ɣ відмикання тиристорів (рис. 4).



1 – СД ДС;
2 – груповий драйвер DC/DC;
3 – СТРН;
4 – фотодатчик;
5 – вузол порівняння;
6 – пристрій задання номінального світлового потоку;
7 – вимикач (фотореле);
8 – блок управління тиристорами

Рис. 3 Схема включення N-ої кількості однофазних СД ДС в трифазній чотирипровідній мережі за груповою схемою з живленням від мережі постійного струму в поєднанні з СТРН і зворотним зв'язком за світловим потоком

Дослідження роботи СТРН показало, що при різних схемах живлення СД ДС його енергетичні показники прийнятні тільки при малій глибині регулювання й малих кутах відмикання тиристорів, а найбільш придатним варіантом включення СТРН є живлення за схемою (рис. 5 а). Його можна рекомендувати для роботи в електричних мережах з плавним регулюванням напруги від 60 до 120 В і кутах вмикання ɣ тиристорів від 90 до 0 градусів. При цьому забезпечуються високі енергетичні показники СТРН (рис. 5 б).

У разі застосування СТРН в поєднанні з живленням СД ДС постійним струмом, з'являється можливість відмови від системи 380/220 В і переходу до трипровідної мережі з ізольованою нейтраллю. Це забезпечує додаткову економію за рахунок відсутності нульового проводу.

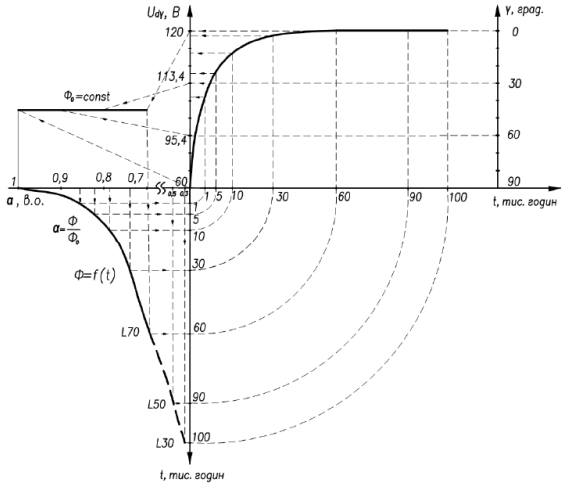
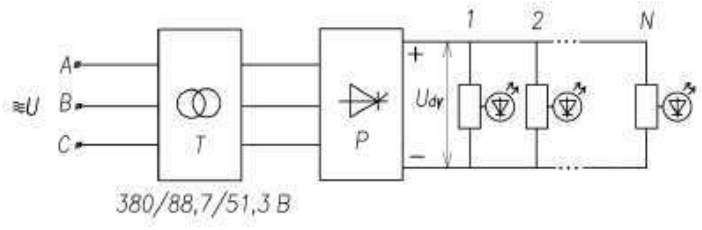
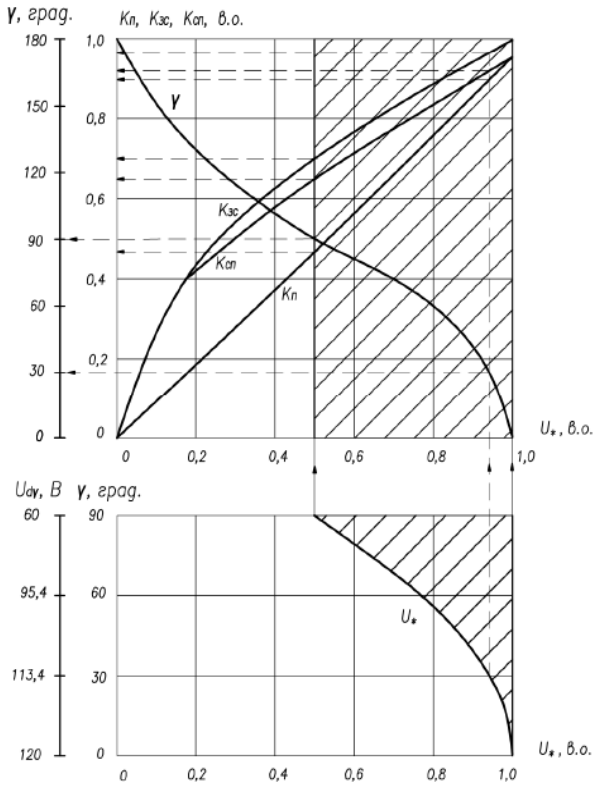


Рис. 4 Графічні залежності значення світлового потоку Φ_0 СТП на основі СД ДС від відносного зменшення потоку α і кута ɣ вмикання тиристорів СТРН



а



б

Рис. 5 Включення групи СД ДС в освітлювальну мережу через трифазний мостовий симетруючий тиристорний регулятор напруги з понижуючим трансформатором 380/88,7/51, 3 В:
а – схема включення; б – графічні залежності коефіцієнта потужності $К_П$, зсуву $К_{зс}$ та вищих гармонік $К_{СП}$ від рівня напруги U_* та кута вмикання ϒ тиристорів

Для оцінки ефективності різних схем живлення було проведено розрахунок значення зведених річних витрат $З_{зв}$ за формулою:

$$\boldsymbol{З_{зв} = E_н \cdot K + B} \qquad (1)$$

де $Е_н$ – нормативний коефіцієнт відчислень; К – значення додаткових капітальних витрат; В – значення річних витрат (вартість електричної енергії, матеріалів, тощо).

Результати розрахунку зведених витрат при різних схемах підключення і способах регулювання СД ДС наведено на рис. 6.

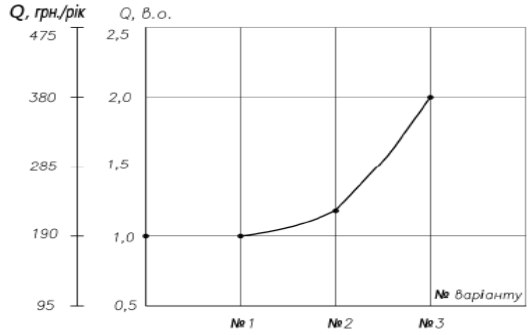


Рис. 6 Зведені розрахункові витрати Q в залежності від варіантів живлення СД ДС:

Варіант 1 – з однофазним тиристорним регулятором РТНО-220-5, який встановлюється на кожну фазу;

Варіант 2 – з трифазним трансформатором ТМ-0,5, 380/88,7/51,3 В, та симетруючим тиристорним регулятором постійного струму напругою 60-120 В;

Варіант 3 – з однофазним тиристорним регулятором РНТО-220-5 спільно з фільтрами 3-ї і 5-ї гармонік

В цілому, застосування СТРН (варіант 2) забезпечує зменшені витрати електроенергії на 7% та втрат напруги на 3-4%. При цьому вартість розподільної мережі зменшиться на 17%. Одночасно з цим збільшується на 30% строк служби СД ДС. Крім того, додатковий ефект може бути отриманий від поліпшення якості освітлення, а також підвищення електробезпеки обслуговуючого персоналу і усунення несанкціонованого відбору електроенергії.

Висновки:

1. Застосування багатоступеневої системи знезараження води у поєднанні із використанням світлодіодних джерел світла забезпечує підвищення ефективності витрат електричної енергії на технологічні потреби.

2. Використанна система постійно-змінного струму збільшує надійність роботи, як силового, так і освітлювального обладнання, оскільки для роботи використовується напруга 60-120 В, вона забезпечує електробезпеку оточуючих, (припустиме значення напруги дотику DC $U_{\text{L}} \leq 120$ В), а також робить неможливим несанкціонований відбір електроенергії.

3. Застосування СТРН дозволяє зменшити вищі гармонічні складові струму і напруги в мережі змінного струму та збільшити коефіцієнт потужності мережі.

4. При переході на постійний струм і живленні від СТРН, нульовий провід *N* відсутній, а мережі постійного струму можна виконувати з некольорових матеріалів, наприклад, сталеалюмінієвих проводів, що призводить до зменшення витрат.

Список літератури: 1. *Иванов А.С.* Определение минимальной эффективности ультрафиолетовой дозы облучения. Модельное облучение // http: wedeco.su/stati/101-modelnoe-obluchenie.html. **2.** *Зеленков І. А.* Електротехнологічні опромінювальні установки: Навч. посібник. – К. 2004 – 101 с. **3**. *Носанов Н.И.* Электроснабжение жилых и общественных зданий городов: Учебное пособие // *Н.И. Носанов, В.П. Коптиков*/ Донецк: «Донбасс», 2003. – 508 с. **4.** Справочная книга по светотехнике: справочное издание / под ред. *Ю.Б. Айзенберга*. – 3-е изд., перераб. – М.: [Б.и.], 2008. – 952 с. **5**. *Жеженленко И.В*. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / *И.В. Жеженленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др.* // М.: Машиностроение, 2012. – 351 с. **6.** Межгосударственный стандарт. Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током (МЭК 364-4-41-92): ГОСТ 30331.3-95. Введ. 01.01.2002. // М.: ИПК издательство стандартов. – 2002. – 17 с. **7**. Будущее за системами электроснабжения постоянного тока? // [Електронний ресурс]. – Режим доступу http://electric.info/mail/fakty/104-budushee-zasistemami-yelektrosnabzheniya.html. **8.** *Maury Wright.* Lighting industry progresses on DC-power grids that pair well with LEDs // [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http:// www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-10/issue-6/features/lighting-industry-progresses-on-dc-power-grids-that-pair-well-with-leds-magazine.html.

Bibliography (transliterated): 1. Ivanov A.S. Opredeleniye minimal'noy effektivnosti ul'trafioletovoy dozy oblucheniya. Model'noye oblucheniye // http: wedeco.su/stati/101-modelnoe-obluchenie.html. **2.** Zelenkov Í. A. Yelektrotekhnologíchní opromínyuval'ní ustanovki: Navch. posíbnik. – K. 2004 – 101. Print. **3.** Nosanov N.I. Elektrosnabzheniye zhilykh i obshchestvennykh zdaniy gorodov: Uchebnoye posobiye // N.I. Nosanov, V.P. Koptikov/ Donetsk: «Donbass», 2003. – 508. Print. **4.** Spravochnaya kniga po svetotekhnike: spravochnoye izdaniye / pod red. YU.B. Ayzenberga. – 3-ye izd., pererab. – M.: [B.i.], 2008. – 952. Print. **5.** Zhezhelenko I.V. Elektromagnitnaya sovmestimost' potrebiteley: monogr. / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak i dr. // M.: Mashinostroyeniye, 2012. – 351. Print. **6.** Mezhgosudarstvennyy standart. Elektroustanovki zdaniy. Chast' 4. Trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti. Zashchita ot porazheniya elektricheskim tokom (MEK 364-4-41-92): GOST 30331.3-95. Vved. 01.01.2002. // M.: IPK izdatel'stvo standartov. – 2002. – 17. Print. **7.** Budushcheye za sistemami elektrosnabzheniya postoyannogo toka? // [Yelektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: http://electric.info/mail/fakty/104-budushee-zasistemami-yelektrosnabzheniya.html. **8.** *Maury Wright.* Lighting industry progresses on DC-power grids that pair well with LEDs // [Yelektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-10/issue-6/features/lighting-industry-progresses-on-dc-power-grids-that-pair-well-with-leds-magazine.html.

Надійшла (received) 31.08.2015

УДК 621.313.323

В. И. КАЛАШНИКОВ, канд. техн. наук, проф. ГВУЗ «ДонНТУ»;
С. Н. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. ГВУЗ «ДонНТУ»;
П. А. ХИЖНЯК, ассистент ГВУЗ «ДонНТУ».

АВТОНОМНЫЕ МИКРОГРИД-СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ, КАК ЭЛЕМЕНТ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Введение. Системы микрогрид с возобновляемыми источниками электроэнергии (например, солнечная энергия с использованием концентраторов, ветрогенератор вертикального расположения и водородная автономная установка), как элемент энергосистемы концепции Smart Grid [1-5], позволяют организовать весь цикл получения, использования и хранения электроэнергии. Что очень актуально для мест проживания или работы без доступа к центральной системе электроснабжения. По ряду причин один источник альтернативной энергии не способен в полной мере покрыть потребности даже отдельно взятого потребителя с учётом реальных ограничений (ограничения площади размещения оборудования, фундамент-крепление-развертывание установленного оборудования и массогабаритные показатели установки хранения-накопления электроэнергии). В связи с этим все работы по микрогрид-системам прорабатывают отдельные вопросы по оптимальному выбору составляющих, таких как время жизни аккумуляторов, площадь солнечных модулей, габариты ветрогенераторов или мощность водородной установки. Но также важен вопрос работы микрогрид-системы в общем, имея все три составляющих и полного отсутствия подпитки энергией из альтернативного контура электроснабжения (например, дизельного генератора) в течении длительного срока.

Постановка задачи. Целью данной работы является анализ перспектив развития энергосистем концепции Smart Grid, а также автономных микрогрид-систем с возобновляемыми источниками энергии.

Материалы исследования. Для практической реализации концепции Smart Grid необходимы высококвалифицированные специалисты со знанием особенностей работы возобновляемых источников энергии в единой энергетической системе. Это потребовало интеграции по изучению специфических знаний в области Smart Grid и возобновляемой энергетики в соответствующие учебные планы подготовки магистров электротехнических специальностей.

В Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ) совместно с Магдебургским Отто фон Гёрике университетом (OVGU), начиная с 2000 года, ведутся научные исследования в области оптимизации режимов работы возобновляемых источников энергии. За основу взяты ветровые, солнечные и водородные электростанции, создан межкафедральный учебно-научный центр по возобновляемой энергетике «Smart Grid – ДонНТУ» [4, 5]. Задачей центра является проведение научных исследований в области:

- исследование динамики совместной работы классических и возобновляемых источников энергии с целью оптимизации работы системы в целом;
- исследование динамических процессов при коротких замыканиях и совместимости работы устройств защиты в Smart Grid;
- исследование динамической компенсации реактивной мощности;
- моделирование, анализ и планирование режимов работы Smart Grid;
- подготовка и переподготовка персонала для отрасли возобновляемой энергетики.

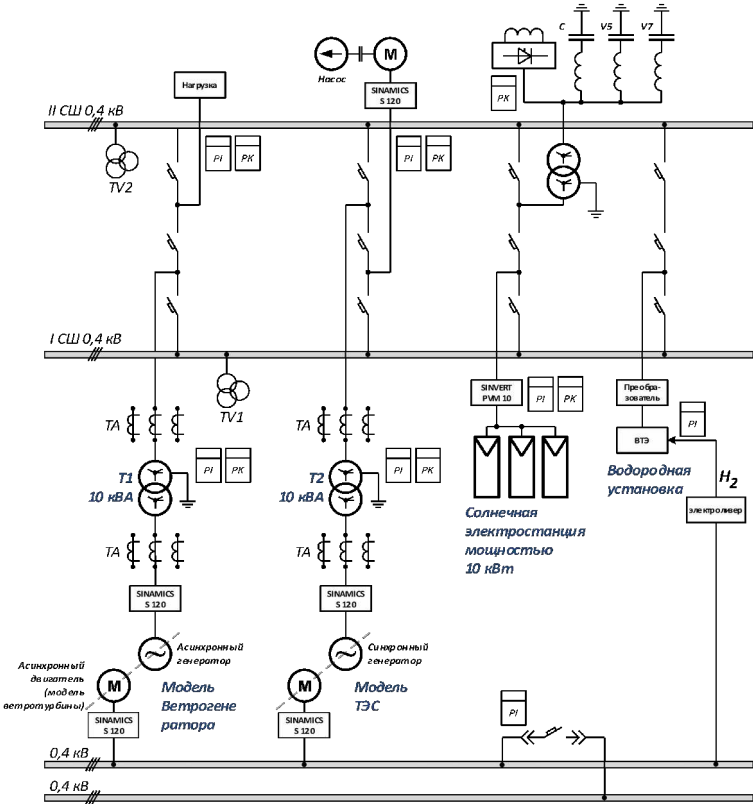


Рис. 1 – Схема главных электрических соединений учебно-научного центра «Smart grid - ДонНТУ»

© В.И. Калашников, С.Н. Ткаченко, П.А. Хижняк, 2015

Для решения этих задач создается экспериментальная база, функциональная схема которой приведена на рис. 1. Модель построена по блочному типу.

Создание физических моделей возобновляемых источников энергии позволяет в условиях ВУЗа проводить научные эксперименты, а также организовать учебный процесс, приближенный к реальным условиям. Магистрантам и аспирантам предоставляется возможность выполнять свои исследования в области повышения энергетической эффективности и надежности работы как отдельных источников возобновляемой энергетики, так и их объединения в единый энергетический комплекс, создастся экспериментальная база для разработки методов расчета и прогнозирования краткосрочных и среднесрочных режимов работы ветро- и солнечной электростанций; совершенствовать систему управления преобразованием, распределением и накоплением энергии. Благодаря физическим моделям студенты смогут освоить теоретические основы и технологии комплексного использования возобновляемых источников энергии, обосновывать новые подходы строительства и архитектурные решения с учетом новых технологических принципов современной энергетики. А главное, создается возможность научить студентов научно мыслить, принимать оправданные инженерные решения как при моделировании, так и при проектировании новых источников возобновляемой энергетики, диагностике уже существующих, давать оценку ресурсного потенциала и вносить свои предложения по использованию возобновляемой энергетики на промышленных предприятиях и в быту.

Модель тепловой электростанции. Модель паровой турбины реализуется на симуляторе режимов работы паровой турбины, который выдает сигнал управления на частотно-регулируемый электропривод, что обеспечивает исследование статических и динамических режимов работы тепловой электростанции. Физическая модель генератора реализуется на реальном частотно-регулируемом приводе с устройствами защиты и управления, которые через шину PROFIBUS связаны с системой управления всей Smart Grid.

Модель ветровой электростанции. Модель ветровой электростанции, симулятор ветровой турбины и симулятор регулирования поворота лопастей выдают задание на частотно-регулируемые электроприводы, обеспечивающие изменение скорости ветровой турбины и регулирование её мощности в статических и динамических режимах при различной ветровой ситуации. Выполненные научные исследования на действующей модели ветровой электростанции подтвердили основные теоретические предпосылки создания подобного рода экспериментальной установки.

Модель солнечной электростанции. В качестве модели солнечной электростанции принята солнечная установка мощностью 10 кВт на базе преобразователя Sinvert™ фирмы Siemens®. Система автоматического управления солнечной электростанцией также через шину PROFIBUS соединена с общей системой управления Smart Grid. В настоящее время солнечная электростанция работает в режиме симуляции солнечной активности. Симулятор солнечной активности построен на базе регулируемого преобразователя постоянного тока

Simoreg™ Master Drive. Данная конструкция позволяет производить все виды наладочных работ, проводить научные исследования режимов работы солнечной электростанции на питающую сеть.

Модель водородной электростанции. Исходя из условий техники безопасности при производстве и хранении водорода, в качестве модели водородной электростанции предполагается использование учебной водородной установки «Nexa® Lernsystem» мощностью 1,2 кВт.

Компенсатор реактивной мощности. В качестве компенсатора реактивной мощности использованы разработки кафедры систем программного управления и мехатроники по созданию динамического компенсатора реактивной мощности на базе информации о мгновенной реактивной мощности [6].

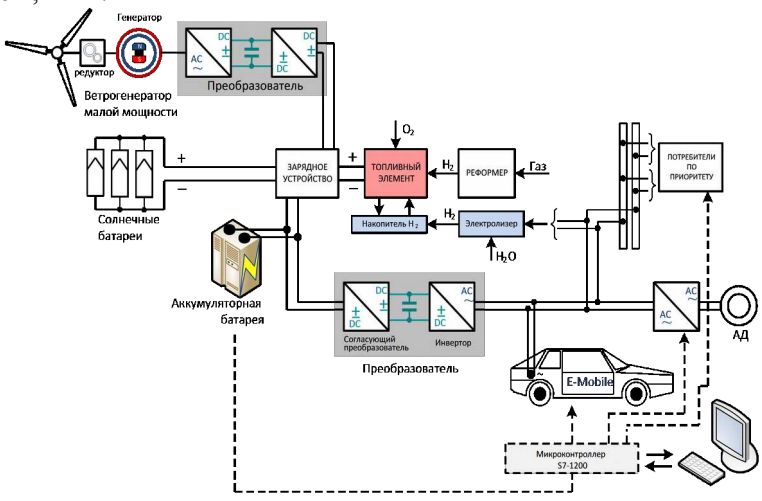


Рис. 2 – Функциональная схема автономной микрогрид-системы

В последнее время в мировой практике накоплен большой опыт создания MicroGrid (SmartHouse). Идея этих разработок сводится к главному – максимально обеспечить электроэнергией собственное потребление с минимальным потреблением-отдачей энергии в сеть. Особое место в этой проблематике занимают автономные системы энергоснабжения. Анализ литературных источников показывает, что наиболее перспективными являются автономные системы энергообеспечения, с использованием интегрированной солнечно-ветровой энергетической установки с накоплением энергии на основе водородного цикла [7]. Одним из новых мощных электропотребителей для автономных источников альтернативной энергии является электромобиль. При массовом внедрении электромобиля процесс его зарядки станет одним из основных требований к SmartHouse.

Рассмотрим систему автономного комплекса обеспечения (рис.2) электроэнергией используя только три альтернативных источника электроэнергии (ветер, солнце и водород).

Зададимся, что работа установки происходит в неблагоприятных условиях (короткий солнечный день, безветренная погода), накопители энергии на начальный день работы показывают максимальный заряд, установка должна обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей в течение одного календарного месяца (30 дней), срок надежной эксплуатации установки более 10 лет.

Всегда необходимо помнить о суточном потреблении и суточном приросте (возобновлении) электроэнергии, максимальном пиковом потреблении, которое может обеспечить оборудование. В связи с чем многие работы [6-8] по данной теме уже раскрыли вопросы оптимального подбора компонентов энергосистемы: разработаны и реализованы системы учёта, прогнозирования и регулирования, распределения потребления в течение суток (статистическая информация, системы нечеткой логики и т.д.). На опыте данных работ можно обозначить, что основной проблемой внедрения автономной возобновляемой энергетики на данном этапе являются:

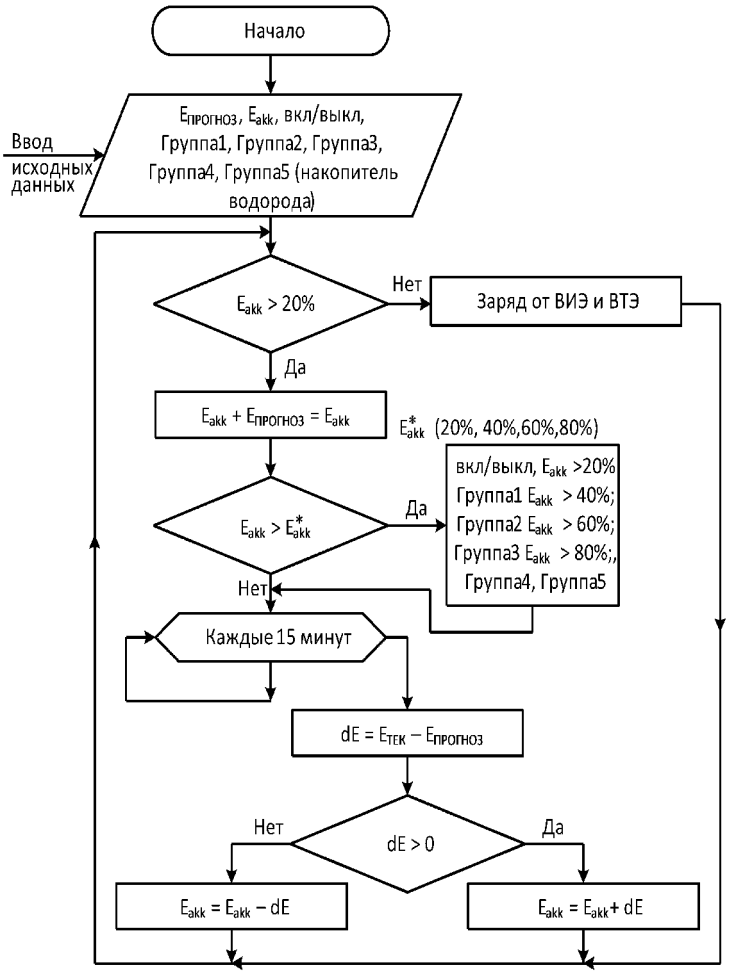


Рис.3 – Алгоритм управления автономной микрогрид-системой

- отсутствие массовости внедрения;
- высокая удельная стоимость оборудования;
- низкий уровень предложений для каждого региона;
- проблемы внедрения на существующих потребителях;
- относительно низкая окупаемость оборудования;
- высокие темпы развития альтернативной энергетики.

Также необходимо выделить, что альтернативная энергетика ставит своей задачей генерирование больше энергии, чем потребляется, с тем, чтобы иметь возможность накапливать и перераспределять энергию между установками потребления энергии. А также обеспечить перераспределение энергии к мощным пиковым потребителям, как например, электромобилям в процессе зарядки, различного рода нагревательным элементам, двигательной нагрузке.

Возможности альтернативной энергетики, как накопление водорода, используя энергию ветра или солнца очень перспективны. И в настоящее время водород рассматривается как один из перспективных лидеров энергетического баланса и стабильности. Применяя водородный топливный элемент (ВТЕ) как основу в системе солнце-ветер-водород, мы избавляемся от проблем и недостатков солнечной и ветровой энергетики и раскрываем преимущества водородной. Новейшие разработки в направлении получения водорода сразу из солнечной энергии (фотоэлектрохимический метод), а также наработки по производству электролизёра высокого давления позволяют упростить всю систему в целом и сконцентрироваться на работе с водородом как топливом.

В настоящее время только традиционные источники и инфраструктура энергии сдерживают массовое внедрение и переход на альтернативные, компактные, индивидуальные источники энергии. Стремительное развитие микроэнергетики с применением достижений альтернативной энергетики составят весомое дополнение (а не замену) к существующей инфраструктуре энергетики. Особое внимание следует уделить вопросу обеспечения энергией удаленных регионов. Особенно там, где мощности не являются производственными (до 100 кВт), как например, метрологические станции, ретрансляторы сигналов, небольшие удалённые поселения, личное жилье и др.

Так же одним из новых и актуальных веяний современности является электромобиль. Весомые перспективы раскрывает переход личного транспорта населения из разряда классического бензинового, газового или дизельного в разряд легко обслуживаемого и безопасного электромобиля. Единственным серьезным препятствие

является отсутствие инфраструктуры зарядных станций для электромобилей и не приемлемо возрастающей нагрузки на энергосистему при предъявлении таких требований, как быстрая зарядка (менее получаса, когда сейчас заряд аккумулятора мощностью 24 кВт/ч от обычной розетки происходит за 8 часов) и дистанция пробега электромобиля на одном заряде свыше 100 км. В связи с чем достижения в области возобновляемой энергетики и их применение в микрогрид, на каждой станции должны будут форсировать продвижение электромобилей в повседневной жизни.

Достижения в области использования возобновляемых источников энергии привели к тому, что сегодня возобновляемая энергетика стала составной частью электроэнергетических систем. Будущим в энергообеспечении являются интеллектуальные энергосистемы (Smart Grid) с оптимизацией совместной работы различных источников энергии, повышением энергоэффективности вдоль всей цепочки от источника до потребителя. Smart Grid позволяет оптимизировать использование возобновляемых источников энергии и минимизировать коллективное воздействие общества на окружающую среду. Европейский опыт показывает, что в первую очередь должны быть изменены концепции энергораспределения. Перераспределение будет идти в сторону системных услуг. Служба сетей частично будет передавать ответственность за надежность энергообеспечения и их управления на службу электроснабжения. При этом сети электроснабжения возьмут на себя не только задачи контроля, управления и обеспечения качества снабжения, но также и системные услуги, такие как поддержание частоты и напряжения, а также частично и распределение нагрузки. Все это делает необходимым контроль показателей качества. Устойчивое и надежное управление электрической сетью может быть обеспечено только при непрерывном измерении и устойчивой коммуникации при передаче параметров работы всей системы. Это позволяет своевременно обнаружить, какая часть системы перегружена и перенаправлять мощность для снижения перегрузки и предупредить аварийные отключения. Это достигается, прежде всего, за счет применения современных средств силовой электроники (высоковольтные линии постоянного тока, динамические компенсаторы реактивной мощности, тиристорные ограничители токов короткого замыкания и т.д.).

Однако, учитывая непредсказуемость погодных условий, обеспечить стабильную работу системы без накопителей энергии невозможно.

Одной из основных функций в автономных системах является система энергоменеджмента. При этом задача состоит не только в разумном распределении энергии в соответствии с приоритетами, но и с её прогнозированием. Зная распределение солнечной и ветровой ситуации, которые получены на протяжении многих лет наблюдений, можно утверждать, что в будущем, в тот же день или месяц будут аналогичные показатели. Тем самым можно предсказать количество энергии на следующий день и какую группу потребителей можно использовать в текущий день. Эти предпосылки положены в основу разработки программы энергоменеджмента с учетом прогноза погоды. Один из возможных алгоритмов работы приведен на рис. 3.

В начале алгоритма описываются все переменные, которые участвуют в его реализации. Из рисунка видно, что учитывается текущее значение энергии в аккумуляторе (E_{akk}), данные которые прогнозируют будущее значение энергии по дням ($E_{ПРОГНОЗ}$), текущее значение энергии солнца и ветра ($E_{ТЕК}$) и ошибку в определении текущей и прогнозируемой энергии, задаются приоритеты потребителей, например, от 1 до 5.

Прежде чем распределять энергию между потребителями, требуется проверить наличие энергии в аккумуляторе ($E_{ТЕК}$). Если энергии недостаточно, то система подзаряжается от солнечных батарей и от ветроустановки или дополнительно от водородных топливных элементов. В случае, когда энергии в аккумуляторе достаточно для включения группы потребителей требуется проверить, будет ли дополнительная энергия или нет. Для этого текущее значение получаемой в данный момент энергии солнца и ветра сравнивается с табличным значением ожидаемого прогноза. Сравнение данных происходит каждые 15 минут. Это время соответствует среднестатическому изменению поступления возобновляемой энергии.

После проверки, зная результирующую энергию, видно какую группу потребителей можно включить. Потребители разбиты по приоритетам. При полном заряде аккумулятора (80-100%) можно включить все группы потребителей. При заряде аккумулятора от 80% до 40% четвертая группа (электрокипятильник, стиральная машина, электроинструмент и т.д.) будет заблокирована для включения. При достижении заряда аккумулятора меньше 20% система отключаются все группы потребителей кроме первой (система управления автономной установкой) и заряжается от солнца и ветра, либо от водородной установки. Так же в программе предусмотрена функция блокировки включения одновременно нескольких групп, которые содержат мощные потребители. Весь избыток полученной энергии используется для накопления водорода. Реализация данного алгоритма энергоменеджмента автономной установки реализована на контроллере Siemens® Simatic™ Basic S7-1200.

Выводы. В процессе проведения научных исследований по созданию как стационарных, так и мобильных автономных энергоустановок выявлено, что необходимы дальнейшие комплексные научные и практические исследования:

- выбор рационального соотношения мощностей отдельных составляющих энергоустановки;
- рациональный выбор комплектующих элементов энергоустановки;
- разработка методов контроля и диагностики работоспособности отдельных элементов и энергоустановки в целом;
- разработка архитектурных условий для размещения на вновь строящихся зданиях солнечных, ветровых

и водородных компонентов интегрированной энергосиловой установки;

- разработка средств коммуникации автономной энергоустановки с локальной электрической сетью;
- разработка концепции и содержания междисциплинарной подготовки и переподготовки специалистов в области возобновляемой энергетики.

Список литературы: 1. Сибикин Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. - М.: КНОРУС, 2010. – 232 с. **2.** Стычинский З. А. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н.И. Воропай – Magdeburg: Издательство Магдебургского университета имени Отто-фон-Герике (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg). docupoint GmbH, 2010.– 209 с. **3.** Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Журнал «Технічна електродинаміка». – 2010, – №6. – С. 44-50. **4.** Официальный сайт научно-учебного центра «Smart Grid - ДонНТУ». Режим доступа: http://smartgrid.donntu.org. **5.** Ткаченко С.Н. Энергосистема будущего. Концепция Smart grid. Специфика реализации на Украине / Журнал «Електротехніка та електроенергетика». – Випуск 1. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 68 – 73. **6.** Авторское свидетельство SU 1494109 A1, Союз советских социалистических республик, 4H02J3/18. Способ управления статическим компенсатором реактивной мощностью / Калашников В.И., Калашников С.Н., Дикий Ю.А.; заявитель и правообладатель Донецкий политехнический институт и Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования. – № 4205269; заявка 02.03.1987; опубл. 15.07.1989. **7.** Андреев В.А. Интегрированная солнечно-ветровая энергетическая установка с накопителями энергии на основе водородного цикла / А.Г. Забродский, С.О. Когновицкий // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ № 2(46) . – 2007. – С.99-105. 8**.** Калашников В. И. Накопление возобновляемой электрической энергии – проблемы и перспективы развития / В.И. Калашников, А.В. Левшов, С.Н. Ткаченко // Журнал «Электротехнические и компьютерные системы». Образование, наука, производство. – 2014, – № 15 (91). – С.20-23.

Bibliography (transliterated): 1. Sibikyn Y.D., Sibikin M.Y. *Netradicionnie i vozobnovlyaemyie istochniki energii: uchebnoe posobie*, Moskva.: KNORUS, 2010. – 232 p. Print. 2. Stychysky Z.A., N.I. Voropay *Vozobnovlyaemyie istochniki energii: Teoreticheskyie osnovy, technologii. Technicheskie harakteristiki, ekonomika*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. docupoint GmbH, 2010. – 209 p. Print. **3.** Stogniy B.S., Kyrylenko O.V., Denisyuk S.P. «Intelektualny electrichni meregi elektroenergetichnyh system ta yichne technologichne zabezpechennya». Journal «Technichna electrodinamika». 2010, №6. P. 44-50. Print. **4.** Officialniy sait nauchno-uchebnogo centra «Smart Grid - DonNTU». 2015. Web. 10 August 2015 < http://smartgrid.donntu.org>. **5.** Tkachenko S.N. «Energosystema budushego. Koncepcia Smart grid. Specifika realizacii na Ukraine». Journal «Elektrotechnika ta electroenergetika». Vypusk 1. Zaporigia ZNTU, 2014. P. 68-73. Print. **6.** Avtorskoe svidetelstvo SU 1494109 A1, Souyz sovetskyh socialisticheskyh respublik, 4H02J3/18. Kalashnikov V.I., Kalashnikov S.N., Dikiy Y.A. «Sposob upravleniya staticheskym kompensatorom reaktivnoy moshnostyu», zayavitel i pravoobladatel Donetskiy politehnicheskiy insitut i Vsesoyusniy nauchno-issledovatelskiy, proektno-konstruktorskiy, i tehnologicheskiy institut vzryvozashishiennogo elektrooborudovania. № 4205269; zayavka 02.03.1987; opubl. 15.07.1989. Print. **7.** Andreev B.A., Zabrodsky A.G., Kognovicky S.O. «Integrirovannaya solnechno-vetrovaya enegeticheskaya ustanovka s nakopitelyami vodorodana osnove vodorodnogo cikla». Megdunarodny nauchniy journal «Alternativnaya energetika i ekologia» № 2(46). 2007. P.99-105. Print. **8.** Kalashnikov V.I., Levshov A.V., Tkachenko S.N. «Nakoplenie vozobnovlyaemoy elektricheskoy energii – problemy i perspektivy razvitiya». Journal «Elektromehanicheskie i komputernie systemy ». Orazovanie, nauka, proizvodstvo. 2014, № 15 (91). P.20-23. Print.

Поступила (received) 25.08.2015

УДК 621.3.011:621.372

О. О. БІЛЕЦЬКИЙ, аспірант НТУУ «Київський політехнічний інститут»;
А. А. ЩЕРБА, чл.-кор., Інститут електродинаміки НАН України, Київ;
Н. І. СУПРУНОВСЬКА, к.т.н., Інститут електродинаміки НАН України, Київ.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КІЛ АПЕРІОДИЧНОГО ЗАРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ВІД АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Вступ. Сучасні електротехнічні системи орієнтовані на використання накопичувачів електроенергії, які здатні швидко реалізовувати у навантаженні великі імпульсні потужності і струми. Для вирішення такої задачі все частіше використовують суперконденсатори (СК), основним призначенням яких є реалізація короткочасних великих потужностей в електротехнічних і електромеханічних системах. Розробники заявляють, що сучасні СК без суттєвого погіршення їх енергетичних характеристик витримують мільйон і більше циклів заряд – розряд при великих зарядних і розрядних короткочасних струмах [2, 11-14].

З іншого боку, виробники сучасних електромобілів вже широко використовують літій-іонні акумуляторні батареї (АБ) [8-10], які мають ресурс 8 і більше років, що відповідає реалізації 2–3 тисяч зарядно-розрядних циклів, або 160 тис. км пробігу електромобілів [8, 9,13]. З метою досягнення більш тривалого ресурсу АБ, виробники продовжують шукати методи оптимізації їх режимів з точки зору збільшення кількості робочих циклів. Одним із таких методів є використання більш товстого сепаратора, що негативно впливає на вагу і габарити елементів АБ. Для збільшення ресурсу АБ їх заряджають на менші , ніж номінальні напруги. І все таки АБ добре себе зарекомендували для роботи на навантаження зі стабільним споживанням енергії, але при роботі в пікових режимах їх енергетичні характеристики суттєво погіршуються, а ресурс зменшується [13].

На даний час при електроживленні нестаціонарних споживачів найбільш доцільним вважається використання гібридної системи електроживлення, яка базується на одночасному використанні АБ і СК. Але всебічний огляд наукових досліджень в Україні і за кордоном щодо методів підвищення енергетичних характеристик систем електроживлення з паралельним включенням АБ і СК показав [8-14], що такі системи досліджуються без урахування втрат електроенергії в колах заряду і дозаряду СК. У відомих роботах не вирішувались також задачі підвищення коефіцієнта передачі енергії від АБ до СК при різних початкових напругах на його клемах.

Постановка задачі та обговорення отриманих результатів. Дані дослідження спрямовані на підвищення енергетичних характеристик електричних кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від АБ на основі визначення та використання закономірностей впливу початкових напруг на клемах СК на коефіцієнт передачі енергії від АБ до суперконденсаторів і на втрати електроенергії в колах їх аперіодичного заряду (підзаряду).

В попередніх роботах [2, 4, 11] зазначалось, що згідно фізики процесів в СК частина його ємності залежить від напруги на клемах, що необхідно ураховувати при зміненні як накопиченого заряду в СК, так і накопиченої електричної енергії.

За умовами експерименту СК заряджався від літій-іонної АБ [8], причому в ураховувалось зростання ємності суперконденсатора при збільшенні напруги на його клемах. Загальна ємність СК представлялась сумою незмінної ємності $C_1 = const$ і ємності $C_v(U) = k \cdot U$, яка згідно результатам робіт [2, 4, 8-16] лінійно залежить від величини напруги на клемах СК. На основі багатьох експериментальних досліджень у роботах [2, 11, 14, 16] було обґрунтовано, що коефіцієнт $k = dC_v / dt$, який має розмірність [Ф/В], з високою точністю можна вважати сталою величиною для всіх досліджуваних СК, а загальну ємність СК можна визначати як:

$$C(U) = C_1 + k \cdot U \qquad (1)$$

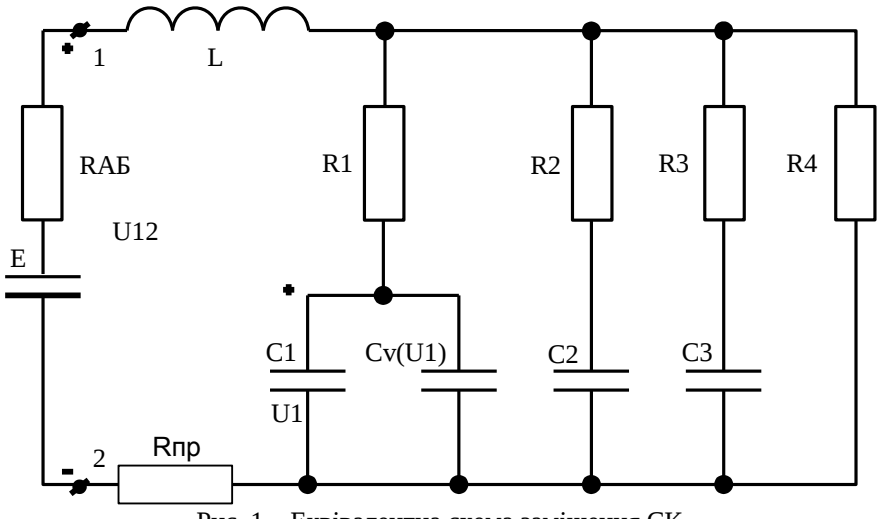


Рис. 1 – Еквівалентна схема заміщення СК

Для моделювання енергетичних процесів в СК у роботах [4, 14,16] було розроблено його еквівалентну схему заміщення, представлену на рис.1.

Ця схема використовувалась у статті для аналізу впливу ненульових початкових напруг СК на енергетичні характеристики кола його аперіодичного заряду.

Згідно з виразом (1) перша гілка представлена конденсатором, ємність якого залежить від напруги [16]. В ній значення ємності $C_v(U_1)$ залежить від різниці напруги прикладеної до клем СК і падіння напруги на не-

© О.О. Білецький, А.А. Щерба, Н.І. Супруновська, 2015

змінному опорі R_1. Конденсатори в даній гілці заряджаються в секундному часовому діапазоні, завдяки малій сталій часу. Гілка з незмінними елементами C_2 та R_2 працює в хвилинному часовому діапазоні. Стала часу третьої гілки з постійними елементами C_3 та R_3 найбільша і працює в діапазоні часу від 10 хвилин. В схемі заміщення додано опір R_4 для врахування саморозряду суперконденсатора.

Джерелом постійної напруги виступала літій-іонна акумуляторна батарея з внутрішнім опором $R_{АБ}$. В схемі заміщення враховувалась індуктивність зарядного контуру L і опір проводів $R_{ПР}$.

Ємність С звичайних лінійних конденсаторів не залежить від напруги їх заряду U, а накопичена в них енергія визначається виразом [1]:

$$W_{лк} = CU^2/2. \tag{2}$$

Змінення електричної енергії в суперконденсаторі [4] при протіканні між його обкладками струму i(t) за проміжок часу $\Delta t = t_2 - t_1$ (і відповідно змінення величини заряду Q на кожній з них від Q_1 до Q_2 і величини напруги U між ними від U_1 до U_2) можна знайти з виразу:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \int_{t_1}^{t_2} U(t)\cdot i(t)\cdot dt = \int_{Q_1}^{Q_2} U\cdot dQ = \int_{U_1}^{U_2} U\cdot(C_1 + 2kU)\cdot dU\ . \tag{3}$$

Звідки можна записати:

$$\Delta W = \frac{C_1\left(U_2^2 - U_1^2\right)}{2} + \frac{2k\left(U_2^3 - U_1^3\right)}{3} = \left(U_2 - U_1\right)\cdot\left[\frac{C_1\left(U_2 + U_1\right)}{2} + \frac{2k\left(U_2^2 + U_2U_1 + U_1^2\right)}{3}\right]. \tag{4}$$

Частковим випадком є заряд СК при нульових початкових умовах ($U(t_п) = 0$), тоді можна отримати вираз для енергії $W_{СК}$, накопиченої в СК при певній кінцевій напрузі $U_к$=U:

$$W_{СК} = \int_{t_п}^{t_к} U(t)\cdot i(t)\cdot dt = \int_{Q_п}^{Q_к} U\cdot dQ = \int_{U_п}^{U_к} U(C_1 + 2kU)\cdot dU = C_1U^2/2 + 2kU^3/3\ . \tag{5}$$

Доза енергії, яка відбирається від АБ [7] $W_{АБ}$, знаходиться за формулою:

$$W_{АБ} = \int_{t_п}^{t_к} U_{АБ}\, i(t)\cdot dt\ , \tag{6}$$

де $U_{АБ}$ – напруга акумуляторної батареї.

Коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$, рівний відношенню енергії, яка поступила в СК, до енергії, яка відібрана від АБ за весь час заряду:

$$\eta_{СК} = \left(W_{СК}(t_к) - W_{СК}(t_п)\right)/\left(W_{АБ}(t_п) - W_{АБ}(t_к)\right)\ , \tag{7}$$

де $W_{СК}(t_п), W_{СК}(t_к)$ – енергії, які були накопичені в СК відповідно до комутації і після завершення перехідного процесу заряду від АБ; $\Delta W_{АБ} = W_{АБ}(t_п) - W_{АБ}(t_к)$ – енергія, яку віддала АБ за час перехідного процесу.

З виразів (5), (6) і (7) отримаємо енергію втрат в колі заряду СК від акумуляторної батареї. Енергія втрат є різницею між енергією, відданою АБ і енергію, яку отримав в процесі заряду СК:

$$W_{втрат} = \left(W_{АБ}(t_п) - W_{АБ}(t_к)\right) - \left(W_{СК}(t_к) - W_{СК}(t_п)\right). \tag{8}$$

Для аналізу енергетичних характеристик кола заряду СК від АБ було виконано математичне моделювання в пакеті прикладних програм Matlab. Параметри еквівалентної електричної схеми кола заряду СК [8-10, 16] приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри еквівалентної електричної схеми кола заряду

Параметри кола заряду СК		Параметри схеми заміщення СК								Параметри літій-іонної АБ	
L, мГн	$R_{ПР}$, Ом	R_1, Ом	C_1, Ф	k, Ф/В	R_2, Ом	C_2, Ф	R_3, Ом	C_3, Ф	R_4, Ом	E, В	$R_{АБ}$, Ом
4,24	0,01	0,0025	270	190	0,9	100	5,2	220	9000	2,3	0,012

Параметри кола заряду СК вибрано таким чином, щоб виконувалася умова аперіодичного заряду (добротність контуру була не більше 0,5): $\frac{1}{R_\Sigma}\cdot\sqrt{\frac{L}{C}} \le 0{,}5$.

З **метою** визначення оптимальних режимів аперіодичного заряду СК, виконано аналіз енергетичних характеристик заряду СК від акумуляторної батареї, при ненульових початкових напругах на СК, в діапазоні – $U_{АБ} < U_{0СК} < +U_{АБ}$. При дослідженні початкові і кінцеві умови для струму в контурі заряду однакові: i(t=0)= i(t=∞)=0. Проведено аналіз дози енергії, яка поступає в СК; дози енергії, яка відбирається від АБ; енергії втрат в колі заряду СК і коефіцієнта передачі енергії від АБ при заряді від джерела постійної напруги (АБ). Досліджено двадцять одну точку: $-U_н, -0{,}9\cdot U_н, \ldots, +U_н$.

На рис. 2 показано функціональні залежності від початкової напруги на СК, приведеної до значення $U_{АБ}$ ($U_{0СК}/U_{АБ}$):

- $W'_{СК}$ – дози енергії $W_{СК}$, яка поступає в СК за час його одного заряду, приведеної до величини $W_{0АБ}$, тобто до величини дози енергії, яка відбирається від АБ при заряді повністю розрядженого СК ($U_{0СК}$ (t=0) =0);
- $W'_{АБ}$ – дози енергії $W_{АБ}$, яка при цьому відбирається від АБ, приведена до величини $W_{0АБ}$;
- енергії втрат $W'_{втрат}$ в колі аперіодичного заряду СК, приведеної до величини $W_{0АБ}$;
- коефіцієнта передачі енергії від АБ при заряді суперконденсатора $\eta_{СК}$.

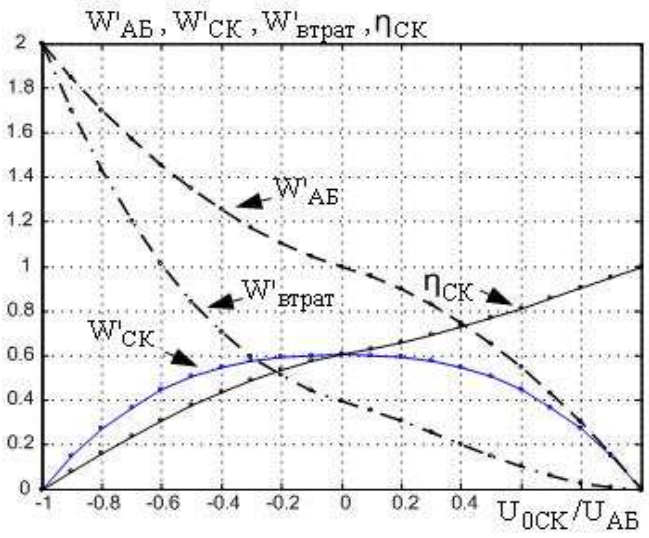


Рис. 2 – Залежності приведених енергетичних СК характеристик від приведеної напруги на СК

Таблиця 2 – Експериментальні дані

$U_{0СК}$ /$U_{АБ}$	$U_{0СК}$, В	$W_{СК}$, Дж	$W_{АБ}$, Дж	$W_{втрат}$, Дж	$\eta_{СК}$
-1,0	-2,30	0	7480,06	7480,06	0
-0,9	-2,07	552,30	6898,00	6345,70	8,00
-0,8	-1,84	1008,30	6362,18	5353,88	15,85
-0,7	-1,61	1376,50	5872,58	4496,08	23,44
-0,6	-1,38	1665,20	5429,23	3764,03	30,67
-0,5	-1,15	1884,00	5032,10	3148,10	37,44
-0,4	-0,92	2042,40	4681,22	2638,82	43,60
-0,3	-0,69	2149,40	4376,57	2227,17	49,11
-0,2	-0,46	2214,40	4118,16	1903,76	53,77
-0,1	-0,23	2246,60	3905,97	1659,35	57,51
0	0	2255,30	3740,03	1484,73	60,30
0,1	0,23	2246,61	3574,08	1327,46	62,86
0,2	0,46	2214,40	3361,90	1147,49	65,87
0,3	0,69	2149,42	3103,48	954,06	69,26
0,4 0,92	2042,41	2798,83	756,43	72,97	
0,5	1,15	1884,12	2447,95	563,83	76,97
0,6	1,38	1665,32	2050,83	385,51	81,20
0,7	1,61	1376,75	1607,48	230,72	85,65
0,8	1,84	1009,28	1117,88	108,71	90,30
0,9	2,07	553,34	582,06	28,72	95,00
1,0	2,30	0	0	0	1,00

В табл. 2 приведені значення:
- дози енергії $W_{СК}$, яка поступає в СК за час заряду від напруги $U_{0СК}$ до $U_н$;
- дози енергії $W_{АБ}$, яка відбирається від АБ за час заряду від напруги $U_{0СК}$ до $U_н$;
- енергії втрат $W_{втрат}$ в колі заряду СК від напруги $U_{0СК}$ до $U_н$;
- коефіцієнта передачі енергії від АБ, при різних значеннях напруг $U_{0СК}$ / $U_{АБ}$.

Приведені розрахунки в пакеті прикладних програм Matlab узгоджуються з математичними залежностями (1)-(7).

Виконаємо аналіз енергетичних характеристик СК (дози енергії, яка поступає в СК ; дози енергії, яка відбирається від акумуляторної батареї, енергії втрат в колі; коефіцієнта передачі енергії від АБ) при ненульових початкових умовах по напрузі $U_{0СК}$.

З табл. 2 видно, що при заряді СК зі зміною початкової напруги з $U_{0СК}$ = – 0,9$U_{АБ}$ до 0,9$U_{АБ}$, коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ збільшується в 11,9 раз. При заряді СК від $U_{0СК}$ = 0,5$U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ зростає в 1,28 рази в порівнянні з коефіцієнтом передачі енергії при $U_{0СК}$ = 0. При збільшенні початкової напруги на СК до 0,8$U_{АБ}$ коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ складає 90,3 %, що в 1,5 рази більше коефіцієнта передачі при нульових початкових умовах по напрузі ($U_{0СК}$ = 0). Даним дослідженням підтверджено, що коефіцієнт передачі при $U_{0СК}$ = 0 становить 60,3 %, що в 1,2 рази більше коефіцієнта передачі для ЛК при тих же умовах [1]. При заряді СК в діапазоні напруг $U_{0СК}$ >0,9$U_{АБ}$ коефіцієнт передачі енергії від АБ зростає до $\eta_{СК}$>95 %.

Доза енергії, яка поступає в СК при заряді від напруги $U_{0СК}$ = 0,5$U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ в 1,2 рази менше дози енергії, яка поступає при заряді СК від напруги $U_{0СК}$ = 0, але при цьому енергія втрат в колі заряду СК зменшується в 2,63 рази. При заряді СК від напруги $U_{0СК}$ = 0,8$U_{АБ}$ (або 0,9$U_{АБ}$) до $U_{АБ}$ доза енергії, що поступає в СК, зменшується в 2,23 (або 4,08) рази (при порівнянні з зарядом СК при нульових початкових умовах), в той час як втрати будуть меншими в 13,7 (або 51,7) раз, ніж втрати при заряді СК при $U_{0СК}$ = 0.

Доза енергії, що відбирається від АБ при заряді СК від напруги $U_{0СК}$ = 0,5$U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ в 1,53 рази менше дози енергії, яка відбирається при заряді від напруги $U_{0СК}$ = 0. При заряді СК від напруги $U_{0СК}$ = 0,8$U_{АБ}$ і 0,9$U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ доза енергія, що відбирається від АБ, буде меншою в 3,35 і 6,42 рази відповідно, ніж доза енергії від АБ при нульових початкових умовах.

При порівнянні енергетичних характеристик ЛК і СК найбільш енергоефективний заряд відбувається в діапазоні напруг від + 0,9$U_н$ до + $U_н$. При однаково високих коефіцієнтах передачі енергії ($\eta_{СК}$ = $\eta_{ЛК}$ = 0,95) перевагою СК є те, що він накопичує на 305,1 % більше енергії, ніж ЛК.

Слід зауважити, що енергетичні характеристики зарядних кіл суперконденсаторів при їхньому заряді від початкової напруги $U_{0СК} = 0$ до кінцевої напруги $U_{СК} < U_{АБ}$ суттєво відрізняються від характеристик цих кіл при заряді СК від початкової напруги $U_{0СК} > 0$ до кінцевої напруги $U_{СК} \approx U_{АБ}$. Зокрема при початковій напрузі $U_{0СК} = 0$ і кінцевій напрузі $U_{СК} = 0{,}25U_{АБ}$ коефіцієнт передачі електроенергії від АБ до СК становить $\eta_{СК}$= 13,7%.

В той же час при початковій напрузі $U_{0СК} = 0{,}25U_{АБ}$ і кінцевій напрузі $U_{СК} = U_{АБ}$ коефіцієнт передачі електроенергії $\eta_{СК}$= 58,1 %. Якщо заряджати СК від початкової напруги $U_{0СК} = 0$ до кінцевої $U_{СК} = 0{,}5U_{АБ}$, то коефіцієнт передачі електроенергії $\eta_{СК}$= 28,7 %, а при заряді СК від напруги $U_{0СК} = 0{,}5U_{АБ}$ до напруги $U_{СК} = U_{АБ}$ коефіцієнт передачі електроенергії буде в 2,7 рази вище.

Доза енергія, яка поступає в СК при заряді СК від напруги $U_{0СК} = 0$ до напруги $U_{СК} = 0{,}5U_{АБ}$ в 5,1 раз менще, ніж енергія, яка поступає в СК при заряді від $U_{0СК} = 0{,}5U_{АБ}$ до напруги $U_{СК} = U_{АБ}$. При цих умовах енергія втрат в колі аперіодичного заряду СК в 1,63 разів більше при заряді суперконденсаторів від початкової напруги $U_{0СК} = 0$ до напруги $U_{СК} = 0{,}5U_{АБ}$.

Суперконденсатори є перспективними джерелами енергії для різноманітних електротехнічних систем. Найбільш прогресивним є розвиток гібридних систем електропостачання з СК в електромобілях, завдяки їх здатності швидко віддавати енергію. Однак СК значно поступаються за питомою енергією літій-іонним АБ. Кращі зразки СК мають питому енергію до 30 Вт·год/кг [8-10], а літій-іонні АБ можуть зберігати до 200 Вт·год/кг.

Наразі відомі дослідження вчених про можливості СК на базі графену. В таких СК графенові плівки використовувались в якості електродів, а в ролі струмознімача виступали плівки з вуглецевих нанотрубок. При цьому були досягнуті показники питомої енергії від 8 до 14 Вт·год/кг. В той же час головною перевагою графенових СК є можливість їх виготовлення у вигляді тонких поверхонь. СК у вигляді плівок можливо вмонтовувати в кузовні деталі електромобілів. Питома потужність розроблених в Австралії експериментальних зразків графенових СК досить велика: від 250 до 450 кВт/кг. Дослідники прогнозують появу серійних гібридних електромобілів з графеновими СК у найближчі п’ять років. При наявності в майбутньому новітніх серійних зразків СК на основі інших матеріалів, необхідно буде вдосконалювати електричні схеми заміщення з врахуванням фізики процесів.

Висновки. 1. Виявлено наявність впливу початкових напруг на суперконденсаторі на втрати електроенергії та коефіцієнт її передачі при аперіодичному заряді суперконденсаторів від акумуляторних батарей.

Встановлено, що при аперіодичному заряді суперконденсаторів від літій-іонних акумуляторних батарей величина коефіцієнту передачі енергії $\eta_{СК}$ буде нелінійно зростати від 0 до 100% при зміненні початкової напруги на суперконденсаторі в діапазоні $-U_н < U_{0СК} < +U_н$. Зокрема при заряді суперконденсатора від початкової напруги $U_{0СК} = 0$ до кінцевої напруги $U_{СК} = 0{,}25U_{АБ}$ коефіцієнт передачі до нього електроенергії від акумуляторної батареї буде в 4,2 рази менше, ніж при аперіодичному заряді суперконденсаторів при початковій напрузі $U_{0СК} = 0{,}25U_{АБ}$ до кінцевої напруги $U_{СК} \approx U_{АБ}$.

2. Показано, що при нульовій початковій напрузі на суперконденсаторі коефіцієнт передачі електроенергії при його аперіодичному заряді від акумуляторної батареї становить близько 60,3 %, що в 1,2 рази більше коефіцієнта передачі електроенергії при аналогічних умовах заряду звичайного лінійного конденсатора.

Найбільш енергоефективним є аперіодичний заряд суперконденсаторів (як і звичайних лінійних конденсаторів) при наявності в них початкових напруг, близьких до напруги акумуляторної батареї. Так при зміненні початкової напруги на суперконденсаторі більше $0{,}9U_{АБ}$ коефіцієнт передачі до нього енергії від акумуляторної батареї може перевищувати 95%.

3. Втрати електроенергії в колах аперіодичного заряду суперконденсаторів зменшуються при збільшенні початкової напруги від $U_{0СК} \approx -U_{АБ}$ до $U_{0СК} \approx U_{АБ}$. Максимальними втрати електроенергії будуть при наближенні значення початкової напруги на суперконденсаторів до $-U_{АБ}$. Для зменшення втрат електроенергії у колі аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей необхідно дозаряджати суперконденсатори при найбільш можливих додатних початкових напругах на їх клемах. Так при початковій напрузі $U_{0СК} = +0{,}9U_{АБ}$ втрати енергії зменшуються більше, ніж в 50 разів порівняно з втратами при нульових початкових напругах.

4. Максимальна доза енергії $W_{СК}$, що поступає в суперконденсатор (як і в звичайний конденсатор) при його аперіодичному заряді (підзаряді) від акумуляторної батареї, буде при нульовій початковій напрузі на його клемах, а мінімальна доза енергії – при початкових напругах на суперконденсаторі, близьких до напруги батареї. Але якщо при початковій нульовій напрузі звичайний і суперконденсатор будуть мати однакові ємності, то при повному заряді конденсаторів у першому буде в чотири рази менше накопичено енергії, ніж у другому.

5. Підтверджено, що енергетичні характеристики зарядних кіл суперконденсаторів при їх заряді від акумуляторних батарей суттєво залежать не лише від початкових, але й від їх кінцевих напруг. Причому чим до більших кінцевих напруг буде заряджатись коефіцієнт передачі електроенергії від акумуляторних батарей, тим більшим буде коефіцієнт передачі електроенергії.

6. Таким чином, при використанні суперконденсаторів, які включені паралельно акумуляторним батареям в електротехнічних і електромеханічних пристроях, енергетично доцільно не розряджати їх до нульових напруг (і тим більше не перезаряджати), а використовувати режими підзаряду від акумуляторів при ненульових додатних напругах на клемах суперконденсаторів.

Результати даного дослідження можуть бути корисними і для нових промислових зразків суперконденсаторів (наприклад з графеновими електродами тощо), незважаючи на те, що еквівалентна схема заміщення нових суперкондесаторів може бути вдосконалена, з урахуванням електрофізичних характеристик нових матеріалів їх електродів.

Список літератури: 1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973. – 733 с. **2.** *Изотов В.Ю.* Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора / *В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин* // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2008. – № 6. – С. 114–118. **3.** *Супруновская Н.И.* Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / *Н.И. Супруновская, А.А. Щерба* // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3–12. **4.** *Щерба А.А.* Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку / *А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, О.А. Белецкий* // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. –К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 65–74. **5.** *Щерба А.А.* Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам / *А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, Д.С. Иващенко* // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 12–18. **6.** *Супруновская Н.И.* Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов / *Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, D.S. Ivashchenko, О.А. Белецкий* // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 3–11. **7.** Щерба А.А. Повышение энергетических характеристик при апериодической зарядке конденсатора от источника постоянного напряжения за счет изменения начальных напряжений на конденсаторе / *А.А. Щерба, Н.И. Супруновская* // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. - К.: ІЕД НАНУ, 2008. - Вип. 19. - С. 113-119. **8.** *Burke A.* Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / *Burke A.* // Proc. of the IEEE. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. **9.** *Burke A.* The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / *Burke A., Miller M.* // Journ. of the Power Sources. Iss. 1. V. 196. Jan. 2011. 514–522**.** **10.** *Burke A.* Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / *Burke A., Miller M., Zhao H.* // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. **11.** *Kurzwell P.* Capacitance characterization metods and ageing behaviour of supercapacitors / *Kurzwell P., Frenzel B.* // Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors. – Deerfield Beach, Fl., U.S.A., December 5-7, 2005. ***12.*** Maletin Y. *Matching* the Nanoporous Carbon Electrodes and *Organic Electrolytes in Double Layer Capacitors* / Maletin Y., Novak P., Shembel E., Izotov V. // *Appl. Phys. A: Material Science and Processing*. *– 2006.* – Vol. *82, No. 4. – P. 653–657.* ***13.*** *Mihailescu B.* Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications / *Mihailescu B., Svasta P.,Varzaru G* // U.P.B. Scientific Bulletin, Series C. Iss. 2. V. 75. 2013. P. 277–290. ***14.*** Rafik F. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / Rafik F., Gualous H., *Gallay R., Crausaz A., and Berthon A.* // Journ. of Power Sources. No. 2. V. 165. 2007. P. 928–934. **15.** *Shcherba A.A.* Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load / *Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I.* // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – P. 50–54. **16.** *Zubieta L.* Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / *Zubieta L., Bonert R.* // IEEE Trans. On Industry Applications. No. 1. V. 36. January-February 2000. 199–205.

Bibliography (transliterated): 1. Bessonov, L.A. *Theory of electrical engineering.* – Moskva: Vysshaya shkola, 1973. – 733p. Print. **2.** Izotov, V.Yu., D.G. Gromadsky and Yu.A. Maletin «Simulation and calculation of the operating parameters of the supercapacitor.» *Naukovi visti NTUU «KPI»*. No. 6. 2008. 114–118. Print. **3.** Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A «Protsessy pereraspredeleniya jelektricheskoy jenergii mezhdu parallel'no soedinyonnymi kondensatorami.» // *Theknichna elektrodynamika*. No. 4. 2015. 3–12. Print. **4.** Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I., Beletsky, O.A. «Jenergeticheskie harakteristiki superkondensatorov pri ih zaryade otistochnika napryazheniya i razryade na rezistivnuyu nagruzku.» // *Pratsi Insitutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*: Zbirnyk nauk. prats. Kiev: IED NANU. No. 39. 2014. 65 – 74. Print. **5.** Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I., Ivashchenko, D.S. «Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters.» // *Theknichna elektrodynamika*. No. 3. 2014. 12–18. Print. **6.** Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A., Ivashchenko, D.S. and Beletsky, O.A. «Protsessy obmena jenergiey mezhdu nelineynymi i lineynymi zven'yami jelektricheskoy shemy zameshcheniya superkondensatorov.» // *Theknichna elektrodynamika.* No. 5. 2015. 3–11. Print. **7.** Shcherba, A.A , Suprunovskaya, N.I. «Improving the energy characteristics for aperiodic charging of the capacitor from a DC voltage by changing the initial voltages of the capacitor» // *Pratsi Insitutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*: Zbirnyk nauk. prats. Kiev: IED NANU. No. 19. 2008. 113 – 119. Print. **8.** Burke, A. «Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles.» *Proc. of the IEEE*. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. Print. **9.** Burke, A., Miller, M. «The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications.» *Journ. of the Power Sources*. 1. 196. (Jan. 2011). 514–522**.** Print. **10.** Burke, A.., Miller, M., Zhao, H. «Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density.» Research Report UCD-ITS-RR-12-06. Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. Print. **11.** Kurzwell, P., Frenzel, B. «Capacitance characterization metods and ageing behaviour of supercapacitors // Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors. « – Deerfield Beach, Fl., U.S.A., December 5-7, 2005. ***12.*** *Maletin, Y., Novak, P., Shembel, E., Izotov, V.* «*Matching* the Nanoporous Carbon Electrodes and *Organic Electrolytes in Double Layer Capacitors*» // *Appl. Phys. A: Material Science and Processing*. *– 2006.* – Vol. *82, No. 4. – P. 653–657.* ***13.*** Mihailescu, B., Svasta, P.,Varzaru, G. «Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications.» *U.P.B. Scientific Bulletin*, Series C. 2.75. 2013. 277–290. Print. ***14.*** *Rafik, F., Gualous, H*., Gallay, R., Crausaz, A., and Berthon, A. «Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling.» *Journ. of Power Sources*. No. 2. 165. 2007. 928–934. Print. **15.** Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I. «Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load» // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – P. 50–54. **16.** Zubieta, L., Bonert, R. «Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications.» *IEEE Trans. On Industry Applications.* No. 1. 36. January-February 2000. 199–205. Print.

Надійшла (received) 31.08.2015

Силовая электроника

УДК 519.2

Л. Е. БАХНОВ, канд. техн. наук, директор ГП «НИИ «ХЭМЗ», Харьков;
В. Н. ПАНАСЕНКО, инж., зам.директора ГП «НИИ «ХЭМЗ», Харьков

БЛОК ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ.

В настоящее время на железнодорожных магистралях промышленных комбинатов используются электровозы Днепропетровского электровозостроительного завода. Электровоз рассчитан на питание от контактной сети однофазным током 50Гц с номинальным напряжением 10 кВ. Непосредственно на электровозе устанавливается силовой трансформатор, две преобразовательные установки (два блока выпрямительных полупроводниковых типа ВПБ – 6000 У2 производства РФ) разработки 1987 года.

Эти блоки имеют ряд существенных недостатков:

- большое количество используемых силовых полупроводниковых приборов (диодов Д143 – 630 – 84 шт., тиристоров Т143 – 500 – 24 шт.) с RC – цепями;
- вместе с потоком воздуха, охлаждающего силовые полупроводниковые приборы, в установку попадает токопроводящая пыль, из–за чего относительно часто происходит аварийное отключение преобразователя;
- затруднен ремонт блока из–за ограниченности размеров и насыщенности установленными элементами, кроме того большая масса изделия (1 100 кг) и сложность ремонта связаны с разборкой конструкции самого электровоза и ремонтом в условиях специализированной мастерской.

В институте проведена инициативная разработка нового блока выпрямителя, лишенного вышеуказанных недостатков. Но при этом сохранены габаритно-установочные размеры существующих блоков и места расположения клеммников.

На рис.1. показан общий вид блока выпрямительного полупроводникового модернизированного типа ВПБМ — 6000 У2

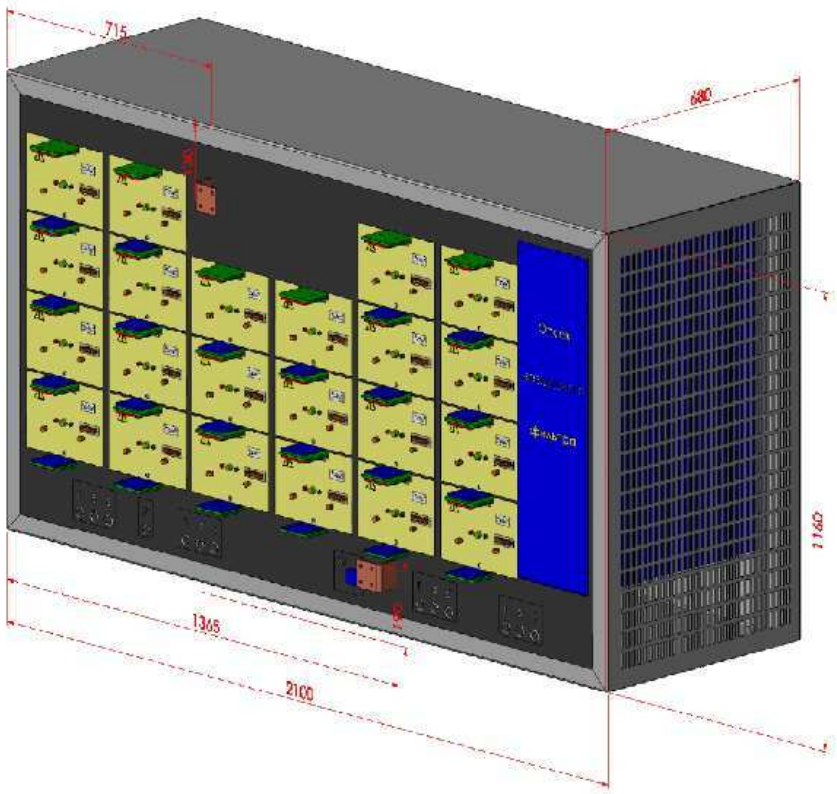


Рис.1. Общий вид типа ВПБМ — 6000 У2.

Каждое плечо содержит одну ветвь вместо шести параллельных. Это обеспечивается применением мощных таблеточных тиристоров Т173 – 5000 – 8 и таблеточных диодов Д163 – 2500 – 32. Наличие в плече блока одной параллельной ветви позволило отказаться от применения индуктивных делителей тока.

© Л.Е. Бахнов, В.Н. Панасенко, 2015

Предусмотрена схема сигнализации о выходе из строя любого из силовых приборов, входящих в состав блока, с выдачей нормализованного сигнала во внешнюю схему и визуальной индикацией на панели машиниста. В модернизированном блоке устанавливается фильтр охлаждающего силовые полупроводниковые приборы воздуха.

Блок типа ВПБМ — 6000 У2 состоит из миниблоков. На рис. 2 показан миниблок.

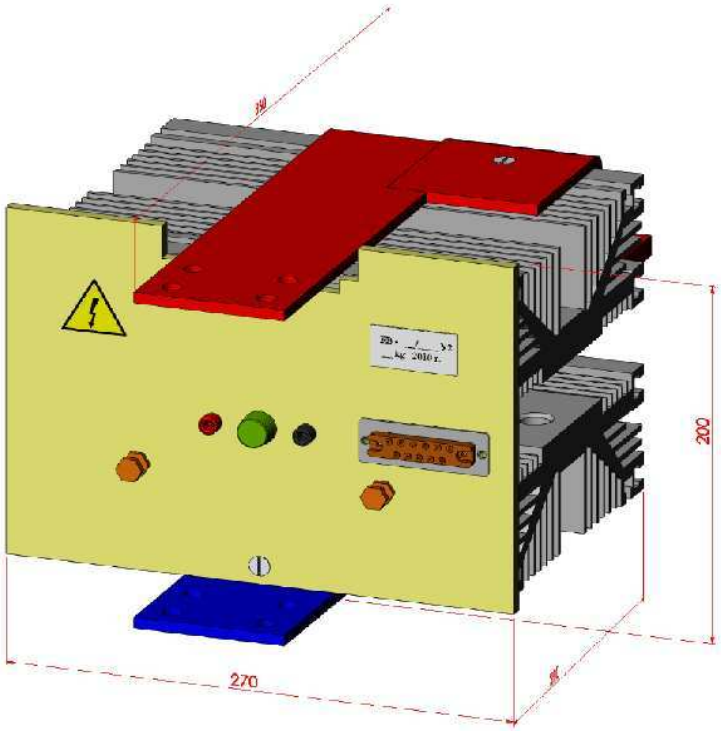


Рис.2. Миниблок. из состава ВПБМ — 6000 У2.

Такое построение конструкции выпрямительных блоков и выбор силовой жлементной базы позволяет при выходе из строя любого одного силового полупроводникового прибора плеча сохранить работоспособность. А также позволяет произвести замену неисправного прибора во время проведения профилактики путем замены миниблока.

Алгоритм работы блока при управлении электровозом. Основные технические характеристики блоков.

Блок выпрямительный для питания тяговых двигателей постоянного тока тяговых агрегатов электровозом обеспечивает плавное регулирование напряжения в цепи питания.

На рис.3 представлена функциональная схема, поясняющая алгоритм работы блока.

Работа начинается когда контакты главного контроллера находятся в положении 1. При этом угол управления тиристорами изменяется от 90 эл.град. до 0 эл.град. После чего главный контроллер переводится в положение, при котором диоды без тока подключаются к той же отпайке трансформатора. Импульсы управления снимаются с тиристоров. В следующем положении главного контроллера тиристоры без тока подключаются к отпайке с более высоким уровнем напряжения. Далее идет регулирование за счет тиристоров и т. д.

Ниже приведены основные технические характеристики блока.

Номинальная мощность, кВт	6000
Выпрямленное напряжение блока:	
номинальное, В	1740
максимальное, В	2020
минимальное, В	1322
Номинальный ток блока при работе диодных и диодно-тиристорных плеч, А	2050

Допускается работа блока с выходным током 3400 А в течение 2 мин и 3060А в течение 15 мин.

Для обеспечения равномерного распределения напряжения по последовательно соединенным тиристорам и диодам в статическом режиме применяются резисторы, шунтирующие тиристоры и диоды, а для защиты полупроводниковых приборов от коммутационных перенапряжений параллельно им подключаются цепочки RC.

Неравномерность распределения обратных напряжений по последовательно соединенным тиристорам и диодам не превышает ±10% от их среднего значения.

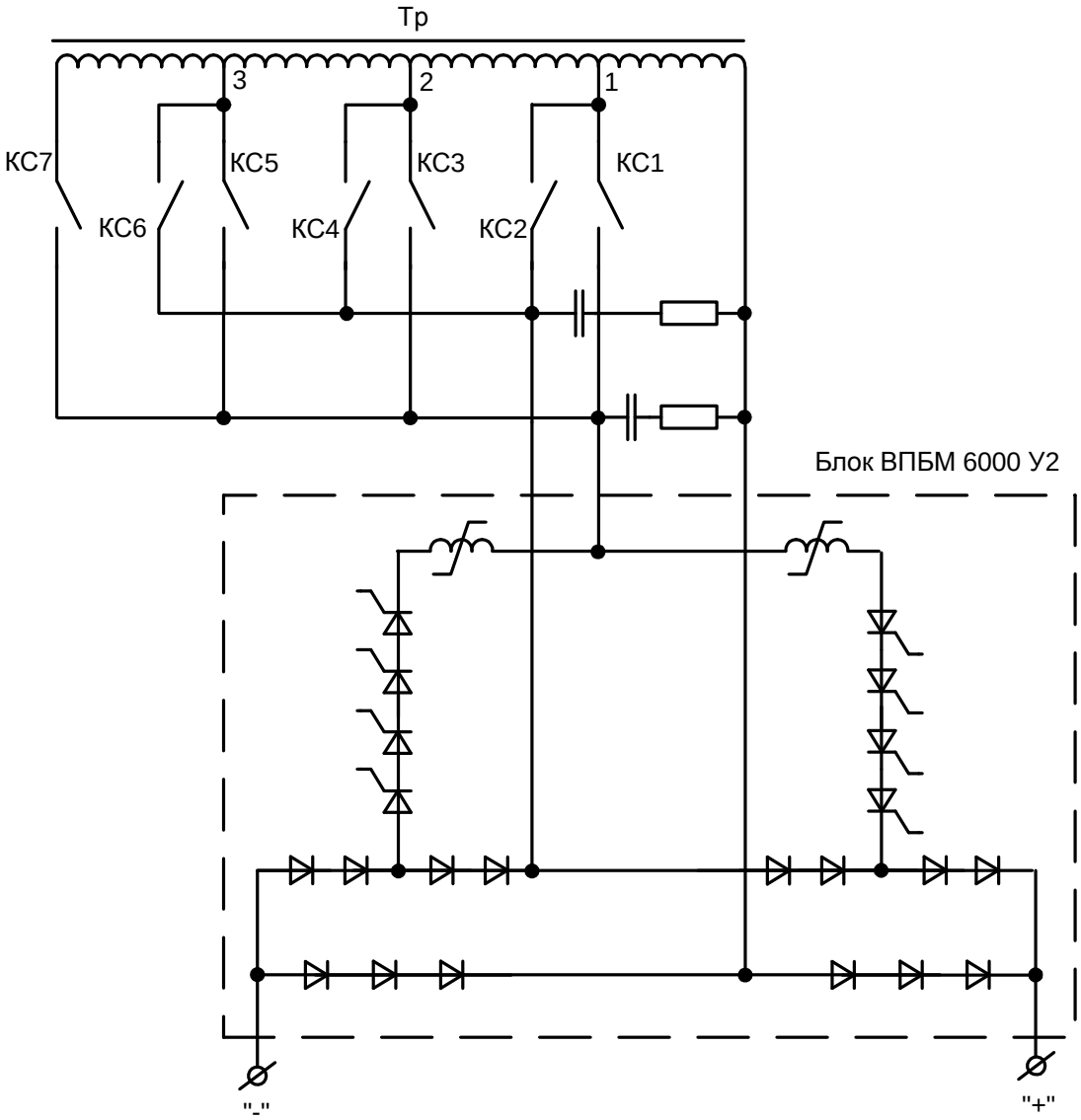


Рис.3. Функциональная схема ВПБМ — 6000 У2.

Каждое плечо ВПБМ содержит одну параллельную ветвь, что обеспечивается применением мощных таблеточных тиристоров Т173 – 5000 – 8 в сборе с охладителями типа О273 и таблеточных диодов Д163 – 2500 – 32 в сборе с охладителями типа О273.

Для осуществления одновременного включения последовательно соединенных тиристоров последовательно с ними в плечах подключаются дроссели задержки L1 и L2, входящие в состав блока.

Особенности конструкции блока.

Охлаждение ВПБМ – воздушное, принудительное. Направление движения воздуха – горизонтальное.

Каждый силовой полупроводниковый прибор в сборе с охладителем расположен в вынимаемом миниблоке (рис. 2), в который, кроме того, входят его защитные R и RC – цепи, а также система сигнализации неисправности прибора.

При выходе из строя одного силового полупроводникового прибора плеча блок сохраняет работоспособность и позволяет произвести замену неисправного прибора во время проведения профилактических мероприятий либо во время любой кратковременной остановки электровоза. Время замены миниблока – до 10 минут. В случае выхода из строя силового прибора загорается сигнальная лампа миниблока. Это позволяет легко найти место, где надо заменить блок. Это обстоятельство является важным в связи с тем, что место расположения блоков на электровозе ограничено.

Реализация преимущества использования схемного решения модернизированного блока типа ВПБМ-6000 У2 потребовало проверки температурного режима работы полупроводниковых приборов. Конструкция прибора и его рабочие характеристики, указанные в технических условиях, однозначно определяют максимально допустимую температуру полупроводниковой структуры. Степень нагрева прибора определяется протекающим током и параметрами вольт-амперной характеристикой вентиля.

$$\Theta = \Theta_{окр} + \varphi\left[i, R, U_{\gamma}(i)\right], \quad (1)$$

где $\Theta_{окр}$ - температура окружающей среды;

i – ток;

R – тепловое сопротивление системы полупроводниковая структура тиристора-окружающая среда;

$U_{\gamma}(i)$ - падение напряжения на тиристоре.

В установившемся режиме среднее значение температуры структуры определяется выражением [1]:

$$\Theta = \Theta_{окр} + RP, \quad (2)$$

где P – мощность потерь в приборе.

Выбор приборов производится с учетом только основных потерь в проводящем состоянии, т.к. остальные потери составляют 2 ÷ 5 % от основных [2].

$$\Theta = \Theta_{окр} + R\frac{1}{T}\int_0^{\tau} U_T\, i\, dt, \quad (3)$$

где T – период напряжения,

τ – время проводимости в течении периода;

U_T - падение напряжения на тиристоре.

При работе выпрямителя по сложному графику нагрузки, как это имеет место в нашем случае, необходимо определить температуру структуры в самой напряженной точке графика. Для определения этой точки использовалась методика изложенная в [3].

Импульсы мощности, выделяемые в приборе, аппроксимировались в виде прямоугольников. Температура структуры в самой напряженной точке графика определялась выражением (Л.3):

$$\Theta_{макс} = \Theta_{окр} + R_1 P_1 + R_2 P_2\ , \quad (4)$$

где P_1 и P_2 - средние мощности потерь в тиристоре соответственно в течение времени перегрузки и периода малой нагрузки;

R_1, R_2 - тепловые сопротивления.

Исходя из полученных результатов были выбраны полупроводниковые приборы.

Список литературы: 1. Тиристоры (технический справочник) – М.: «Энергия», 1971. **2**. *Аптер Э. М.* Выбор нагрузок тиристоров в мощных преобразовательных с использованием статистико-вероятностных методов – «Электричество», 1972, №9. **3**. *Давидов П.Д.* Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов –М.: «Энергия», 1967.

Bibliography (transliterated): 1. *Tiristoryi (tehnicheskiy spravochnik)* – Moskow.: «Energiya», 1971. **2**. *Apter E. M.* Vyibor nagruzok tiristorov v moschnyih preobrazovatelnyih s ispolzovaniem statistiko-veroyatnostnyih metodov – «Elektrichestvo», 1972, №9. **3**. David P. D. *Analysis and calculation of thermal regimes of semiconductor devices*, Moskow.: "Energy", 1967.

Поступила (received) 10..08.2015

УДК 621.314

И. И. ЭПШТЕЙН, доктор техн. наук, проф., директор по науке
ЧАО «Харьковский электрощитовой завод»;
Я. С. БАЛТЕР, главный специалист АО НПП «Укрэлетекс», Харьков

ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

В последние десятилетия возрос интерес к расчету температуры в кристалле сложных полупроводниковых силовых приборов. Чем более точно эта температура рассчитывается, тем большие токи можно снять с указанных приборов при сохранении высокой надежности. Все поставщики силовых полупроводниковых приборов приводят большое число тепловых характеристик приборов для установившихся и переходных режимов работы. Эффективность и точность проектирования полупроводниковых преобразователей возрастает, если в составе компьютерной программы расчета будет универсальная модель тепловых процессов. Такая постановка задачи не новая, но она, на наш взгляд, нуждается в более углубленном математическом обосновании.

1. Схема тепловой модели полупроводникового прибора

1.1 Идеализированная тепловая модель может быть представлена в виде цепочки конструктивных теплопроводящих элементов:

- полупроводниковая структура (как правило, несколько элементов),
- корпус прибора,
- теплопроводящая смазка,
- охладитель.

Принято, что для каждого элемента внутреннее тепловое сопротивление равно нулю, тепловое сопротивление существует при переходе от одного конструктивного элемента к другому. Поэтому тепловая модель каждого конструктивного элемента может быть представлена в виде теплоемкости Q и сопротивления перехода к следующему элементу R.

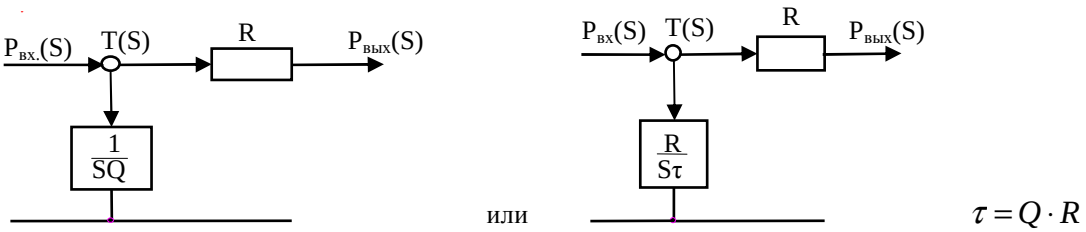


Рис.1

Переменные на рис.1 – операторные выражения действительных переменных; S- оператор Лапласа.

1.2. При последовательном включении ряда (k) элементов, тепловая модель прибора имеет вид (рис.2)

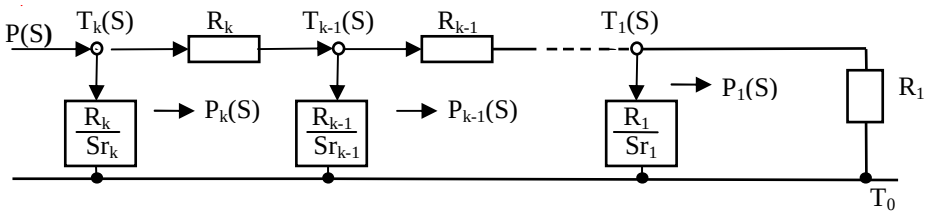


Рис.2

T_0 - температура окружающей среды

$T_{k(S)}$ – температура внутренней полупроводниковой структуры, в которой выделяется мощность потерь.

В информационных материалах изготовителей приборов приводятся данные $r^{инф.}$, $\tau^{инф.}$ элементов, а в обосновании достаточности указанных данных дается ссылка на схему тепловой модели (рис.3)

© И.И. Эпштейн, Я.С. Балтер, 2015

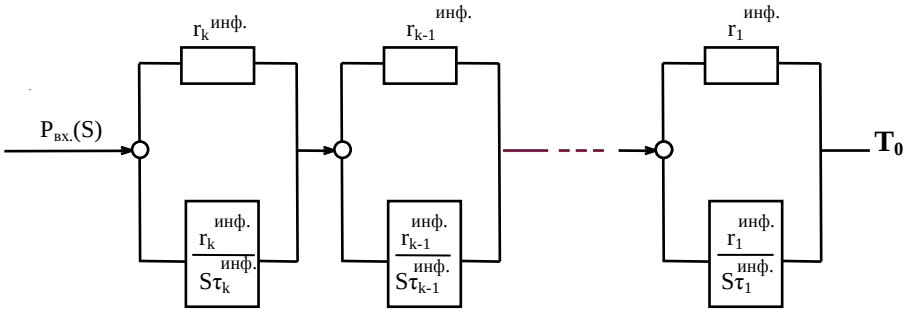


Рис.3

Сопоставление двух схем замещения (рис.2 и рис.3) показывает следующее:

- параметры на рис.2 (R и τ) – это реальные физические параметры элементов, а параметры на рис.3 – это информационные величины, значения которых приводятся без математического обоснования. Следствием чего схема на рис.3 воспринимается как искусственная, не имеющая физического объяснения.

- если входная мощность $P_{вх}$ меняется скачком, то согласно схеме (рис.3) она в первый момент при температуре $T_k = T_0$ передается в окружающую среду, что противоречит физике процессов. Это не способствует ее логическому восприятию, более того вызывает сомнение в правильности последующих выводов. Схема на рис.3 может рассматриваться как схемная абстракция с неочевидными параметрами, позволяющая рассчитать температуру T_k в функции входной мощности $P_{вх}$.

При этом возникает ряд практических вопросов:

- параметры схемы $r^{инф.}$ и $\tau^{инф.}$ приводятся для конкретной конструкции полупроводникового устройства, но на практике в полном объеме предлагаемая конструкция не используется. В частности, разработчики преобразователей самостоятельно выбирают охладитель (индивидуальный, групповой, естественное охлаждение, принудительное при разной скорости воздуха, жидкостное). Даже если тепловые параметры принятого охладителя известны, не очевидно, как при этом меняются параметры элементов схемы замещения (рис.3).

На основании рис.3 приводится следующая формула для расчета $T_k(S)$

$$T_K(S) = P_{вх.}(S)\sum_{n=1}^{K}\frac{r_n^{инф.}}{1+S\tau_n^{инф.}} \qquad (1)$$

2**. Вывод формулы для расчета температуры $T_k(S)$**

Из схемы (рис.2) очевидна следующая упрощенная схема, показанная на рис.4.

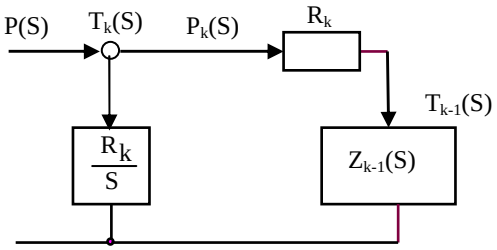


Рис.4

Здесь $Z_{K-1}(S)$ - суммарное операторное сопротивление всех К-1 элементов, следующих за рассматриваемым звеном,

R_K и τ_K - индивидуальные параметры К-го звена,

$Z_K(S)$ - суммарное операторное сопротивление всех элементов

$$Z_K(S) = \frac{\frac{R_K}{S\cdot\tau_K}\cdot[Z_{K-1}(S)+R_K]}{\frac{R_K}{S\cdot\tau_K}+Z_{K-1}(S)+R_K} \qquad (2)$$

Операторное изображение температуры на входе звена $Z_K(S)$ равно:

$$T_K(S) = P(S) \cdot Z_K(S) \tag{3}$$

Расчет операторного сопротивления $Z_K(S)$ выполняется последовательным подключением каждого последующего звена к предыдущему суммарному согласно (2), начиная от внешнего звена (k=1) и заканчивая тем, в котором выделяется мощность потерь.

Для первого звена $$Z_1(S) = \frac{A_1(S)}{B_1(S)} = \frac{R_1}{1 + S\tau} = \frac{a_{11}}{b_{12} + b_{22} \cdot S} \tag{4}$$

Операторное сопротивление первого и второго звеньев $Z_2(S)$ согласно (2) равно:

$$Z_2(S) = \frac{A_2(S)}{B_2(S)} = \frac{A_1(S) + R_2 B_1(S)}{B_1(S) + \frac{A_1(S)}{R_2} \cdot S\tau_2 + B_1(S) \cdot S\tau_2} = \frac{a_{21} + a_{22}S}{b_{21} + b_{22}S + b_{23}S^2} \tag{5}$$

Последовательным суммированием сопротивлений «по восходящей» получаем

$$Z_K(S) = \frac{A_K(S)}{B_K(S)} = \frac{A_{(K-1)}(S) + R_K B_{(K-1)}(S)}{B_{(K-1)}(S) + \frac{A_{(K-1)}(S)}{R_K} \cdot S\tau_K + B_{(K-1)}(S) \cdot S\tau_K} \tag{6}$$

$$Z_K(S) = \frac{A_K(S)}{B_K(S)} = \frac{a_{K,1} \cdot S^0 + a_{K,2} \cdot S^1 + a_{K,3} \cdot S^2 + \ldots + a_{K,K} \cdot S^{K-1}}{b_{K,1} \cdot S^0 + b_{K,2} \cdot S^1 + b_{K,3} \cdot S^2 + \ldots + b_{K,K+1} \cdot S^K} \tag{7}$$

Двойная индексация коэффициентов a и b означает следующее:

- первый индекс – число элементов, учитываемых в суммарном сопротивлении $Z_K(S)$,
- второй индекс – порядковый номер члена полинома S, к которому относится данный коэффициент.

Полином числителя $A_K(S)$ содержит К членов, порядок полинома К-1.

Полином знаменателя содержит К+1 членов, порядок полинома К.

С увеличением второго индекса увеличивается степень оператора S.

Известным математическим приемом представляем $Z_K(S)$ в виде суммы К-операторных звеньев $1^{ого}$ порядка:

$$Z_K(S) = \sum_{n=1}^{n=K} C_n \frac{1}{S - S_n} \tag{8}$$

где S_n - корень уравнения $B_K(S) = 0$, всего К – корней

$$C_n = \frac{[A_K(S)](S = S_n)}{\left[\frac{d}{dS} B_K(S)\right](S = S_n)} \tag{9}$$

$$\frac{d}{ds} B_k(S) = b_{k,2} + 2b_{k,3}S + 3b_{k,4}S^2 + \ldots + kb_{n,k+1}S^{k-1} \tag{10}$$

Корни S_n уравнения $B_K(S) = 0$ проще всего определяются путем подстановки в уравнение отрицательных значений S от 0 до получения k корней, что при компьютерных расчетах не вызывает сложностей.

Согласно (3) записываем

$$T_K(S) = P_k(S)\left(\sum_{n=1}^{K} C_n \frac{1}{S - S_n}\right) \tag{11}$$

Поскольку значения корней S_n отрицательные, приведем соотношение (11) к более привычной для апериодического звена формуле

$$T_K(S) = P_k(S)\left(\sum_{n=1}^{K} R_n{}^P \frac{1}{1 + S\tau_n^P}\right) = P_k(S) Z_k(S) \tag{12}$$

где $R_n^p = \frac{C_n}{|S_n|}, \tau_n^p = \frac{1}{|S_n|}$,

Индекс Р означает рассчитанные.

Пример

Заданы параметры схемы замещения трехзвенной (k=3) структуры. Заданные и рассчитанные согласно (12) параметры приведены в таблице 1

Таблица 1

Номер структуры	Заданные параметры	Рассчитанные параметры
k	R_k=1; τ_k=1	$R_k^p = 0{,}173; \tau_k^p = 0{,}451$
k-1	R_{k-1}=3; τ_{k-1}=3	$R_{k-1}^p = 0{,}419; \tau_{k-1}^p = 1{,}92$
k-2	R_{k-2}=10; τ_{k-2}=10	$R_{k-2}^p = 13{,}4; \tau_{k-2}^p = 34{,}6$
:	- - - - - - - - - - - -	- - - - - - - - - - - -
1	- - - - - - - - - - - -	- - - - - - - - - - - -

Таблица заполняется до тех пор, пока значение номера структуры не станет равным 1.

3.Расчет температуры других (от k-1 до 1) элементов.

Расчет температуры промежуточных элементов имеет практическую значимость, поскольку непосредственное измерение температуры полупроводниковой структуры прибора невозможно. Поэтому измеряют температуру доступных элементов и по ней судят о температуре кристалла.

Согласно схеме (рис.2) записываем:

$$\left.\begin{aligned} T_{k-1}(S) &= T_k(S) - P_k(S)R_k \\ P_k(S) &= P(S) - T_k(S)\frac{S\tau_k}{R_k} \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

или $T_{k-1}(S) = T_k(S)(1+S\tau_k) - P_k P(S)$

а с учетом (3) $T_{k-1}(S) = P(S)\left[Z_k(S)(1+S\tau_k) - R_k\right] = P(S)\cdot Z_{k-1}(S)$ (14)

Аналогичные (14) соотношения могут быть записаны для для любого звена цепочечной схемы (рис.2) от k-1 и далее по «нисходящей».

Пример

Для используемого в качестве примера трехзвенного прибора передаточные функции имеют вид

$$\left.\begin{aligned} Z_K(S) &= \sum_{n=k}^{1} R_n{}^P \frac{1}{1+ST_n^P} \qquad \text{см. (12)} \\ Z_{K-1}(S) &= Z_k(S)\left[1+S\tau_k\right] - R_k \\ Z_{K-2}(S) &= Z_k(S)\left[(1+S\tau_k)(1+S\tau_{k-1}) + S\frac{\tau_k}{R_k}R_{k-1}\right] - (R_k + R_{k-1} + S\tau_{k-1}R_k) \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Из приведенного следует, что для расчета передаточной функции всех элементов необходимы физические параметры схемы замещения (рис.2).

Располагая передаточными функциями и операторным выражением мощности потерь, можно рассчитать текущую температуру каждого элемента полупроводникового прибора. Операторное выражение переходной тепловой характеристики прибора $\frac{Z_n(S)}{S}$ (16)

Пример

Полученные обратным преобразованием Лапласа переходные характеристики температуры элементов трехзвенного прибора описываются выражениями (17) и показаны на рис.5.

$$\left.\begin{aligned}
T_k^{пер.}(t) &= \sum_{n=k}^{1} R_n^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n^p}}\right) \\
T_{k-1}^{пер.}(t) &= \left\{ \sum_{n=k}^{1} R_n^p \left[1 - \left(1 - \frac{\tau_k}{\tau_n^p}\right) e^{-\frac{t}{\tau_n^p}} \right] \right\} - R_k \\
T_{k-2}^{пер.}(t) &= \left\{ \sum_{n=k}^{1} R_n^p \left[1 - \left(1 - \frac{\tau_k + \tau_{k+1} + \tau_k \frac{R_{n-1}}{R_k}}{\tau_n^p} + \frac{\tau_k \tau_{k-1}}{(\tau_n^p)^2}\right) e^{-\frac{t}{\tau_n^p}} \right] \right\} - R_k - R_{k-1}
\end{aligned}\right\} \quad (17)$$

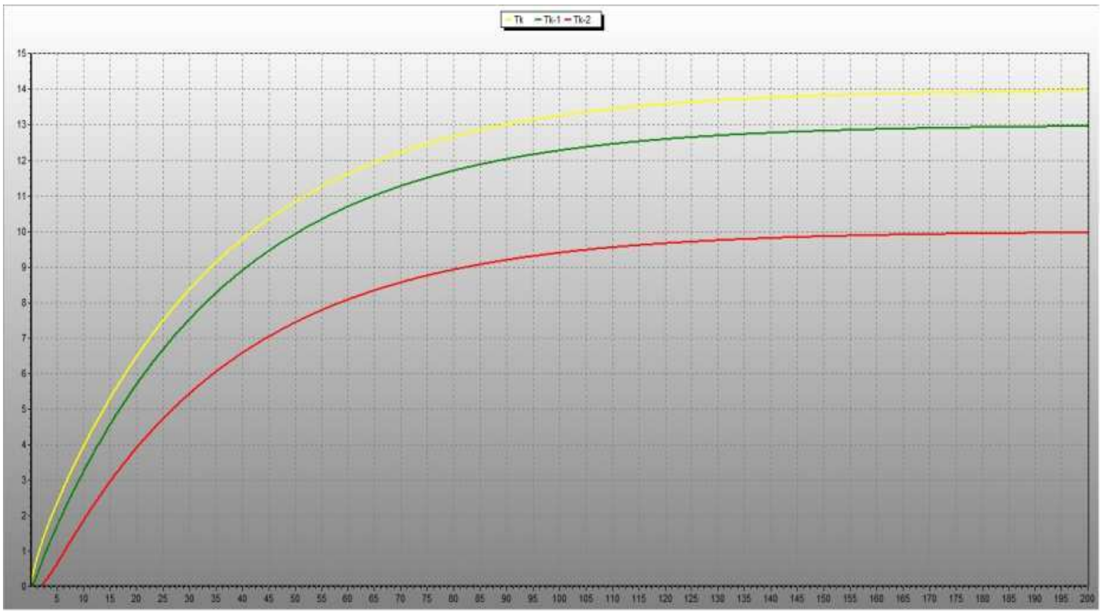


Рис.5

Следует отметить, что громоздкость выражения передаточной функции каждого последующего элемента по сравнению с предыдущим существенно возрастает, поэтому рекомендуют расчет ограничивать практически необходимым числом элементов.

Заключение

1. В статье приведена математически обоснованная методика расчета температурного режима любого элемента силового полупроводникового прибора, позволяющая разработчикам силовых преобразователей и поставщикам приборов выполнить на компьютере расчеты тепловых режимов для любой тепловой нагрузки.
2. В информационных материалах должна быть исключена тепловая схема замещения , аналогичная рис.3, а приводиться схема на рис.2.
3. Рекомендуем поставщикам приборов кроме информационных параметров частной тепловой модели приводить реальные теплофизические параметры всех элементов.
4. Настоящее исследование было проведено в том числе для того, чтобы дать специалистам по силовой полупроводниковой технике возможность сознательного восприятия информационных материалов поставщиков приборов.

Список литературы: 1. SemiSel is SEMIKRON online calculation and simulation tool for losses, temperatures and optimal choice of power electronic components. http://www.semicron.com/service-support/semisel- simulation.html 2. "SEMIKRON innovation + service Power Electronics" Printed in Germany 10/1996 for 1997/98 http://www.semikron.com/products/product-classes/ipm.html http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skiip-603-gd123-3dul-v3-20451028 http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skiip-1814-gb12e4-3dul-20601123

Поступила (received) 25.08.2015

УДК 621.314

Г. Г. ЖЕМЕРОВ, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;
Д. С. КРЫЛОВ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»;
Д. В. ТУГАЙ, канд. техн. наук, доцент ХНАГХ.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ И КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Введение. Одним из способов уменьшения потерь энергии в системах электроснабжения (СЭ) является подключение параллельно нелинейной нагрузке силового активного фильтра (САФ), обеспечивающего близкую к синусоиде форму суммарного тока линии, соединяющей источник и нагрузку, и заданный угол сдвига между фазным напряжением сети и основной гармоникой фазного сетевого тока. Силовые схемы параллельных САФ идентичны силовым схемам автономных инверторов напряжения (АИН), однако параметры схемы и режимы работы существенно различны [1]. Системы управления САФ выполняются, как правило, на основе теории мгновенной активной и реактивной мощностей с релейным или векторным регулятором [2]. В настоящей статье приведен пример отладки *Matlab*-модели СЭ с САФ путем изменения параметров. Показана возможность получения почти синусоидального тока линии, с коэффициентом несинусоидальности (THD) менее 5% при выполнении других требований, сформулированных в техническом задании.

Постановка задачи. Современный уровень развития средств объектного моделирования позволяет перед началом производства и лабораторных испытаний нового изделия верифицировать его работу по предложенной функциональной или принципиальной схеме и рассчитанным параметрам элементов. При этом, как показала практика, полученные в модели результаты с высокой степенью точности совпадают с результатами, полученными на физическом образце. Степень приближения виртуальных и реальных результатов работы объекта напрямую зависит от точности выданного технического задания и от желаемой степени детализации модели. Естественно, чем более детальную модель желает получить разработчик, тем сложнее она получается, тем больших вычислительных затрат требует её реализация. Современный пакет моделирования *Matlab/Simulink/SimPowerSys* позволяет получить максимально приближенные к реальности результаты моделирования схем силовой электроники при приемлемом уровне вычислительных затрат. Потому именно он был выбран разработчиком, пожелавшим перед началом реализации рассчитанного объекта проверить корректность его работы и соответствие выходных параметров его работы имеющимся техническим условиям.

Материалы исследования. В качестве объекта моделирования разработчиком предложен параллельный САФ, задачей которого является подавление искажений на входе СЭ, содержащей АИН с ШИМ и ещё две аналогичные некомпенсировнные нагрузки, подключенные к шинам той же питающей подстанции,

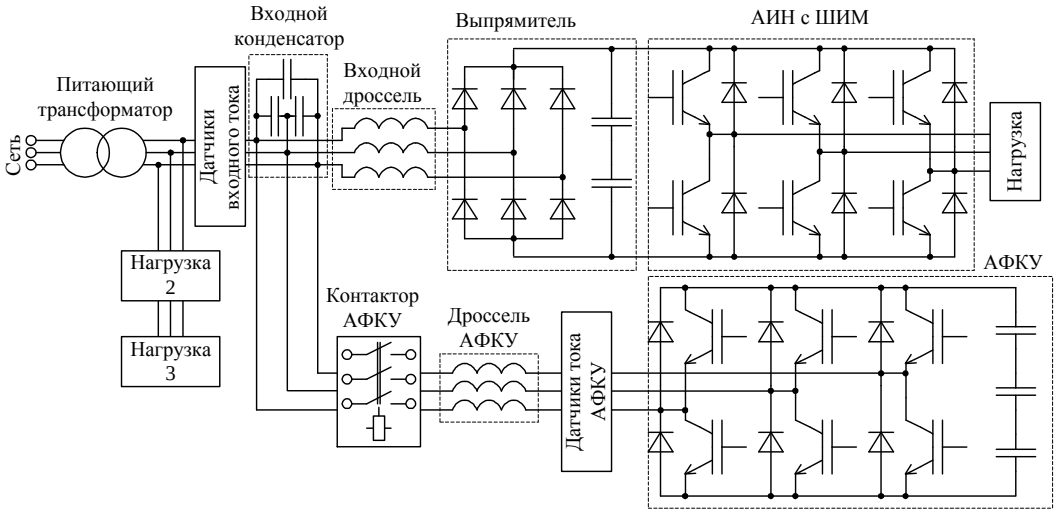


Рис.1 Структурная схема объекта моделирования

Структурная схема исследуемого объекта приведена на рис.1.

Согласно техническому заданию данная схема содержит:

– Трехфазную питающую сеть с линейным напряжением 6кВ, частотой 50+/-2 Гц. Искажение напряжения сети при выключенной нагрузке не превышает 5%;

© Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов, Д.В. Тугай, 2015

– Питающий трансформатор подстанции 6кВ/0.4кВ имеет мощность 1мВт и напряжение короткого замыкания $e_K = 5.9\,\%$ с соединением первичных и вторичных обмоток в звезду без вывода нулевого провода. Предполагается возможность отклонения выходного напряжения питающего трансформатора в зависимости от внешних факторов в пределах 380В +25/-25%;

– Входные конденсаторы САФ имеющие расчетную ёмкость 23 мкФ каждый, соединены в треугольник; входная индуктивность фазы САФ – 150 мкГн; суммарная ёмкость звена постоянного тока САФ – 18 мФ; максимальный действующий выходной ток САФ – 190А;

– САФ работает с фиксированной частотой модуляции, которая определяется допустимым тепловыделением на силовых ключах. При использовании силовых модулей 12-го класса частота ШИМ не должна превышать 7 кГц, при использовании модулей 17 класса – 4 кГц;

– Расчетная ёмкость звена постоянного тока АИН равна 28 мФ; входная индуктивность фазы АИН – 75 мкГн; номинальный ток звена постоянного тока АИН – 615 А, что соответствует номинальной мощности нагрузки в 300 кВт.

Поставленной задачей является создание в программной среде *Matlab/Simulink/SimPowerSys* математической модели преобразовательной системы, представленной на рис.1 с приведенными выше параметрами. При этом разработать алгоритм управления САФ, обеспечивающий следующие характеристики:

– *THD* (коэффициент несинусоидальности) входного тока системы не должен превышать 5%;

– Исследовать возможность снижения: класса силовых модулей САФ; частоты ШИМ САФ;

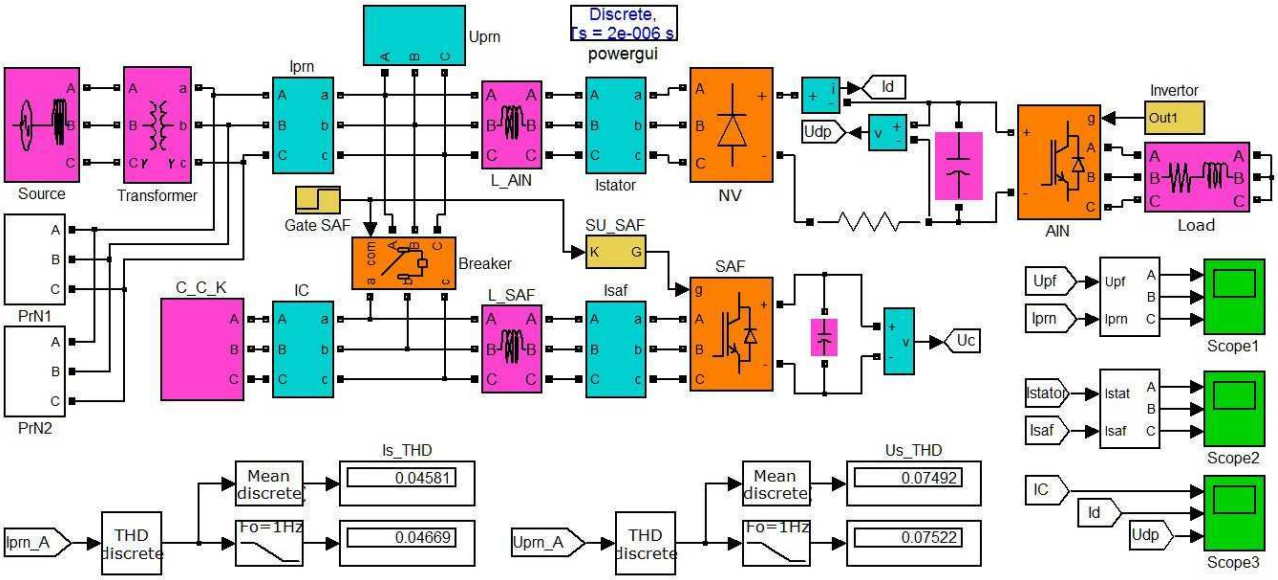


Рис.2 Matlab-модель СЭ с САФ

индуктивности входных дросселей и ёмкости конденсатора звена постоянного тока САФ при строгом соблюдении предыдущего условия (*THD*<5%).

На рис.2 представлена математическая модель системы электроснабжения с параллельным САФ.

Данная модель полностью удовлетворяет параметрам качества потребляемой электроэнергии, заданной в техническом задании. Однако для этого в топологию схемы СЭ рис.1 пришлось внести некоторые незначительные коррективы.

Так, входной конденсатор САФ пришлось убрать из цепи питающей сети и подключать его с помощью контактора АФКУ вместе с силовым активным фильтром. Это было сделано во избежание возникновения резонансных явлений с индуктивностью питающего трансформатора и прочих нагрузок при отключенном САФ.

Параметры некоторых элементов схемы также были скорректированы для достижения результатов, удовлетворяющих техническому заданию. Рассмотрим основные элементы модели:

– Питающая сеть моделируется трехфазным симметричным источником переменного напряжения Source 6 кВ и индуктивностью фазы 20 мкГн, что, в сочетании с параметрами питающего трансформатора Transformer, соответствует реальным условиям источника питания, указанным в техническом задании.

– Ёмкости входных конденсаторов САФ *C_C_K* пришлось увеличить в два раза относительно расчетной и она составила 46 мкФ каждая при соединении в треугольник. Входная индуктивность фазы САФ *L_SAF* наоборот была уменьшена в два раза относительно расчетной и составила 75 мкГн. Суммарная ёмкость звена постоянного тока САФ осталась на уровне расчетной – 18 мФ. Максимальный действующий выходной ток САФ не превышает заданный в техническом задании при любых режимах работы схемы.

– САФ работает с фиксированной частотой модуляции 6 кГц при поддержании постоянного напряжения на конденсаторе на уровне 770 В, что на практике даёт возможность использовать силовые модули 12-го класса с существенным запасом по напряжению.

– Ёмкость звена постоянного тока АИН осталась на уровне расчетной – 28 мФ, а входная индуктивность фазы АИН *L_AIN* увеличена вдвое – 150 мкГн. Активное сопротивление и индуктивность фазы эквивалентной нагрузки *Load* равны 0.25 Ом и 1 мкГн, что обеспечивает номинальный ток звена постоянного тока АИН в 615 А и соответствует номинальной мощности нагрузки в 300 кВт по техническому заданию.

– Прочие нагрузки *PrN1* и *PrN2*, подключенные к выходу питающего трансформатора параллельно с основной, схемно по своим параметрам полностью повторяют основную нагрузку в виде АИН с ШИМ.

– САФ подключается параллельно питающей сети с помощью трехфазной контактной группы *Breaker* в момент времени, задаваемый блоком *Gate SAF*.

– Силовая схема *Matlab*-модели включает в себя блоки датчиков, часть из которых, – входного тока Iprn, входного фазного напряжения *Uprn*, тока САФ *Isaf* и напряжения звена постоянного тока САФ *Uc*, – используются для работы системы управления силовым активным фильтром *SU_SAF*. Остальные датчики служат для вывода наглядной информации о работе схемы на осциллографы *Scope*1–3.

Система управления САФ *SU_SAF* выполнена с использованием *p-q-r* теории мощности. Её топология и используемые при работе математические преобразования подробно описаны в [3]. Данная система управления имеет ряд существенных преимуществ, позволяющих успешно применять её при моделировании и создании различных типов силовых активных фильтров. Так как все сигналы, циркулирующие в системе управления, представлены в относительных единицах, подбором соответствующих масштабных коэффициентов можно легко добиться её корректной работы в широком спектре параметров СЭ с САФ. В качестве базовых величин при расчете принимаются номинальный действующий ток и напряжение фазы питающей сети в точке подключения САФ.

Ещё одним важным преимуществом данного типа системы управления является использование всего одного, чаще всего пропорционально-интегрального, регулятора – регулятора напряжения на конденсаторе САФ, настройка параметров которого, в отличии от других возможных систем управления, обычно особых проблем не вызывает.

Существенным же отличием СУ САФ, применённой в модели рис.2, от СУ САФ, описанной в [3], является использование алгоритма формирования управляющих импульсов на силовые ключи с фиксированной, заранее заданной частотой модуляции. Это, в отличии от релейного алгоритма без фиксированной частоты модуляции [3], позволяет точно оценить возможности применения того или иного типа силовых модулей исходя из их частотных характеристик и допустимого тепловыделения. Однако это же ухудшает эффективность работы САФ, особенно при наличии крутых фронтов в компенсируемом токе сети при малой индуктивности фазы. Поэтому входная индуктивность фазы АИН в модели была увеличена вдвое относительно расчетной.

Ниже приведены машинограммы, характеризующие качество работы силового активного фильтра в моделируемой системе электропитания. На рис.3 показаны машинограммы входных токов САФ и АИН, снятые с датчиков фазных токов *Istator* и *Isaf*. Из рис.3 видно, что входной ток АИН имеет форму, характерную для шестипульсного мостового неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку.

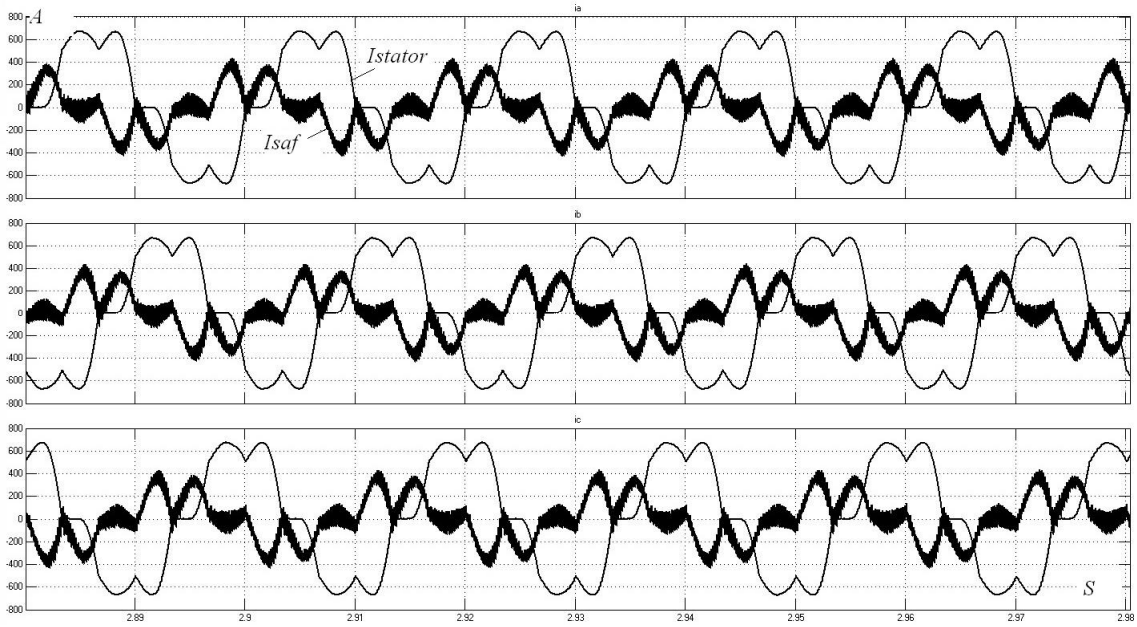


Рис.3 Машинограммы входных токов САФ и АИН

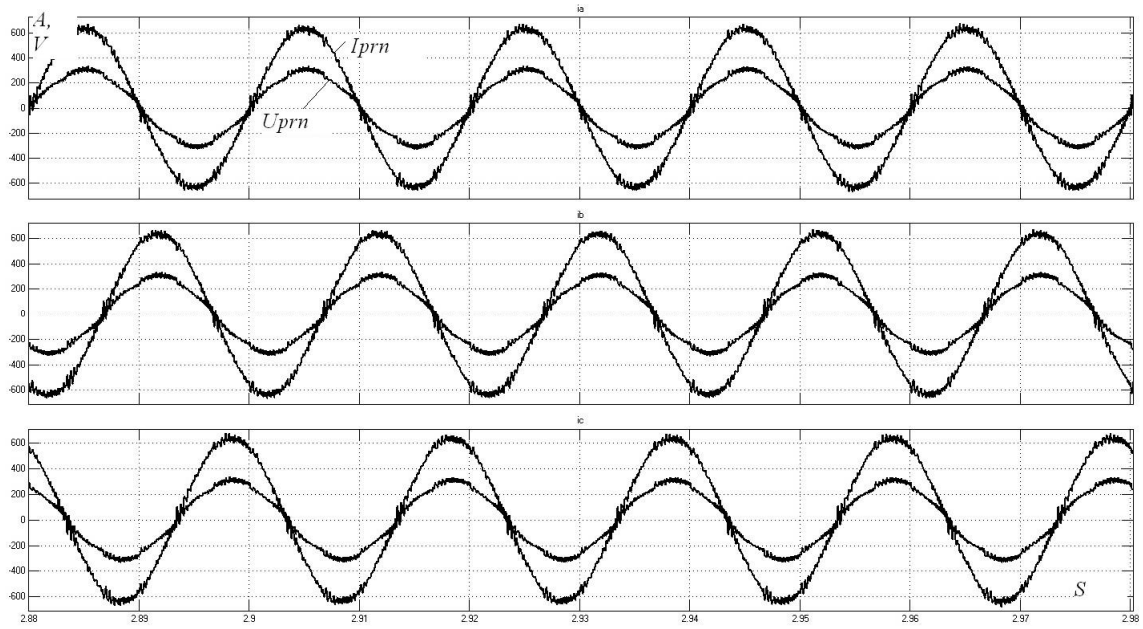


Рис.4 Машинограммы входных фазных токов и напряжений СЭ с САФ

На рис.4 приведены машинограммы скомпенсированного фазного тока и напряжения на входе СЭ с САФ, снятые с датчиков *Iprn* и *Uprn*. Из рис.4 видно, что фазные ток и напряжение в точке подключения САФ имеют практически синусоидальную форму, и находятся в фазе друг с другом. Также видно, что наибольшие помехи фазный ток имеет в интервалах резкого изменения входного тока АИН, что, как уже было отмечено ранее, является естественной платой за использование алгоритма работы САФ с фиксированной частотой модуляции при стремлении к максимальному её уменьшению ради удешевления используемых силовых модулей и их системы охлаждения.

Тем не менее, согласно результатов моделирования, такая форма сетевого тока (рис.4) имеет коэффициент несинусоидальности *THD*, стабильно лежащий в пределах 4.5–4.7 %, что полностью соответствует условиям технического задания. Более того, при повышении частоты модуляции до допустимых по заданию 7кГц есть возможность снизить *THD* сетевого тока до 4–4.2%.

THD фазного напряжения находится на уровне 7.5% и существенному снижению его в предложенной по Т.З. топологии мешает синхронная работа от общего источника ещё двух, аналогичных компенсируемому, некомпенсированных автономных инверторов напряжения такой же мощности.

Выводы. Моделирование системы электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром по структуре, приведенной на рис.1 показало принципиальную возможность достижения в реальном устройстве той же мощности, подключенных к шинам питающей подстанции параллельно с основной нагрузкой, делают практически невозможной полную компенсацию искажений в кривой питающего напряжения средствами одиночного САФ. Индуктивности прочих нагрузок и питающей сети также оказывают существенное влияние на качество работы параллельного САФ, входную ёмкость и индуктивность которого приходится подстраивать под конкретные параметры сети и прочих нагрузок. В целом же предложенная система имеет существенный запас для улучшения технико-экономических показателей. Дальнейшая детализация рассмотренной модели (рис.2) может осуществляться учётом алгоритма формирования управляющих импульсов на силовые ключи САФ конкретным микроконтроллером СУ, используемым разработчиком, а также моделированием асинхронной нагрузки с введением в модель параметров используемой асинхронной машины и алгоритмов её управления, что позволит в большей степени приблизить работу модели к физическому образцу.

Список литературы: 1. *Жемеров Г.Г.* Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности / *Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, Д.В. Тугай //* Технічна електродинаміка, тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Част.4. С. 22–27. **2.** *Домнин И.Ф.* Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазных системах электроснабжения / *И.Ф. Домнин, Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, Д.В .Тугай //* Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. С 52-59. **3.** *Жемеров Г.Г.* Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения / *Г.Г.Жемеров, Н.А.Ильина, О.В. Ильина, Д.В. Тугай //* Технічна електродинаміка, тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2008. – Част.2. С. 80–87.

Bibliography (transliterated): 1. Zhemerov G.G., O.V. Ilina and D.V. Tugay «Energosberegaushij effect kompensacii pulsacij mgnovennoj aktivnoj moshnosti.» *TED, tem.vyp.:SEE.* – Ch.4. 2006. 22–27 Print. **2.** Domnin I.F., G.G.Zhemerov, O.V. Ilina and D.V. Tugay «Energoeffektivnost korrekcii fazy toka i kompensacii pulsacij aktivnoj i reaktivnoj moshnostej v trehfaznih sistemah elektrosnabzhenija.» *TED.*– 2007. №1. 52–59 Print. **3.** Zhemerov G.G., N.A. Ilina, O.V. Ilina and D.V. Tugay «Umenshenie poter i ulichshenie kachestva elektroenergii v sistemah kommunalnogo elektrosnabzenija.» *TED, tem.vyp.:SEE.* – Ch.2. 2006. 80–87 Print.

Поступила (received) 24.08.2015

УДК 621.314

В. Н. ГУБАРЕВИЧ, канд.техн.наук, с.н.с. ИЭД НАН Украины;
Ю. В. МАРУНЯ, инж. I кат. ИЭД НАН Украины

ОДНОФАЗНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ LMC-ФИЛЬТР НА ВХОДЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Введение. Известно, что нагрузки, имеющие на входе выпрямитель с параллельно подключенной батареей электролитических конденсаторов, потребляют из сети питания ток импульсной формы. При этом в сеть генерируются высшие гармоники тока, а коэффициент гармоник тока (THDi) может достигать 100% и более. Самым простым способом снижения THDi является установка на входе выпрямителя линейного дросселя, индуктивность которого выбирается так, чтобы падение напряжения на нем было порядка 3% от номинального при максимальной мощности нагрузки. Более эффективно улучшить качество потребляемой из сети электроэнергии можно за счет установки специальных силовых широкополосных LMC-фильтров [1]. На рис. 1 приведена схема LMC-фильтра, где L1, L2 – индуктивности обмоток дросселя, Ld – дополнительная обмотка дросселя, которые выполнены на одном сердечнике, C1 – емкость LMC-фильтра, VD1-VD4 – диоды выпрямителя, Сф – емкость выходного фильтра, Rн – сопротивление нагрузки. LMC-фильтр не только существенно улучшает спектральный состав потребляемого из сети тока, а следовательно и THDi, но и улучшает коэффициент мощности, уменьшает пульсации напряжения нагрузки, улучшает жесткость нагрузочной характеристики, позволяет увеличивать напряжение на нагрузке без применения согласующих трансформаторов [2,3]. Ряд других свойств выявлены при дополни-тельных исследованиях, описанных ниже.

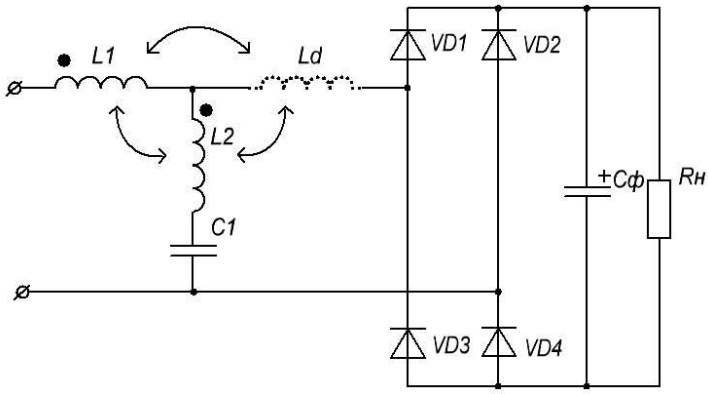


Рис. 1 – Однофазный широкополосный LMC-фильтр

Материалы и результаты исследований.

В таблице 1 приведены параметры, характеризирующие три варианта использования однофазных выпрямителей при напряжении питающей сети 220В для активной нагрузки мощностью 10 кВт и напряжением нагрузки 300В±10%, определенные с помощью математических и физических моделей. Математические модели были реализованы с помощью средств пакетов программ **Micro-Cap v 10.04** и **Omega`15**, что позволяет говорить о достаточной достоверности расчетных результатов.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные параметры вариантов использования однофазных выпрямителей

Вариант		Uн, В	Iн, А	THDi, %	I_3, %	I_5, %	I_7, %	I_9, %	ΔUн, %	PF	cos φ
1	экспер.	280	36,7	91,6	71,5	41,2	25,4	12,1	10,7	0,744	0,99
	модель	275	36,24	108,3	84,7	58,7	31,0	9,3	10,2	0,751	0,99
2	экспер.	250	32,0	50,9	49,7	9,0	5,8	1,7	8,0	0,786	0,88
	модель	248,7	32,77	52,4	50,7	9,8	7,2	3,1	7,2	0,791	0,90
3	экспер.	300	39	14,9	14,6	0,9	-	-	6,0	0,956	0,97
	модель	295,7	38,4	12,2	11,24	2,6	2,5	3,0	5,0	0,941	0,97

Под вариантом №1 подразумевается непосредственное включение выпрямителя с емкостной нагрузкой в сеть, вариант №2 представляет собой такое же включение, но с установкой на входе выпрямителя линейного «3%-го» дросселя, имеющего индуктивность 2,24 мГн, а вариант №3 – включение с применением LMC-фильтра с двумя обмотками (L1=5,3 мГн; L2=1,23 мГн) вместо «3%-го» дросселя на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой. Остальные параметры схемы, изображенной на рис.1, являются такими: емкость выходного фильтра Сф=10000мкФ, емкость LMC-фильтра C1 =170 мкФ.

Также в таблице приведены: Uн – напряжение нагрузки; Iн – ток нагрузки; THDi – коэффициент гармоник тока (Total Harmonic Distortion); I_3- I_9 – гармоники входного тока в процентном соотношении относительно первой гармоники входного тока; ΔUн – размах пульсаций напряжения «peak-to-peak» на нагрузке; PF – коэффициент мощности (Power Factor) как отношение активной мощности к полной, потребляемой схемой из сети; cos φ – сдвиг фаз между напряжением сети и первой гармоникой тока.

© В.Н. Губаревич, Ю.В. Маруня, 2015

Приведенные в таблице результаты наглядно демонстрируют существенные улучшения показателей качества потребляемой электроэнергии при применении LMC-фильтров по сравнению с дросселем на входе выпрямителя. Некоторое несоответствие данных, полученных экспериментальным путем и с помощью математических моделей, можно объяснить колебаниями действующего значения входного напряжения (до 4,6%) и наличием коэффициента гармоник по питающему напряжению свыше 4% во время постановки экспериментов.

Подобные результаты имеют место и при сравнении с вариантом установки фильтрующего дросселя в цепи постоянного тока выпрямителя.

Следует также отметить, что существует возможность путем выбора параметров элементов LMC-фильтра изменять характер зависимости THDi в функции от мощности нагрузки (рис. 2). Можно получать приемлемые значения THDi в широком диапазоне изменения нагрузки (кривая 1), либо только для максимального её значения (кривая 2), причем это значение будет существенно меньше THDi , получаемого при минимизации его для широкого диапазона.

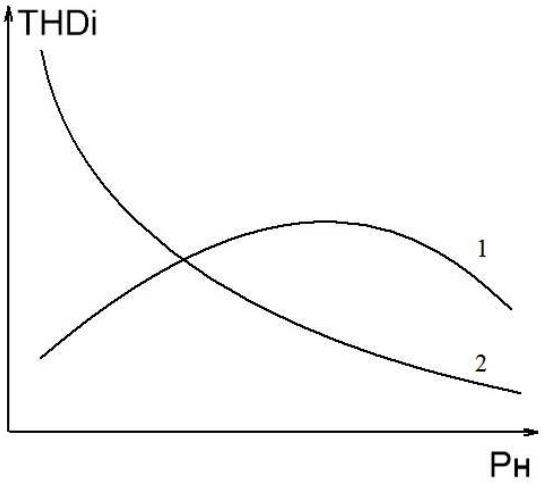


Рис.2 Характер зависимости THDi в функции от мощности нагрузки

Рассматриваемые LMC-фильтры с успехом могут применяться в качестве пассивной составляющей гибридных фильтров, содержащих активные корректоры формы тока (АКФТ), которые в последнее время находят все более широкое применение.

Суть работы АКФТ заключается в том, что на его выходе формируется ток, который является разницей между синусной составляющей первой гармоники тока нагрузки и его мгновенным значением (рис. 3). Суммирование тока корректора (Iк) с током нагрузки (Iн) обеспечивает потребление из сети питания ток (Iпс) синусоидальной формы, по фазе совпадающей с напряжением сети (Uc).

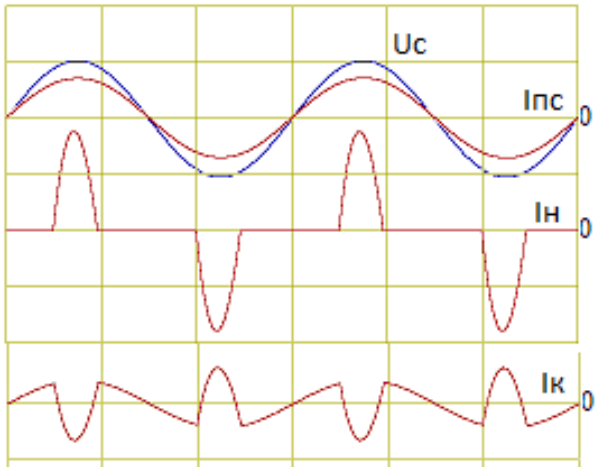


Рис.3 Эпюры к принципу работы АКФТ.

Применение для улучшения электромагнитной совместимости выпрямителя и сети только АКФТ требует рассчитывать его элементы на большую установленную мощность, поскольку необходимо корректировать ток на величину отклонения амплитуды импульсного тока выпрямителя от амплитуды первой гармоники тока (ΔI).

В гибридных же фильтрах пассивный фильтр частично сглаживает импульсный ток выпрямителя, а уже с помощью АКФТ получаем желаемый THDi.

Но при применении LMC-фильтра на входе выпрямителя, на кривой потребляемого тока возникают коммутационные всплески (рис. 4) в моменты, когда выпрямитель начинает потреблять ток из сети, и параметры этого всплеска существенно влияют на параметры корректора тока.

Рис.4 Напряжение сети (Uc) и входной ток (Iпс) LMC-фильтра

Так, от амплитуды всплеска, который характеризует значение максимального отклонения от формы первой гармоники входного тока потребления из сети питания, зависит установленная мощность элементов корректора, а от крутизны нарастания и спада всплеска зависит THDi, а также частота работы инвертора корректора. Исследуем один из вариантов воздействия на параметры коммутационного всплеска, который заключается в том, что между продольной обмоткой LMC-фильтра и входом выпрямителя включается еще одна обмотка Ld (рис. 1 пунктиром).

Включение ее согласно или встречно имеет различное влияние на форму входного тока и характеристики LMC-фильтра.

В случае применения LMC-фильтра в составе гибридного изменяются требования к его проектированию.

Это легко объяснить следующим образом: на рис.5 приведены эпюры потребляемого из сети тока (Iпс), тока первой гармоники (I1) и тока корректора (Iк). Из приведенных эпюр видно, что ток Iк существенно меньше тока Iпс так, как он определяется не значением тока потребителя, а только его отклонением от синусоидального значения тока первой гармоники. Теперь, помимо улучшения THDi, необходимо еще и обеспечить во входном токе сети минимум максимального отклонения от синусоидальной формы его первой гармоники. С этой целью в LMC-фильтр и введена дополнительная обмотка Ld. Величина индуктивности Ld=0,8 мГн и была выбрана из соображений минимального влияния на нагрузочную характеристику LMC-фильтра и максимального снижения амплитуды коммутационного всплеска.

Были проведены исследования на математических моделях с целью определения основных параметров качества потребляемой электроэнергии для 3 вариантов исполнения LMC-фильтров.

Для моделирования использовались значения параметров без изменений их величин, которые приведены после таблицы 1 для схемы, изображенной на рис.1. Результаты исследования приведены в таблице 2.

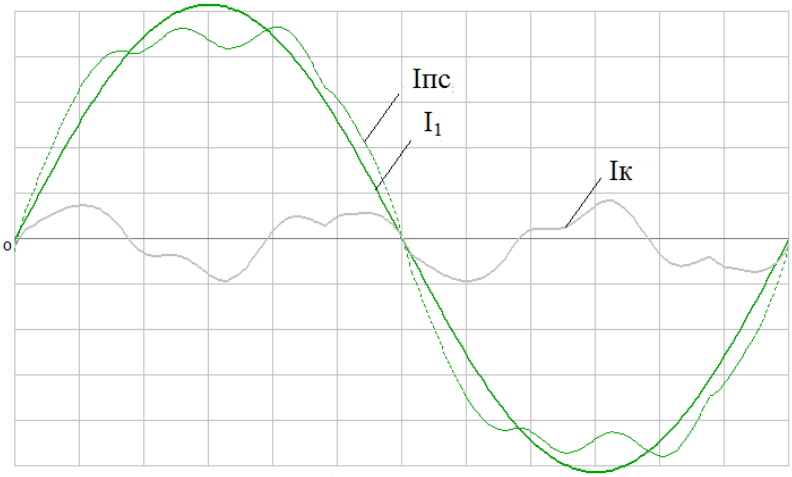


Рис.5 Эпюра токов Iпс, I1, Iк для гибридного фильтра.

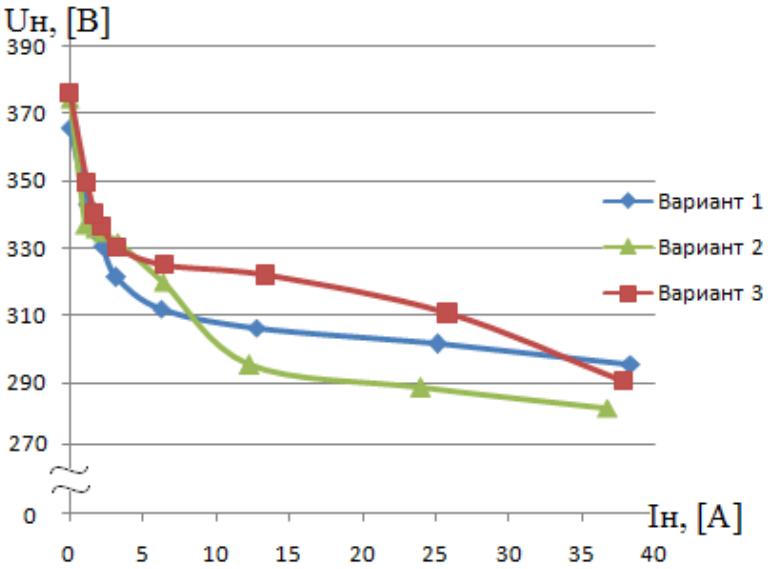


Рис.6 Нагрузочные характеристики 3 вариантов исполнения LMC-фильтров.

Таблица 2 – Расчетные параметры вариантов использования LMC-фильтров

Вариант исполнения	Uн,В	Iн, А	Δ I, А	THDi,%	I_3, %	I_5, %	I_7, %	I_9, %	ΔUн, %	cos φ
1	295,7	38,4	14,86	12,2	11,24	2,6	2,5	3,0	5	0,97
2	282,6	36,8	18,45	26,2	18,3	13,8	10,5	1,8	4,95	0,89
3	290,6	37,9	9,63	14,04	13,75	2,7	1,9	1,2	4,8	0,99

Под вариантом №1 следует понимать вариант исполнения двухобмоточного (с L1, L2) LMC-фильтра, в варианте №2 используется LMC-фильтр с введением дополнительной обмотки Ld, включенной встречно по отношению к обмотке L1.

Вариант №3 иллюстрирует параметры LMC-фильтра с введением дополнительной обмотки Ld, включенной согласно по отношению к L1.

Анализ результатов моделирования показал, что введение дополнительной обмотки существенно влияет на работу LMC-фильтра.

Из таблицы 2 видно, что согласное включение дополнительной обмотки имеет ряд преимуществ: уменьшается ΔI, практически не влияя на параметры нагрузки и существенно не ухудшая THDi. В то же время указанные параметры при встречном включении дополнительной обмотки LMC-фильтр значительно ухудшаются. Степень влияния вариантов исполнения LMC-фильтра на его нагрузочную характеристику приведена на рис. 6, из которого видно, что номинальные мощности (10 кВт) для всех трех вариантов практически одинаковы.

На рис. 7 приведены напряжение сети и входной ток (Iпс) LMC-фильтра с согласным включением дополнительной обмотки, как лучшего варианта по параметру ΔI. При сравнении рис.4 с рис. 7 видно отсутствие коммутационного всплеска большой амплитуды и с крутым фронтом. Это позволяет снизить частоту работы АКФТ, а, значит, повысить коэффициент полезного действия, и уменьшить установленные мощности его элементов.

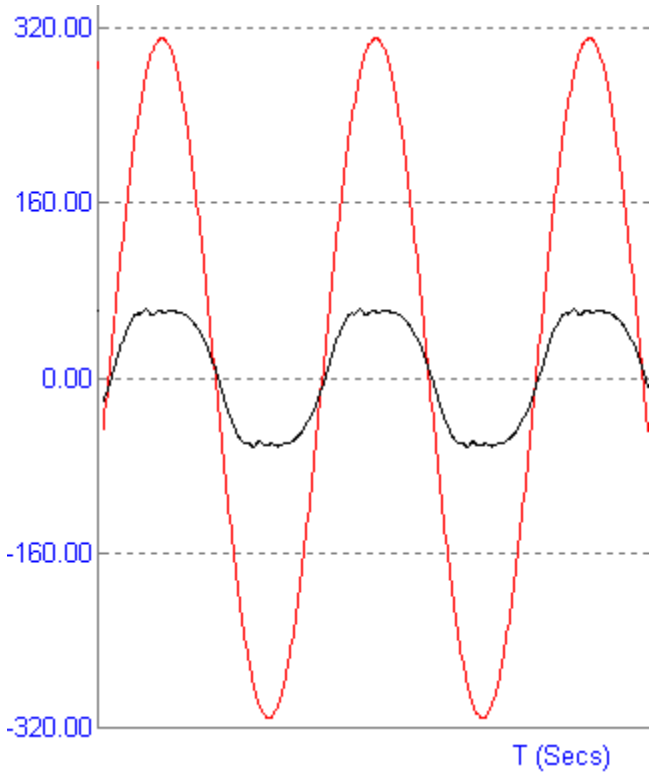


Рис.7 Напряжение сети (Uc) и входной ток (Iпс) LMC-фильтра с дополнительной обмоткой, подключенной согласно

Выводы.

1. Применение LMC-фильтров в однофазных выпрямителях с емкостным фильтром на выходе кардинально улучшают показатели качества потребляемой из сети электроэнергии.

2. Введение во входной LMC-фильтр дополнительной согласно включенной обмотки позволяет избавится от коммутационного всплеска в токе потребления выпрямительной установки.

3. Вариант исполнения LMC-фильтра с дополнительной обмоткой, включенной согласно, позволяет рекомендовать использовать его в качестве пассивного узла в составе гибридного фильтра.

Список литературы: **1.** *Волков И.В.* Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых электроприводов / *Волков И.В* . // – Техн.электродинамика. – 1999г. – 4. – 21-26с. **2.** *Волков И.В.* Сравнительный анализ способов фильтрации токов, потребляемых выпрямительными установками / *Волков И.В.*, *Акинин К.П.*, *Исаков Г.В.* // Техн.электродинамика. – 1999г. – 6. –23-27с. **3.** *Губаревич В.М.* Вхідний широкополий LMC-фільтр для однофазної випрямної установки / *Губаревич В.М.*, *Спірін В.М.*, *Салко С.В.*, *Гребенюк В.Г.* // Техн.электродинамика. – 2005г. – 3. –42-43с.

Bibliography (transliterated): **1.** Volkov I.V. Novaya kontseptsiya postroeniya silovyih tsepey chastotno-reguliruemyih elektroprivodov// Tehn.elektrodinamika. – 1999g. – 4. – S.21-26. **2.** Volkov I.V., Akinin K.P., Isakov G.V. Sravnitelnyiy analiz sposobov filtratsii tokov, potreblyaemyih vyipryamitelnyimi ustanovkami // Tehn.elektrodinamika. – 1999g. – 6. – S.23-27. **3.** Gubarevich V.M., SpIrIn V.M., Salko S.V. Grebenyuk V.G. VhIdniy shirokopoliy LMC-fIltr dlya odnofaznoYi vipryamnoYi ustanovki// Tehn.elektrodinamika. – 2005g. – 3. – S.42-43.

Поступила (received) 25.08.2015

УДК 621.314.1

В. В. ИВАХНО, канд. тех. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
В. В. ЗАМАРУЕВ, канд. тех. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Б. А. СТЫСЛО, асп. НТУ «ХПИ»;
Д. В. ВИННИКОВ, д-р наук, проф. Таллиннского технического университета, Эстония;
А. И. ЧУБ, м.н.с., асп. Таллиннского технического университета, Эстония;
Р. А. КОСЕНКО, асп. Таллиннского технического университета, Эстония

ОБРАТИМЫЙ ДВУЗХВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗДЕЛЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ И С НЕИЗМЕННЫМ ЗНАКОМ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЙ

Введение и постановка задачи. Двухзвенные преобразователи постоянного напряжения в постоянное с трансформаторной гальванической развязкой (DC/DC конверторы) широко используются в различных областях силовой электроники, в т.ч. во вторичных источниках электропитания, в системах альтернативной, в т.ч. солнечной, энергетики, аккумуляторных накопителях и т. п. Часто особенностью систем альтернативной энергетики является требование обратимости потока энергии от входа (например, солнечной панели с буферным накопителем на основе аккумуляторной батареи) на выход (например, в шину постоянного напряжения 400 В) и наоборот, при этом, очевидно, знаки входного и выходного напряжения неизменны. Для величин напряжений звена постоянного тока преобразователя (входной либо выходной цепей) менее 500 – 600 В в качестве управляемых ключей используют полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET).

Традиционными решениями DC/DC конверторов, в течение нескольких десятилетий, является построение силового коммутатора первичного звена на основе автономного инвертора напряжения (АИН). Однако в последнее время вызывают повышенный интерес структуры DC/DC конверторов, в которых первичное звено строится на основе т. наз. current-fed (CF) DC/DC конверторов, силовой коммутатор которых остается традиционным, на основе MOSFET, а входная цепь дополнена последовательным дросселем. В ряде работ ([1], [2] и др.) показаны значительные преимущества таких решений над традиционными, поскольку позволяют обеспечить при минимизации числа дополнительных силовых компонентов режимы мягкой снабберной (soft-switching, SS) коммутации совместно с естественной коммутацией - включения в нулях напряжения ключей АИН (режим ZVS). В результате удается существенно снизить коммутационные потери, повысить частоту преобразования. Новейшие методы SS для CF DC-DC преобразователей используют активный выпрямитель на выходе [3] - [5], т.е. вторичное звено строится на основе АИН. Наличие АИН во вторичном звене делает схему обратимой, т.е. позволяет осуществлять обмен энергией между входом и выходом.

В работах [6] - [8] с участием авторов предложены и обоснованы структуры DC/DC конверторов, в которых одно из звеньев строится на основе автономного инвертора тока (АИТ), а другое – на основе АИН. Специальный алгоритм управления силовыми ключами (алгоритм разделенной коммутации) для управляемых ключей АИН обеспечивает их естественное включение (режим ZVS) и их принудительное выключение; для управляемых ключей АИТ - естественное выключение (режим ZCS) и принудительное включение. Его суть заключается в создании временного интервала между моментом принудительного выключения ключа АИН и принудительного включения ключа АИТ. Установка параллельно ключам АИН снабберных конденсаторов ограничивает величину коммутационных потерь выключения; роль индуктивных снабберов включения ключей АИТ может выполнять индуктивность рассеяния силового разделительного трансформатора. Снабберы выключения ключей АИТ и включения ключей АИТ являются бездиссипативными, что, наряду с использованием режимов ZVS и ZCS в соответствующих звеньях преобразователя, позволяет повысить частоту преобразования до уровня, близкого к величине частоты преобразования резонансных схем двухзвенных преобразователей, но при отсутствии силового колебательного контура и малом числе вспомогательных силовых компонентов.

Среди особенностей DC/DC конверторов с разделенной коммутацией следует отметить то, что при смене знака потока мощности меняется знак среднего выходного тока звена постоянного тока АИН и, соответственно, среднего напряжения звена постоянного тока АИТ, что делает невозможным непосредственно использовать структуру АИТ – трансформатор – АИН в качестве DC/DC конверторов в случае, когда знаки средних напряжений входа и выхода не меняются при смене знака средней мощности (например, на входе установлена аккумуляторная батарея, а выход подключен к шине (сети) постоянного напряжения).

В работе [8] рассмотрен DC/DC конвертор, построенный согласно структуре: АИТ по мостовой схеме с входным дросселем – трансформатор – АИН по полумостовой схеме (активный выпрямитель) и предназначенный для преобразования входного напряжения фотопанели (30 В) в напряжение сети постоянного тока (400 В). Ключи АИТ представляют собой MOSFET с последовательным диодом, ключи АИН – также MOSFET. Алгоритм работы ключей – разделенная коммутация. Регулирование потока энергии от входа

© В.В. Ивахно, В.В. Замаруев, Б.А. Стысло, Д.В. Винников, А.И. Чуб, Р.А. Косенко, 2015

преобразователя на выход осуществляется регулированием относительной длительности существования контура холостого хода в АИТ (временного интервала, при котором включены и проводят ток ключи инверторной стойки АИТ), на этом интервале энергия со входа на выход не передается. Номинальная мощность 275 Вт, частота преобразования 100 кГц, оценка КПД - 92.8% (при температуре переходов примененных MOSFET 125 °C). В этой же работе, а также в работе [9], указана возможность повышения КПД за счет снижения статических потерь в ключах АИТ – установка вместо диодов АИТ транзисторов MOSFET (оценка КПД - 97% при тех же прочих условиях) (см. рис. 1).

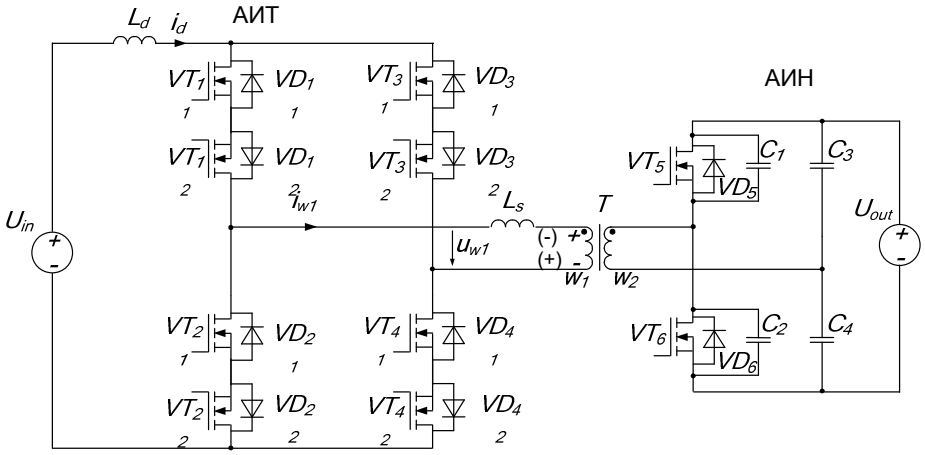


Рисунок 1. Схема обратимого преобразователя с неизменным знаком входного и выходного напряжений

При такой модификации схемы (диоды VD_{12}, VD_{22}, VD_{32}, VD_{42} шунтированы транзисторными структурами VT_{12}, VT_{22}, VT_{32}, VT_{42} соответственно), т.е. замены двуквадрантных ключей АИТ с обратной блокирующей способностью на полностью управляемые четырехквадрантные, помимо снижения статических потерь ключей, схема, при сохранении режимов ZVS и ZCS ключей АИН и АИТ, а также бездиссипативности соответствующих снабберов, приобретает новое качество – возможность обеспечить сохранение знака напряжения зажимов постоянного тока АИТ при смене знака тока дросселя (т.е. при смене направления потока энергии от входа преобразователя к выходу). Последнее позволяет использовать предлагаемое решение в соответствующих преобразователях. Цель данной работы – обоснование вышесказанного и подтверждение этого путем имитационного моделирования.

Работа преобразователя в режиме прямой передачи энергии со входа на выход. В состав преобразователя (рис.1) входят источник входного напряжения U_{in}, преобразователь первичного звена, построенный на базе АИТ, силовой разделительный трансформатор T, преобразователь вторичного звена, построенный на базе АИН, нагрузка (источник напряжения U_{out}.). В состав АИТ входит входной фильтр (дроссель L_d) и силовой коммутатор по мостовой схеме на четырехквадрантных ключах *VT11 – VT42, VD11 – VD42*. В состав АИН входит силовой коммутатор по полумостовой схеме на двухквадрантных ключах *VT5 – VT6, VD5 – VD6* и конденсаторы *C3 – C4* емкостного делителя напряжения, выполняющие также функцию выходного фильтра; ключи АИН шунтированы снабберными конденсаторами *C1* и *C2*. В схеме присутствует также дроссель L_s, учитывающий приведенную к первичной стороне трансформатора индуктивность рассеяния трансформатора. Пусть параметры схемы (величины напряжений источников U_{in},, U_{out} и коэффициента трансформации трансформатора $K_T=w_2/w_1$) таковы, что $U_{in} < u_{w1}$.

На рисунке 2 представлены временные диаграммы работы преобразователя в режиме передачи энергии с входа на выход (от источника U_{in} в выходной источник напряжения U_{out}), в т.ч. сигналы управления – напряжения на затворах транзисторов (u_{GVT11}-u_{GVT6}). В этом режиме работа схемы напоминает работу схемы повышающего преобразователя, т.е. имеются интервалы накопления энергии во входном дросселе L_d и интервалы передачи энергии в нагрузку. На рис.3 представлены пути протекания тока на различных временных интервалах полупериода в этом режиме. За положительное направление тока транзистора принято направление от стока к истоку, для тока дросселя – в соответствии с рис. 1, а для тока обмотки трансформатора – в соответствии с рис. 3,а.

Пусть на интервале 1 передачи энергии в нагрузку включены *VT11*, *VT12*, *VT41* и *VT42*, а также *VT5* и *VD5*, при этом $U_{in}<u_{w1}$, *C1* разряжен, *C2* заряжен до U_{out}, ток i_d спадает.

По окончании этого интервала производится включение *VT21* и *VT22*. Ток обмотки w_1 спадает к нулю, как и токи транзисторов *VT41* и *VT42* (окончание интервала 2). На этом интервале токи транзисторов *VT21* и *VT22* нарастают по модулю. На интервале 2 происходит перевод тока i_d с ключей *VT41* и *VT42* на ключи *VT21* и *VT22* (коммутация вентилей). Скорость спада тока выключающихся ключей ограничивается величиной приведенной к первичной стороне индуктивности рассеяния L_s, которая играет роль индуктивного снаббера включения

транзистора. Эффект сквозных токов дополнительно ограничивается, поскольку на интервале проводимости транзистора *VT12* значительная (если не основная) доля тока ключа не протекает через диод

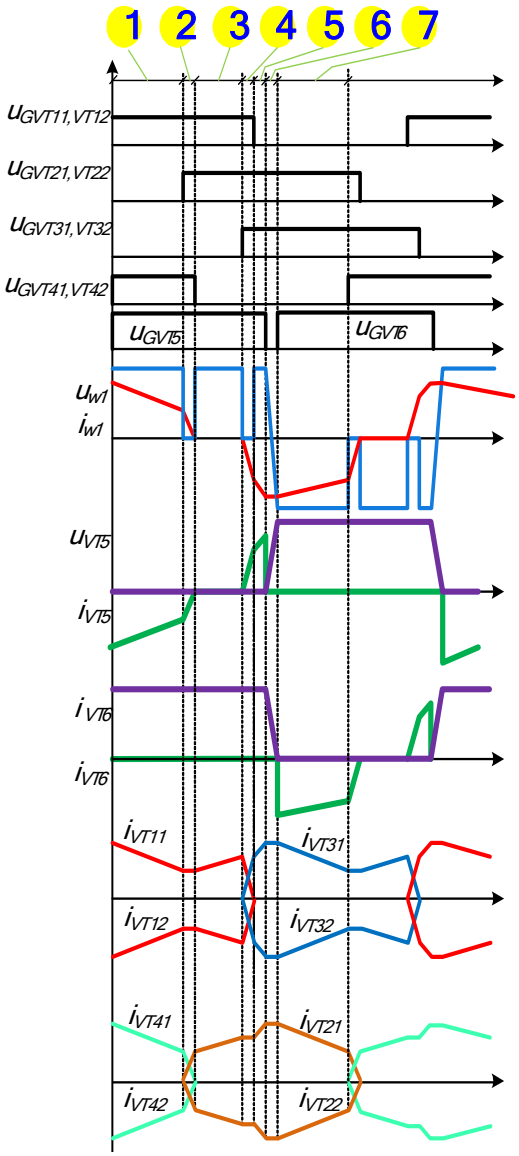


Рисунок 3. Временные диаграммы работы преобразователя в режиме передачи энергии с входа на выход

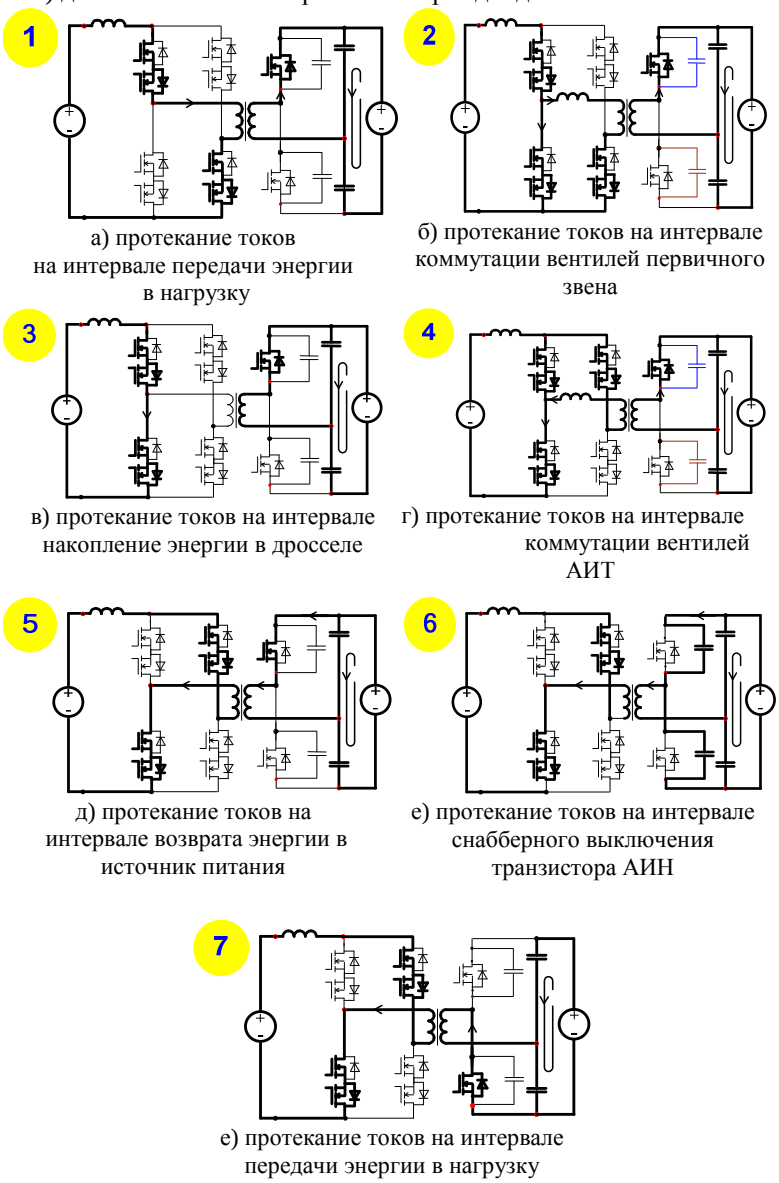


Рисунок 4. Пути протекания тока на различных временных интервалах полупериода в режиме передачи энергии от источника U_{in} в выходной источник напряжения U_{out}

VD12 и накопленный в структуре диода избыточный заряд может быть серьезно ограничен. В момент спада к нулю тока обмотки снимают управление транзисторов *VT41* и *VT42*, они выключаются естественно, в режиме ZCS.

После спада к нулю тока обмотки напряжение на ней восстанавливается, поскольку к вторичной обмотке трансформатора через включенный транзистор *VT5* приложено прежнее напряжение (обозначено на рис. 1). К диоду *VD42* прикладывается обратное напряжение, а к транзистору *VT31* - прямое.

На интервале 3 (интервал холостого хода) энергия в нагрузку не передается, а накапливается во входном дросселе, при этом ток дросселя возрастает (как в повышающих преобразователях).

По окончании интервала накопления включают транзисторы *VT31*, *VT32*, происходит коммутация (перевод тока) с транзисторов *VT11*, *VT12* (интервал 4). Коммутация происходит аналогично интервалу 2. В результате транзисторы *VT11*, *VT12* выключаются естественно, в режиме ZCS. Индуктивность рассеяния L_s ограничивает сквозные токи в контуре коммутации. В момент окончания перевода тока снимают управление с транзисторов *VT11*, *VT12*, а ток обмотки w_1, как и w_2, принимает знак, противоположный знаку соответствующего тока на интервале 1.

На интервале 5, поскольку напряжение на обмотке трансформатора знак не поменяло, происходит передача энергии от источника U_{out} источнику U_{in}. Ток ключа *VT5* меняет знак, и диод *VD5* закрывается. Интервал 5 имеет малую длительность.

В начале интервала 6 выключают транзистор *VT5*, током обмотки w_2 конденсатор *C1* заряжается до U_{out}, а *C2* разряжается до нуля, т.е. производится снабберная коммутация. По достижении напряжением транзистора *VT5* величины U_{out}, а напряжением на *VT6* - нуля включается диод *VD6*, и производят включение *VT6* (в режиме ZVS); при этом напряжение u_{w1} поменяло знак на противоположный. На следующем полупериоде работы преобразования, включающий в себя интервал 7 передачи энергии в нагрузку, процессы происходят аналогично.

Работа преобразователя в режиме передачи энергии с выхода на вход. На рис. 5 представлены временные диаграммы работы преобразователя в режиме передачи энергии с выхода на вход (от источника U_{out}. во входной источник напряжения U_{in}). В этом режиме работа схемы напоминает работу схемы понижающего преобразователя, т.е. имеются интервалы холостого хода и интервалы передачи энергии в нагрузку. В этом режиме ток дросселя имеет направление, противоположное направлению, показанном на рис. 1. На рис.6 представлены пути протекания тока на различных интервалах полупериода.

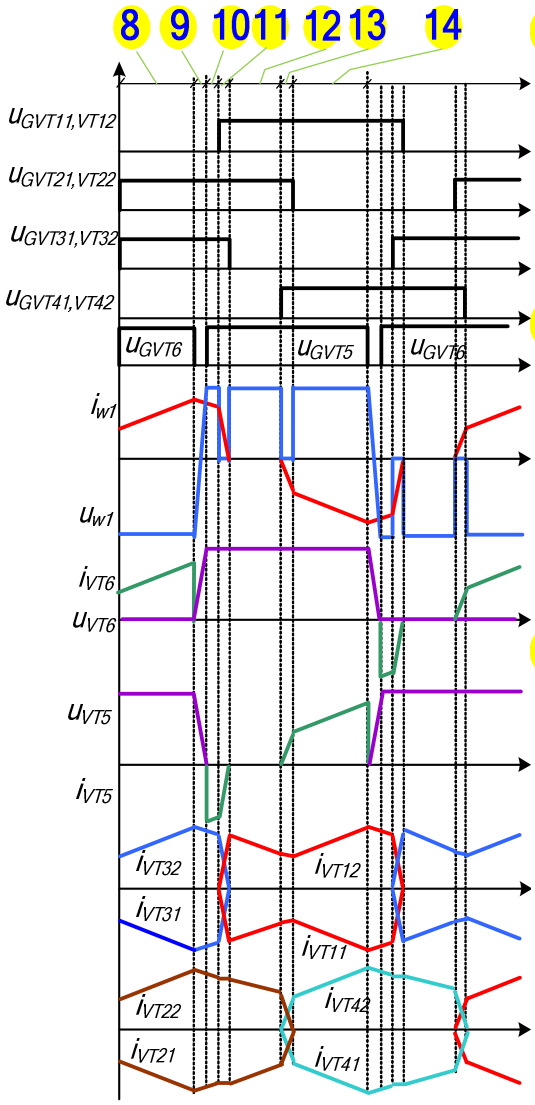
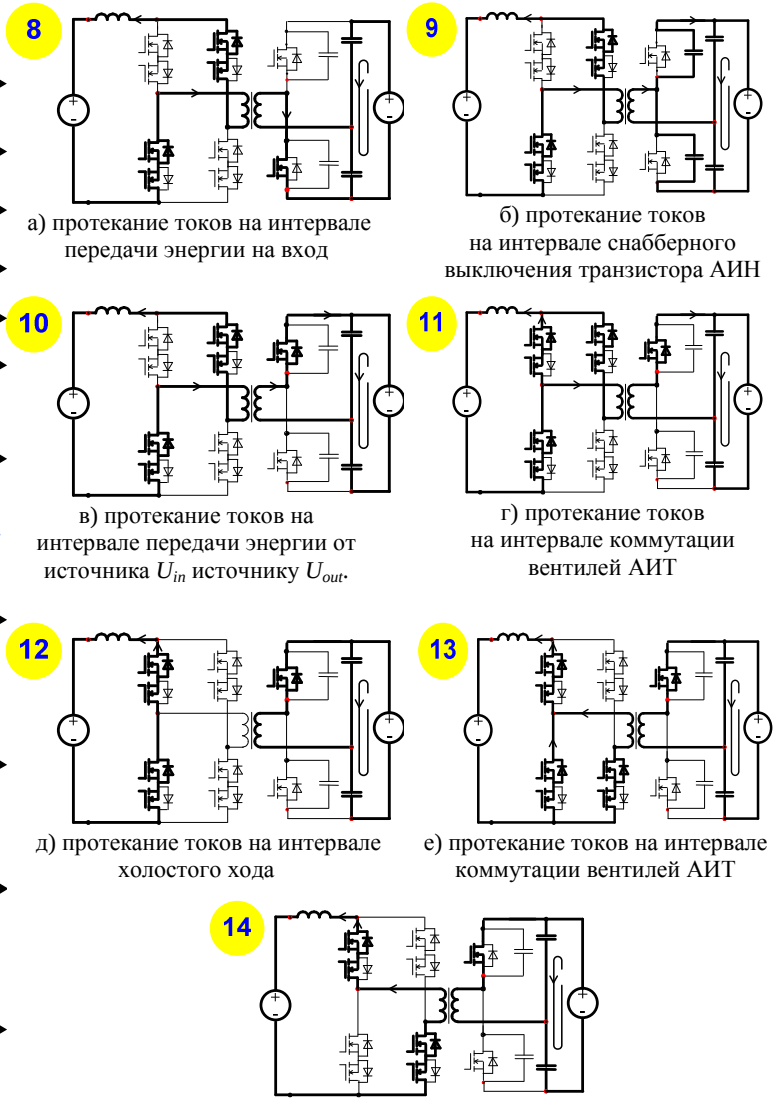


Рисунок 5. Временные диаграммы работы преобразователя в режиме передачи энергии с выхода на вход



а) протекание токов на интервале передачи энергии на вход

б) протекание токов на интервале снабберного выключения транзистора АИН

в) протекание токов на интервале передачи энергии от источника U_{in} источнику U_{out}.

г) протекание токов на интервале коммутации вентилей АИТ

д) протекание токов на интервале холостого хода

е) протекание токов на интервале коммутации вентилей АИТ

е) протекание токов на интервале следующего полупериода

Рисунок 6. Пути протекания тока на различных временных интервалах полупериода в режиме передачи энергии от источника U_{out} во входной источник напряжения U_{in}

На интервале 8 передачи энергии в источник питания U_{in} включены *VT21*, *VT22*, *VT31* и *VT32*, а также *VT6*, при этом $U_{in}<u_{w1}$, *C1* заряжен до U_{out}, *C2* разряжен, ток i_d нарастает, напряжение u_{w1} имеет полярность, показанную на рис. 1 в скобках.

В начале интервала 9 выключают транзистор *VT6*, током обмотки w_2 конденсатор *C2* заряжается до U_{out}, а *C1* разряжается до нуля, т.е. производится снабберная коммутация. В конце интервала, по достижении напряжением транзистора *VT6* величины U_{out} , а напряжением на *VT5* - нуля включается диод *VD5*, и производят включение *VT5* (в режиме ZVS); при этом напряжение u_{w1} поменяло знак на противоположный (показано на рис. 1 без скобок).

На интервале 10, поскольку напряжение на обмотке трансформатора поменяло знак, происходит передача энергии от источника U_{in} источнику U_{out}. Проводят ток *VD5* и *VT5*. Интервал 10 имеет малую длительность.

На начале интервала 11 включают *VT11*, *VT12*, происходит коммутация (перевод тока) с транзисторов *VT31*, *VT32* в транзисторы *VT11*, *VT12*. В результате транзисторы *VT31*, *VT32* выключаются естественно, в режиме ZCS. Индуктивность рассеяния L_s ограничивает сквозные токи в контуре коммутации. В момент окончания перевода тока снимают управление с транзисторов *VT31*, *VT32*, а ток обмотки w_1, как и w_2, становится равным нулю.

На интервале 12 (интервал холостого хода) энергия во входной источник не передается, при этом ток дросселя спадает (как в понижающих преобразователях). Напряжение обмотки w_1 зафиксировано из-за включенного состояния транзистора *VT5*.

По истечении интервала холостого хода включают транзисторы *VT41* и *VT42* (интервал 13). Ток обмотки w_1 нарастает, как и токи транзисторов *VT41* и *VT42*, а ключей *VT21* и *VT22* - спадают (коммутация вентилей). Индуктивность рассеяния L_s ограничивает сквозные токи в контуре коммутации. В момент спада к нулю токов ключей *VT21* и *VT22* с них снимают управление, они выключаются естественно, в режиме ZCS.

По окончании интервала коммутации на интервале 14 следующего полупериода энергия передается от источника U_{out}. во входной источник напряжения U_{in}, процессы на этом полупериоде происходят аналогично.

Как видно из рис. 3 и рис. 5, работа преобразователя в первом и втором режимах весьма сходны. Диаграммы работы в режиме передачи энергии с выхода на вход будут подобны диаграммам в режиме передачи энергии со входа на выход, если поменять направления токов и направление времени. В обоих режимах обеспечивается естественное включение (режим ZVS) и мягкое снабберное выключение ключей АИН и естественное выключение (режим ZCS) и мягкое снабберное включение ключей АИТ, т.е. потери в ключах весьма близки к статическим.

Результаты моделирования. В работе было проведено имитационное моделирование процессов в преобразователе в двух установившихся режимах: при передаче энергии в нагрузку (рис. 7) и на вход (рис 8).

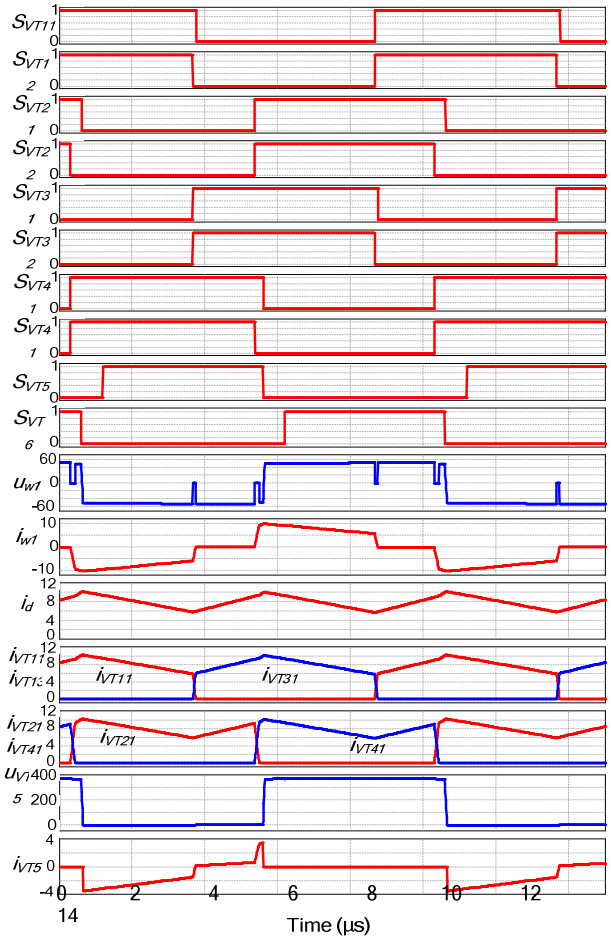


Рисунок 7. Машинограммы процессов в преобразователе при передаче энергии со входа к выходу

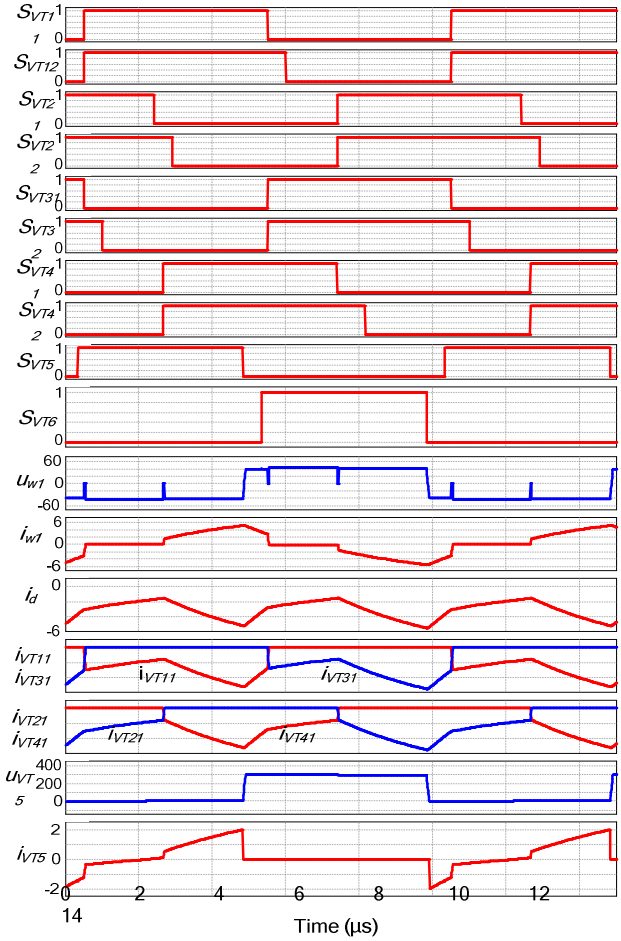


Рисунок 8. Машинограммы процессов в преобразователе при передаче энергии с выхода ко входу

Моделирование производилось в пакете PSIM 9. Символами S_{11} – S_6 обозначены коммутационные функции сигналов управления соответствующих транзисторов (единичное значение соответствует включающему транзистор сигналу, нулевое - выключающему). Величины напряжений указаны в вольтах, токов – в амперах. При моделировании было принято: U_{in}=30 В (15 В), U_{out}=350 В (300 В) (в скобках указаны величины напряжений при симуляции в режиме передачи энергии с выхода на вход), величина средней мощности на входе 240 Вт в режиме передачи энергии на выход и 45 Вт – на вход, частота преобразования 100 кГц. Величина индуктивности входного дросселя L_d=15 мкГн, индуктивности рассеяния трансформатора, приведенной к первичной обмотке L_s=380 нГн, величина коэффициента трансформации $K_T=w_2/w_1$=3,5, величины емкостей снабберных конденсаторов $C_1=C_2$=265 пФ, конденсаторов емкостного делителя напряжения АИН $C3=C4$=1 мкФ. Видно, что результаты имитационного моделирования вполне адекватны теоретическим предпосылкам.

Выводы. В работе описана схема и алгоритм управления силовыми ключами обратимого двухзвенного преобразователя постоянного напряжения в постоянное с трансформаторной гальванической развязкой (DC-DC конвертора). Первичное звено представляет собой автономный инвертор тока по мостовой схеме на полевых транзисторах, вторичное – полумостовой автономный инвертор напряжения также на полевых транзисторах. Специальный алгоритм управления ключами преобразователя (алгоритм разделенной коммутации) обеспечивает естественное (в нулях напряжения) включение и мягкое (снабберное) выключение транзисторов инвертора напряжения и естественное (в нулях тока) выключение и мягкое включение транзисторов инвертора тока. Обосновано, что при использовании в качестве ключей инвертора тока четырехквадрантных ключей (встречно-последовательно соединенные полевые транзисторы), помимо снижения статических потерь в ключах инвертора тока и сохранения преимуществ разделенной коммутации в смысле практического отсутствия динамических потерь в ключах, преобразователь позволяет обеспечить передачу энергии также с выхода на вход без изменения знака среднего напряжения на входе инвертора тока. Представлены результаты имитационного моделирования процессов в пакете PSIM 9 для преобразователя с входным напряжением (30 – 15 В), выходным (300 – 350) В, мощностью 275 Вт с частотой преобразования 100 кГц, подтверждающие теоретические предпосылки.

Благодарность. Данная научно-исследовательская работа была частично финансирована Министерством образования и науки Эстонии (проекты SF0140016s11 и PUT744).

Список литературы: **1.** *Rathore, A.K.; Prasanna, U.* "Comparison of soft-switching voltage-fed and current-fed bi-directional isolated Dc/Dc converters for fuel cell vehicles" 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.252-257, 28-31 May 2012. **2.** *Mohr, M.; Fuchs, F.W.* "Voltage Fed and Current Fed Full Bridge Converter for the Use in Three Phase Grid Connected Fuel Cell Systems" CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2006. , vol.1, pp.1-7, 14-16 Aug. 2006. **3.** *Pan Xuewei; Rathore, A.K.; Prasanna, U.R.* "Novel Soft-Switching Snubberless Naturally Clamped Current-Fed Full-Bridge Front-End-Converter-Based Bidirectional Inverter for Renewables, Microgrid, and UPS Applications" IEEE Transactions on Industry Applications, vol.50, no.6, pp.4132-4141, Nov.-Dec. 2014. **4.** *Nayanasiri, D.R.; Foo, G.H.B.; Vilathgamuwa, D.M.; Maskell, D.L.* "A Switching Control Strategy for Single- and Dual-Inductor Current-Fed Push–Pull Converters" IEEE Transactions on Power Electronics, vol.30, no.7, pp.3761-3771, July 2015. **5.** *Pan Xuewei; Rathore, A.K.* "Naturally Clamped Soft-Switching Current-Fed Three-Phase Bidirectional DC/DC Converter" IEEE Transactions on Ind. Electron., vol.62, no.5, pp.3316-3324, May 2015. **6.** *Blinov, A.; Ivakhno, V.; Zamaruev, V.; Vinnikov, D.; Husev, O.* "Experimental verification of DC/DC converter with full-bridge active rectifier" IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp.5179-5184, 25-28 Oct. 2012. **7.** *Blinov, A.; Ivakhno, V.; Zamaruev, V.; Vinnikov, D.; Husev, O.* "A novel high-voltage half-bridge converter with phase-shifted active rectifier" 2012 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp.956,959, 19-21 March 2012. **8.** *Blinov, A.; Vinnikov, D.; Ivakhno, V.,* "Full soft-switching high step-up DC-DC converter for photovoltaic applications," 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), pp.1,7, 26-28 Aug. 2014. **9.** *Kosenko R, Husev O, Chub A.* "Full Soft-Switching High Step-Up Current-Fed DC-DC Converters with Reduced Conduction Losses", 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG),pp 1-6, May 2015.

Поступила (received) 30.08.2015

УДК 681.51

А. В. САДОВОЙ, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе ДГТУ, Днепродзержинск;
Ю. В. СОХИНА, канд. техн. наук, доц. ДГТУ, Днепродзержинск

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПРИНЦИП СИММЕТРИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ

Введение. В 1960 году практически одновременно были опубликованы статьи А.М. Летова [1] – [3] и Р. Калмана [4], посвященные определению методами математического анализа алгоритмов управления, оптимальных в смысле минимума принятых априори интегральных квадратичных критериев качества, или по терминологии А.М. Летова решению задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). Эти статьи послужили основой многочисленных работ, посвященных АКОР в различных постановках и опубликованных на протяжении длительного периода времени. Одновременно с этим развивается концепция известных со времен И. Ньютона, Ж. Лагранжа, А. Пуанкаре обратных задач динамики применительно к системам автоматического управления, одной из составляющих которой является принцип симметрии [5].

Задача АКОР в постановке Летова-Калмана может быть решена только численно и не имеет строгого аналитического решения в общем виде, что затрудняет анализ общих свойств синтезированных систем. Кроме того при АКОР традиционно полагают критерии оптимальности априорно заданными, оставляя выбор вида оптимизирующего функционала и его коэффициентов за пределами этой задачи, поэтому полученные управляющие воздействия являются оптимальными лишь в смысле минимума назначенного функционала, минимизация которого не гарантирует достижения желаемых прямых показателей качества процесса управления. В связи с этим весьма актуальными являются вопросы выбора таких интегрантов оптимизирующих функционалов, которые гарантировали бы синтезированным системам вполне определенные наперед заданные динамические и статические свойства.

Постановка задачи. Настоящая статья посвящена установлению однозначной связи между параметрами объекта управления, видом и весовыми коэффициентами интегральных функционалов, прямыми показателями качества процессов управления и функциями Ляпунова замкнутых электромеханических систем, синтезированных в результате решения задачи АКОР.

Материалы исследования. Рассмотрим синтез системы управления, обеспечивающей движение изображающей точки по назначенной траектории, как решение обратной задачи динамики. Пусть движение управляемого объекта подчиняется дифференциальным уравнениям

$$py_i=\sum_{k=1}^{n} b_{ik}y_k+m_n u\,,\ (i=1,\dots,n)\,. \tag{1}$$

Система n уравнений (1) может быть приведена к одному дифференциальному уравнению n-го порядка

$$\sum_{k=0}^{n} a_k p^k y_1=m_n u\,. \tag{2}$$

Требуется определить управляющее воздействие u, которое обеспечит движение координаты y_1(t) по траектории $y_1^*(t)$. В соответствии с основной идеей обратных задач динамики определим управляющее воздействие из уравнения (2)

$$u=m_n^{-1}\sum_{k=0}^{n} a_k p^k y_1(t)\,. \tag{3}$$

Подставим в (3) вместо текущего значения переменной y_1(t) ее желаемое значение $y_1^*(t)$

$$u^*=m_n^{-1}\sum_{k=0}^{n} a_k p^k y_1^*(t)\,. \tag{4}$$

Из выражения (4) следует, что искомое управляющее воздействие может быть найдено как функция времени в результате выполнения конечного числа операций: дифференцирования, сложения, умножения и т.д.

На основании соотношения (4) формулируются общие положения определения управляющих воздействий, обеспечивающих движение системы по назначенной траектории. Из сопоставления выражений (2) и (4) следует, что операции формирования искомого управления обратны соответствующим операциям, определяющим структуру математической модели управляемого объекта. Интегрированию в математической модели объекта соответствует дифференцирование в алгоритме управления, суммированию соответствует вычитание, умножению – деление. В конечном итоге выходная u^* и входная $y_1^*(t)$ переменные структурной схемы алгоритма управления представляют собой соответствующие обращенные переменные u, y_1 математической модели управляемого объекта. Таким образом, структурная схема управляющей части системы может быть получена на основании структурной схемы объекта управления в результате обращения операций и соответствующих переменных [5].

© А.В. Садовой, Ю.В. Сохина ,2015

Иными словами, передаточная функция управляющей части системы обратна передаточной функции управляемого объекта. В результате этого эквивалентная передаточная функция рассматриваемой разомкнутой системы равна единице, что определяет условие идеального воспроизведения заданной траектории движения $y_1 = y_1^*$. Такое условие оказывается реализуемым лишь в том случае, когда имеет место сокращение нулей и полюсов передаточных функций объекта управления $W_0(p)$ и управляющего устройства $W_y(p)$. Отсюда следует, что воспроизведение заданных траекторий движения в разомкнутых системах, построенных на основании принципа симметрии, возможно лишь для стационарных объектов с замороженными параметрами при отсутствии внешних возмущений. Для реальных электромеханических объектов рассмотренный принцип управления в разомкнутой системе лишен смысла.

Осуществим замыкание системы, включив в ее состав усилительный элемент с коэффициентом передачи g. В результате получим структурную схему, изображенную на рис. 1.

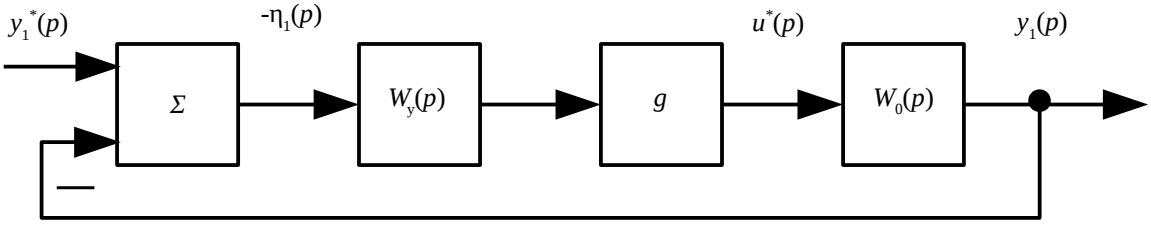


Рис.1 – К построению замкнутой системы

Передаточная функция такой системы

$$\Phi(p) = \frac{y_1(p)}{y_1^*(p)} = \frac{gW_y(p)W_0(p)}{1 + gW_y(p)W_0(p)} \tag{5}$$

при соблюдении условия $W_y(p) = \frac{1}{W_o(p)}$ примет вид

$$\Phi(p) = \frac{y_1(p)}{y_1^*(p)} = \frac{g}{1+g}. \tag{6}$$

Выражение (6) свидетельствует о том, что использование свойств симметрии теоретически позволяет построить безынерционную замкнутую систему управления, а при $g \to \infty$ обеспечить равенство единице передаточной функции такой системы. Следовательно, управляющая часть системы должна полностью скомпенсировать собственную динамику объекта управления и обеспечить идеальное воспроизведение ступенчатого задающего воздействия. В реальных линейных электромеханических объектах это возможно лишь при наличии источника энергии неограниченной мощности, что является физически нереализуемым. Поэтому модифицируем замкнутую систему, структурная схема которой приведена на рис.1, путем введения в ее состав интегрирующего звена, способствующего формированию реально достижимых предельных динамических характеристик в замкнутом состоянии и обеспечивающего в случае необходимости устранение статической ошибки при ограниченном коэффициенте усиления. Кроме того, учтем ограничение предельного значения управляющего воздействия путем включения в соответствующее место прямого канала усиления системы функции ограничения sat (saturation). В результате получим систему, структурная схема которой приведена на рис. 2. В такой системе управляющее воздействие $u(p)$, непосредственно поступающее на вход объекта управления, равно оптимальному управлению $u^*(p)$, если $u^*(p)| \le 1$ и $u(p) = \pm 1$ в противном случае.

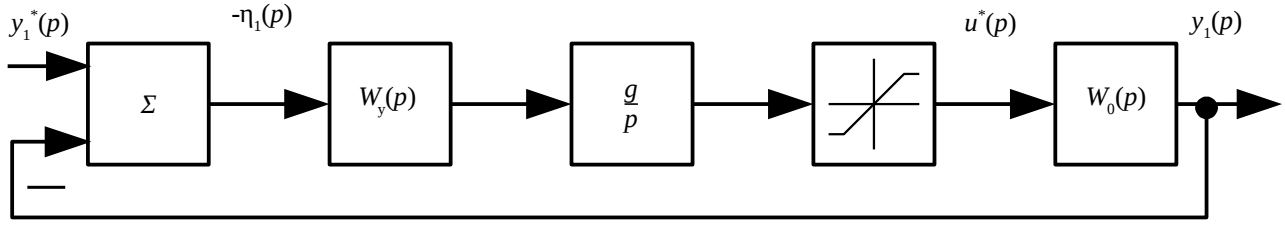


Рис. 2 – Система с интегральной составляющей

Рассмотрим передаточную функцию замкнутой системы когда $u(p) = u^*(p)$, т.е. когда управляющее воздействие на входе объекта не достигло уровня ограничения

$$\Phi(p) = \frac{y_1(p)}{y_1^*(p)} = \frac{\frac{g}{p}W_y(p)W_0(p)}{1 + \frac{g}{p}W_y(p)W_0(p)}. \tag{7}$$

При соблюдении условия $W_y(p)=\frac{1}{W_o(p)}$ передаточная функция (7) преобразуется к виду

$$\Phi(p)=\frac{y_1(p)}{y_1^*(p)}=\frac{1}{\frac{1}{g}p+1}. \quad (8)$$

Иными словами, замкнутая система автоматического управления (САУ) эквивалентна апериодическому звену первого порядка с постоянной времени $T = 1 / g$.

При подаче на вход системы ступенчатого задающего воздействия y_1^* достаточно большой амплитуды движение ее будет происходить по двум отрезкам фазовых траекторий. В начальный момент под действием значительного по абсолютной величине воздействия y_1^* произойдет насыщение регулятора и система управления будет работать как разомкнутая с максимально допустимым управляющим воздействием $u = 1$. Траектория движения выходной переменной y_1 при этом определяется исключительно динамическими параметрами объекта управления и уровнем ограничения управляющего воздействия. По мере разгона системы ошибка η_1 начнет снижаться до тех пор, пока u^* не станет равным единице. В этот момент произойдет замыкание системы и дальнейшее движение будет осуществляться по экспоненте $\exp\left(\frac{1}{g}t\right)$ в соответствии с передаточной функцией (8) до тех пор, пока ошибка η_1 не станет равной нулю. Таким образом, выбором коэффициента усиления регулятора g можно обеспечить протекание переходного процесса перевода системы из начального положения $\eta_1(0)$ в начало координат $\eta_1=0$ на конечной стадии с требуемой интенсивностью. Если же задающее воздействие $y_1^*(t)$ как функция времени представляет собой воспроизводимую траекторию, при отработке которой на любом участке управляющее воздействие $u_1^*(t)$ не достигает уровня ограничения, то размыкание системы не происходит и она ведет себя как астатическая система первого порядка. Идеальное воспроизведение таких невозмущенных движений с нулевой ошибкой может быть осуществлено в скользящем режиме, когда g = ∞, а функция sat трансформируется в функцию sign.

Такой подход к синтезу алгоритмов управления при определенных условиях полностью соответствует решениям задачи аналитического конструирования регуляторов. Покажем это на примере объекта управления произвольного порядка, движение которого описывается нормальной системой дифференциальных уравнений в форме Коши

$$py_i=\sum_{k=1}^{n} b_{ik}y_k+m_n u,\ (i=1,2,\ldots,n), \quad (9)$$

где y_k, u – переменные состояния и управляющее воздействие в относительных единицах; b_{ik}, m_n – постоянные коэффициенты. Преобразуем систему (3.19) к форме Фробениуса

$$\begin{gathered} p\,\hat{y}_i=\hat{y}_{i+1},\ i=1,2,\ldots,n-1; \\ p\,\hat{y}_n=\sum_{i=1}^{n}-a_i\hat{y}_i+M_n u. \end{gathered} \quad (10)$$

Необходимо отметить, что в системе (10) $\hat{y}_1,\ldots,\hat{y}_n$ – это некие фиктивные координаты, введенные в систему преднамеренно, причем некоторые из них могут совпадать с реальными фазовыми координатами объекта управления. В данном случае $\hat{y}_1$ совпадает с y_1. Системы (9) и (10) описывают движение одного и того же объекта в различных фазовых пространствах.

Последнее уравнение системы (10) можно записать в виде

$$p^n\hat{y}_1=-a_1\hat{y}_1-a_2p\,\hat{y}_1-a_3p^2\hat{y}_1-\ldots-a_np^{n-1}\hat{y}_1+M_nu, \quad (11)$$

выразив все слагаемые в левой и правой части через производные выходной координаты, т.к. для системы (10)

$$\hat{y}_2=p\,\hat{y}_1,\hat{y}_3=p^2\hat{y}_1,\ldots,\hat{y}_n=p^{n-1}\hat{y}_1,p\,\hat{y}_n=p^n\hat{y}_1.$$

Выражение (11) описывает динамику объекта с передаточной функцией

$$W_0(p)=\frac{y_1(p)}{u}(p)=\frac{M_n}{p^n+a_np^{n-1}+\ldots+a_2p+a_1}. \quad (12)$$

Таким образом, коэффициенты a_i, (i=1,...,n) в последнем уравнении системы (10) являются коэффициентами характеристического полинома объекта управления (9).

В соответствии с изложенным выше модифицированным принципом симметрии и структурной схемой на рис. 2 определим управляющее воздействие

$$u=-sat\left[\frac{g}{M_n}\left(\frac{a_1}{p}+a_2+a_3p+\ldots+a_np^{n-2}+p^{n-1}\right)\eta_1\right]. \quad (13)$$

Определим теперь оптимальное управление объектом (9) в результате решения задачи аналитического конструирования регуляторов, для чего опишем его динамику уравнениями возмущенного движения, соответствующими системе (10),

$$p\hat{\eta}_i=\hat{\eta}_{i+1};\ \ i=1,2,\ldots,n-1;$$
$$p\hat{\eta}_n=\sum_{i=1}^{n}-a_i\eta_i+M_nU, \tag{14}$$

где $\hat{\eta}_i=\hat{y}_i-\hat{y}_i^*,(i=1,\ldots,n)$ отклонения координат истинного движения системы (10) $\hat{y}_i$ от невозмущенного $\hat{y}_i^*$ U – стабилизирующее управление. Будем считать, что качество управления задано функционалом Летова

$$I=\int_0^{\infty}\left(\sum_{i,k=1}^{n}\hat{w}_{ik}\hat{\eta}_i\hat{\eta}_k+cU^2\right)dt\ , \tag{15}$$

и найдем управление $U(\hat{\eta}_1,\ldots,\hat{\eta}_n)$, доставляющее минимум интегралу (15) на траекториях движения системы (14) из любого начального положения $\hat{\eta}_1(0),\ldots,\hat{\eta}_n(0)$ в начало координат $\hat{\eta}_1(\infty)=,\ldots,=\hat{\eta}_n(\infty)=0$. Составим основное функциональное уравнение Беллмана для системы (14) и функционала (15)

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_i}p\hat{\eta}_i+\sum_{i,k=1}^{n}\hat{w}_{ik}\hat{\eta}_i\hat{\eta}_k+cU^2=0\ ,$$

или в развернутом виде

$$\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_1}¿\hat{\eta}_2+\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_2}¿\hat{\eta}_3+\ldots+\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_{n-1}}\hat{\eta}_n+$$
$$+\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_n}\left(-a_1\hat{\eta}_1-a_2\hat{\eta}_2-\ldots-a_n\hat{\eta}_n+M_nU\right)+\sum_{i,k=1}^{n}\hat{w}_{ik}\hat{\eta}_i\hat{\eta}_k+cU^2=0. \tag{16}$$

Для определения искомого управления продифференцируем выражение (16) по U

$$M_n\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_n}+2cU=0\ ,$$

Откуда

$$U=-\frac{M_n}{2c}\cdot\frac{\partial\hat{V}}{\partial\hat{\eta}_n}\ . \tag{17}$$

В алгоритме (17) $\hat{V}$ - функция Ляпунова - положительно определенная квадратичная форма

$$\hat{V}=\sum_{i,k=1}^{n}\hat{v}_{ik}\hat{\eta}_i\hat{\eta}_k,\ \ \hat{v}_{ik}=\hat{v}_{ki}\ . \tag{18}$$

С учетом (18) оптимальное управление (17) принимает вид

$$U=-\frac{M_n}{c}\left(\hat{v}_{1n}\hat{\eta}_1+\hat{v}_{2n}\hat{\eta}_2+\ldots+\hat{v}_{nn}\hat{\eta}_n\right)\ . \tag{19}$$

Учитывая то, что в реальных системах имеет место ограничение управляющего воздействия, и выразив переменные $\hat{\eta}_2,\ldots,\hat{\eta}_n$ через $\eta_1=\hat{\eta}_1$ в силу уравнений (14), окончательно получим

$$U=-sat\left[\frac{M_n}{c}\left(\hat{v}_{1n}+\hat{v}_{2n}p+\ldots\hat{v}_{nn}p^{n-1}\right)\eta_1\right]. \tag{20}$$

Сопоставляя алгоритмы (13) и (20), можно увидеть, что за исключением интегральной составляющей a_1 / p в (13) они имеют одинаковую структуру. Этот вывод позволяет сделать заключение о том, что решение задачи АКОР можно трактовать с позиций концепций обратных задач динамики, вытекающих из свойств симметрии систем автоматического управления. Такой подход к проблеме синтеза систем оптимального управления позволил разработать ряд простых вычислительных процедур определения структуры и параметров замкнутых систем, обладающих заданными динамическими и статическими показателями и свойствами низкой чувствительности к широкому спектру дестабилизирующих факторов.

Для синтеза алгоритма управления объектом (14) в виде (13) расширим фазовое пространство путем введения переменной состояния $\eta_0 = \eta_1 / p$, представляющей собой интеграл отклонения регулируемой переменной от желаемой траектории. Тогда управляющее воздействие

$$U=-sat\frac{M_n}{c}\sum_{i=0}^{n}v_{\text{in}}\eta_i=-sat\frac{g}{M_n}\left[\left(\frac{v_{0n}}{p}+v_{1n}+v_{2n}p+\ldots+v_{(n-1)n}p^{(n-2)}+v_{nn}p^{(n-1)}\right)\eta_1\right] \tag{21}$$

минимизирует квадратичный функционал качества

$$I=\int_0^{\infty}\left(\sum_{i,k=0}^{n}w_{ik}\eta_i\eta_k+c_jU_j^2\right)dt,\ \ w_{ik}=w_{ki}\ , \tag{22}$$

гарантируя при этом экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной $\eta_1=-\exp\left(\frac{c}{M_n^2}t\right)$ при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_j^*=l(t)$ и обеспечивая системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \eta_1 / p$. В алгоритме управления (21) v_i являются коэффициенты функции Ляпунова для замкнутой системы автоматического управления (САУ), которая представляет собой положительно определенную квадратичную форму

$$V(\eta)=\sum_{i,k=0}^{n} v_{ik}\eta_i\eta_k, v_{ik}=v_{ki}\,, \tag{23}$$

коэффициенты которой удовлетворяют критерию Сильвестра и связаны с параметрами объекта управления (14) соотношениями

$$\hat{v}_{ik}=a_{(i+1)}a_{(k+1)},\ (i,k=0,1,\ldots,n)\,. \tag{24}$$

Если в выражении (24) $i = n$ или $k = n$, то $a_{(i+1)}$ или $a_{(k+1)}$ принимают значения, равные 1.

Весовые коэффициенты функционала качества (22) и при этом однозначно определяются через коэффициенты функции (23) по формуле

$$\hat{w}_{ik}=\frac{M_n^2}{c_j}\hat{v}_{\text{in}}\hat{v}_{kn}=\hat{g}_j\hat{v}_{\text{in}}\hat{v}_{kn}\,. \tag{25}$$

Динамика любого электромеханического объекта управления может быть описана системой дифференциальных уравнений возмущенного движения в форме Коши

$$p\,\eta_i=\sum_{k=1}^{n} b_{ik}\eta_k+m_nU\,,\ (i=1,\ldots,n)\,, \tag{26}$$

где $\eta_i=y_i-y_i^*$ - отклонения координат реального движения системы y_i от желаемого y_i^*; b_{ik}, m_i - постоянные коэффициенты; U – управляющее воздействие.

В самом общем случае коэффициенты b_{ik} и m_n известны или легко вычисляются на основании паспортных данных ОУ. Они характеризуют параметры электромеханических систем (ЭМС), к которым относятся постоянные времени и коэффициенты усиления. Если изменение этих параметров не выходит за пределы диапазона, допускающего безаварийную работу ЭМС, то при синтезе систем управления коэффициенты b_{ik} и m_n могут быть приняты постоянными и соответствующими номинальным параметрам ОУ, т.к. такие изменения не приводят к нарушению устойчивости управляемого движения.

Для объекта (26) закон управления вида

$$U=-sat\left(\frac{m_n}{c}\sum_{i=0}^{n} v_{\text{in}}\eta_i\right)=-sat\left(\frac{m_n}{c}\sum_{i=0}^{n} v_{\text{in}}\eta_i\right) \tag{27}$$

минимизирует квадратичный функционал качества

$$I=\int_0^{\infty}\left(\sum_{i,k=0}^{n} w_{ik}\eta_i\eta_k+c\,U^2\right)dt\,,\ \ w_{ik}=w_{ki}\,, \tag{28}$$

гарантируя при этом экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной $\eta_1=-\exp\left(\frac{c}{M_n^2}t\right)$ при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_j^*=l(t)$ и обеспечивая замкнутой системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \eta_1 / p$. Коэффициентами алгоритма управления (27) являются коэффициенты функции Ляпунова

$$V(\eta)=\sum_{i,k=0}^{n} v_{ik}\eta_i\eta_k, v_{ik}=v_{ki} \tag{29}$$

которые связаны между собой соотношениями

$$v_{ik}=\frac{v_{\text{in}}v_{kn}}{v_{nn}},\ (i,k=0,1,2,\ldots,n)\,. \tag{30}$$

Коэффициенты v_{in}, v_{kn}, v_{nn}, входящие в управляющее воздействие (27) и в выражение (30), определяются соответственно минорами *i*-ых, *k*-ых или *n*-ых элементов первого столбца определителя коэффициентов системы (26)

$$\Delta=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \ldots & b_{1j} & \ldots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \ldots & b_{2j} & \ldots & b_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ b_{m1} & b_{m2} & \ldots & b_{mj} & \ldots & b_{mn} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ b_{(n-1)1} & b_{(n-1)2} & \ldots & b_{(n-1)j} & \ldots & b_{(n-1)n} \\ b_{n1} & b_{n2} & \ldots & b_{nj} & \ldots & b_{nn} \end{bmatrix}. \tag{31}$$

Коэффициент v_{0n} при этом равен

$$v_{0n}=(-1)^n\Delta\,. \tag{32}$$

Весовые коэффициенты функционала (28) однозначно связаны с коэффициентами функции (29) соотношениями

$$\hat{w}_{ik}=\frac{M_n^2}{c_j}\hat{v}_{\text{in}}\hat{v}_{kn}=\hat{g}_j\hat{v}_{\text{in}}\hat{v}_{kn},\ (i,k=0,1,2,\ldots,n)\,. \tag{32}$$

Теоретически исчерпывающее решение задачи управления в условиях действия изменяющихся в широком диапазоне параметрических и координатных возмущений дает идея построения систем, устойчивых при неограниченном увеличении коэффициента усиления. Требуемый результат при подобном подходе достигается в пределе при увеличении коэффициента усиления до бесконечности при использовании в качестве исполнительных элементов релейных регуляторов, работающих в скользящем режиме, что достигается устремлением к нулю весового коэффициента c. При этом справедливо выражение

$$\lim_{c\to 0} sat\left(\frac{m_n}{c}\sum_{i=0}^{n} v_{\text{in}}\eta_i\right)=sign\left(m_n\sum_{i=0}^{n} v_{\text{in}}\eta_i\right).$$

Тогда для объекта управления, динамика которого описывается системой дифференциальных уравнений возмущенного движения (26) в форме Коши, закон управления

$$U=-sign\left(m_n\sum_{i=0}^{n} v_{\text{in}}\eta_i\right) \tag{33}$$

минимизирует интегральный функционал качества

$$I=\int_0^{\infty} 2|m_n\sum_{i=0}^{n} v_{\text{in}}\eta_i|dt \tag{34}$$

гарантируя при этом в скользящем режиме экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной при ступенчатом изменении задающего воздействия $y_j^*=l(t)$ и обеспечивая замкнутой системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \eta_1 / p$. Коэффициентами алгоритма управления (24) являются коэффициенты функции Ляпунова (29).

Если математическая модель объекта управления представлена дифференциальными уравнениями возмущенного движения в форме Фробениуса (14), то управляющее воздействие

$$U=-sign\left(M_n\sum_{i=0}^{n} \hat{v}_{\text{in}}p^{i-1}\eta_1\right) \tag{35}$$

минимизирует на траекториях возмущенного движения функционал

$$I=\int_0^{\infty} 2|M_n\sum_{i=0}^{n} \hat{v}_{\text{in}}p^{i-1}\eta_1|dt\ . \tag{36}$$

Выводы. Решение задач аналитического конструирования оптимальных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и модификации принципа симметрии позволило установить однозначные связи между параметрами объекта управления, видом и весовыми коэффициентами интегральных функционалов, прямыми показателями качества процессов управления и функциями Ляпунова синтезированных замкнутых электромеханических систем. Весьма важным при этом является отсутствие необходимости решения граничных задач или матричных уравнений Риккати поскольку структура и параметры законов оптимального управления определяются в результате решения алгебраических уравнений.

Список литературы: 1. *Летов А.М.* Аналитическое конструирование регуляторов. /*А.М.Летов*//Автоматика и телемеханика. – 1960. – №4. – С. 436-441. **2.** *Летов А.М.* Аналитическое конструирование регуляторов. II. /*А.М.Летов* // Автоматика и телемеханика. – 1960. – №5. – С. 561-568. **3.** *Летов А.М.* Аналитическое конструирование регуляторов. III./*А.М.Летов*//Автоматика и телемеханика. – 1960. – 6. – С. 661-665. **4.** *Kalman R.* Contribunion to the Theory of Optimal Control/ *R.Kalman*//Bul. Soc. Mat. Meh. – 1960. – V. 5. **5.** *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели/ *П.Д.Крутько*. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

Bibliography (transliterated): 1. Letov A.M. “Analiticheskoe konstruirovanie regul’atorov”. *Avtomanika i telemekhanika* 4 (1960): 436-441. Print. **2.** Letov A.M. “Analiticheskoe konstruirovanie regul’atorov”. *Avtomanika i telemekhanika* 5 (1960): 561-568. Print. **3.** Letov A.M. “Analitichtskoe konstruirovanie regul’atorov”. *Avtomanika i telemekhanika* 6 (1960): 661-665. Print. **4.** *Kalman R.* Contribunion to the Theory of Optimal Control/ *R.Kalman*//Bul. Soc. Mat. Meh. – 1960. – V. 5. Print. **5.** Krut’ko P.D. *Obratnie zadachi dinamiki upravliaemih system:Lineinie sistemi.* Moskow: Nauka, 1987.

Поступила (received) 25.08.2015

УДК 621.548

В. І. ЩУР, асп. НУ «Львівська політехніка»

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОТОКАМИ В КОГЕНЕРАЦІЙНІЙ АВТОНОМНІЙ ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВЦІ

Вступ. Упродовж останніх років стрімко розвивається новий напрям вітроенергетики, спрямований на освоєння вітроенергоресурсу низького потенціалу. Таке завдання успішно вирішують через використання автономних вітроенергоустановок (ВЕУ) малої потужності (0,5-30 кВт) з вертикальною віссю обертання (ВВО) [1]. Задля зниження питомої вартості установки, розширення її функціональності й, у кінцевому варіанті, скорочення терміну окупності, пропонуємо гібридну ВЕУ, яка базується на принципі когенерації, – генерує та акумулює отриману від вітру механічну енергію як у вигляді електричної, так і теплової енергії [2]. До складу такої ВЕУ, крім електричного синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) та електрохімічного акумулятора, входить спеціальний тепловий генератор, який перетворює механічну енергію вітроротора (ВР) безпосередньо в теплоту, що виділяється в масиві ротора генератора за посередництвом змінного відносно цього ротора магнітного поля [3]. Величину генерованого теплового потоку можна просто змінювати, регулюючи збудження теплового генератора, а нагромаджену в його резервуарі теплоту необхідно періодично перекачувати в тепловий акумулятор – побутовий бойлер гарячої води.

Постановка завдання. Нова нетипова конфігурація запропонованої когенераційної ВЕУ з електричним і тепловим генераторами та акумуляторами енергії зумовлює необхідність розроблення відповідної системи автоматичного керування, яка гарантуватиме максимальне використання всієї доступної ВР механічної енергії вітру, забезпечуватиме дотримання встановлених пріоритетів у використанні та нагромадженні енергії різних видів, а також здійснюватиме менеджмент роботи електрохімічних акумуляторних батарей**.**

Матеріали дослідження. Система когенераційної ВЕУ з ВВО, функціональна схема якої наведена на рис. 1, складається з ВР, блока генераторів у складі електричного СГПМ і теплового генератора – електромагнітного перетворювача механічної енергії в теплову (ЕПМЕТ), електронних регуляторів – активного випрямляча напруги (АВН), для регулювання електричного навантаження СГПМ, і перетворювача постійної напруги (ППН), для регулювання струму в обмотці збудження (ОЗ) ЕПМЕТ, а також пристроїв акумулювання енергії – електричної в акумуляторній батареї (АБ) і теплової в бойлері з водою.

САК роботою ВЕУ реалізує дворівневий алгоритм керування. Для цього до САК подаємо сигнали з енкодера Е, встановленого на осі обертання блоку генераторів, та від давачів струмів ДС і температур ДТ.

На нижньому рівні здійснюється регулювання потужності електричного навантаження СГПМ і теплового потоку ЕПМЕТ за сигналами завдання від САК верхнього рівня. Обидва ці потоки (потужності) безпосередньо формують момент механічного навантаження ВР. За сигналами від Е про кут положення ротора θ та з ДС3 на вході АВН за допомогою гістерезистних регуляторів ГРС струмів фаз СГПМ і векторного керування АВН забезпечується синусоїдальність цих струмів та $\cos\varphi = 1$. Регулювання струму в ОЗ ЕПМЕТ здійснюється в замкненій системі за допомогою ДС4.

На верхнньому рівні САК формуються сигнали завдання для підсистем нижнього рівня з метою забезпечення оптимального механічного навантаження ВР, за якого від вітру зі змінною швидкістю відбирається максимальна потужність. Це можна зробити або за допомогою СГПМ з АВН, або за допомогою ЕПМЕТ з ППН.

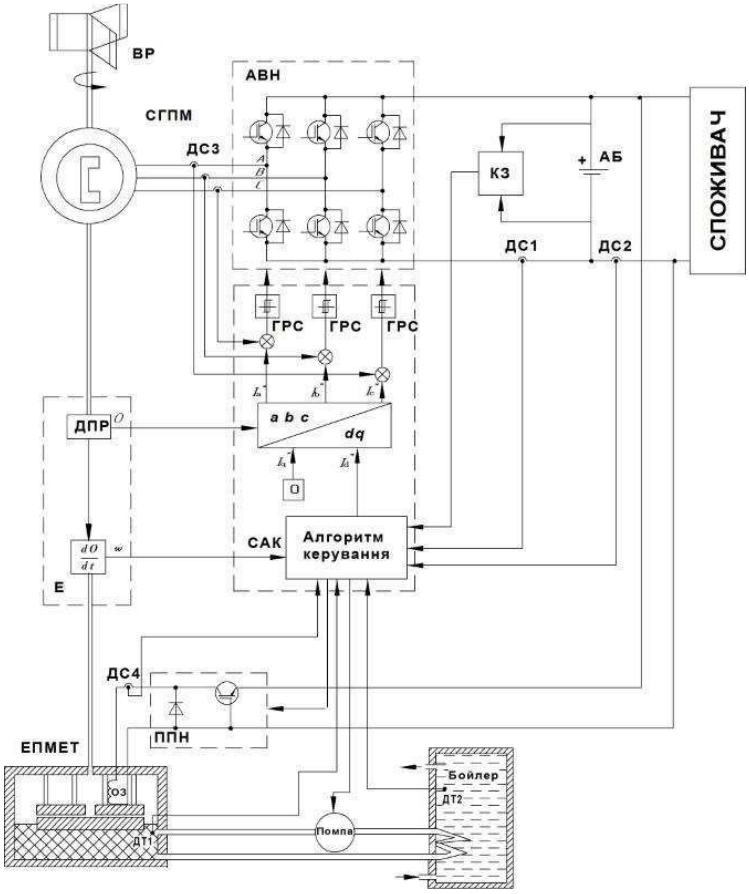


Рис. 1. Функціональна схема системи когенераційної ВЕУ з ВВО

© В.І. Щур, 2015

За паралельної роботи обох каналів генерування енергії, оптимальне регулювання навантаження ВР здійснюється ППН, оскільки ЕПМЕТ забирає на себе надлишкову механічну енергію, в той час як АВН або забезпечує необхідну потужність електроенергії споживачеві, або обмежує на максимально можливому рівні струм заряджання АБ. Для роботи САК верхнього рівня одержує сигнали від Е про кутову швидкість ВР, від давачів струмів на виході АВН – ДС1 та споживача – ДС2 та від давачів температур у резервуарі ЕПМЕТ – ДТ1 і в бойлері – ДТ2, за різницею показів яких подається сигнал на вмикання та вимкнення помпи, що перекачує теплоносій з резервуару ЕПМЕТ через бойлер.

Для керування на верхньому рівні розроблений алгоритм керування (рис. 2) потоками електричної і теплової енергії за стохастичного характеру, як для генерування, так і споживання енергії. Пріоритетним є генерування електроенергії та пряма передача її споживачеві. В залежності від потреб останнього ВЕУ може генерувати тільки електричну, тільки теплову або обидва види енергії. В усіх цих режимах забезпечується екстремальне керування й відбір максимальної потужності від вітру за змінної його швидкості. Алгоритм працює таким чином.

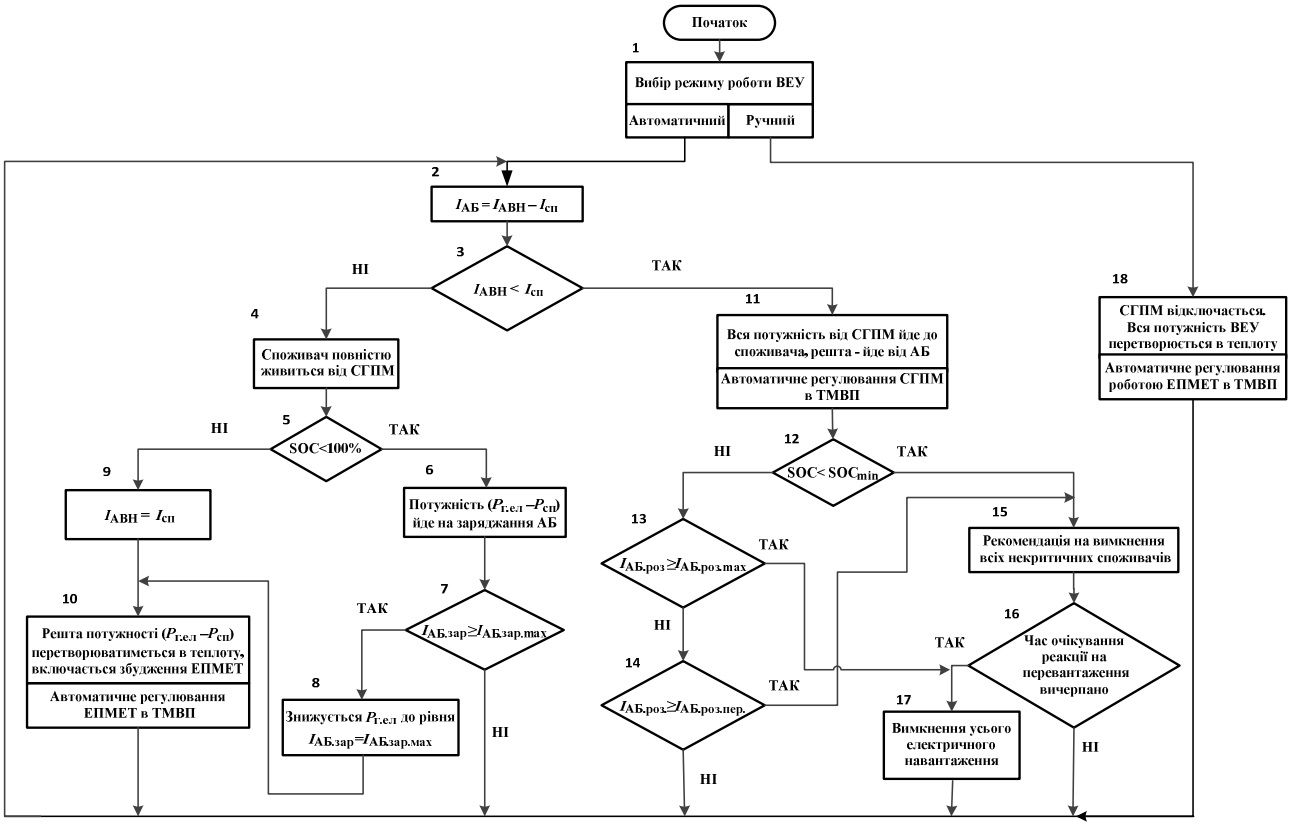


Рис. 2. Алгоритм керування енергопотоками на верхньому рівні САК

У блоці 1 здійснюється вибір режиму роботи ВЕУ: «автоматичний» чи «ручний». При «автоматичному» режимі у блоці 2 визначається струм АБ $I_{АБ}$ як різниця між струмом на виході АВН $I_{АВН}$ та струмом споживання $I_{сп}$. У блоці 3 порівнюється струм на виході ВЕУ зі струмом споживання. При умові $I_{АВН} > I_{сп}$, споживач буде повністю живитися від СГПМ (блок 4).

На АБ ставимо обмеження їхнього ступеня зарядженості (state of charge) SOC. Наприклад, для свинцево-кислотних АБ, які переважно застосовують у ВЕУ, допустимий діапазон роботи АБ перебуває в межах SOC = 50…100%. Якщо SOC < 100% (блок 5) – надлишковий струм $I_{АВН} - I_{сп}$ витрачатиметься на заряджання АБ (блок 6). Якщо зарядний струм АБ є більший за максимальний $I_{АБ.зар} \geq I_{АБ.зар.max}$ (блок 7), генерована електрична потужність $P_{г.ел}$ знижується до такого рівня, щоб $I_{АБ.зар} = I_{АБ.зар.max}$ (блок 8). Решта потужності ВР у цьому випадку братиме на себе ЕПМЕТ, який забезпечуватиме і функцію автоматичного регулювання оптимального навантаження ВЕУ – робота в точці максимального відбору потужності (ТМВП) (блок 10). Якщо АБ зарядиться повністю (SOC =100%), то генерована електрична потужність $P_{г.ел}$ знижується до такого рівня, щоб $I_{АВН} = I_{сп}$ (блок 9). При цьому струм заряджання АБ рівним нулеві, і АБ не перезаряджатиметься. Решту потужності ВР знову візьме на себе ЕПМЕТ (блок 10).

Якщо генерована електрична потужність є меншою за споживану ($I_{АВН} < I_{сп}$, блок 3), вся електрична потужність від АВН йде до споживача, а решту необхідної споживачем потужності забезпечує АБ (блок 11). При цьому автоматичне регулювання навантаження СГПМ здійснюється в ТМВП. У таких режимах роботи можливе перевантаження АБ великими струмами, а перерозряджання АБ – нижче допустимого мінімального рівня ступеня зарядженості, чому має запобігати система керування.

Якщо АБ ще не розряджена до мінімального рівня SOC > SOC_{min} (блок 12), система контролює значення розрядного струму, порівнюючи його з максимально допустимими $I_{АБ.роз.max}$ (блок 13). У разі його неперевищення розрядний струм порівнюється у блоці 14 з рівнем 10-секундного перевантаження АБ $I_{АБ.роз.пер}$ (блок 14). З перевищенням цього рівня споживачеві подають звукову та візуальну рекомендації на вимкнення некритичних споживачів (блок 15) і починається відлік заданого часу на це вимкнення (блок 16). По закінченні визначеного часу, у випадку незмінності ситуації перевантаження, система відмикає все електричне споживання (блок 17). Така ж реакція передбачена, якщо $I_{АБ.роз} \geq I_{АБ.роз.max}$ (блок 13). В усіх цих випадках подальша робота ВЕУ забезпечується за лівою частиною алгоритму (блоки 4-10): буде максимально заряджатися АБ, а після перевищення зарядним струмом допустимого рівня підключатиметься ЕПМЕТ. Робота ВЕУ завжди здійснюватиметься в ТМВП.

У «ручному» режимі роботи СГПМ відключається, вся потужність ВЕУ перетворюється в теплоту, при цьому автоматичне регулювання ЕПМЕТ здійснюється в ТМВП (блок 18).

Регулювання оптимального механічного навантаження ВР здійснюється за збуренням змінної швидкості вітру $V_в$ у бездавачевій (без давача швидкості вітру) системі. Відповідно до цього принципу [4], момент сумарного навантаження на валу ВР формується пропорційно до квадрату кутової швидкості ВР ω:

$$M_{ВР} = k_M \omega^2, \qquad (1)$$

де $k_M = 0{,}5 \rho A C_{P\max} \left(r/\lambda_{opt}\right)^3$ – сталий для конкретного ВР коефіцієнт; ρ – густина повітря; $A = \pi r^2$ – площа омивання ВР; C_{Pmax} – максимальне значення коефіцієнта використання вітроротором потужності вітру, яке досягається за оптимального значення швидкохідності ВР λ_{opt}; r – радіус ВР.

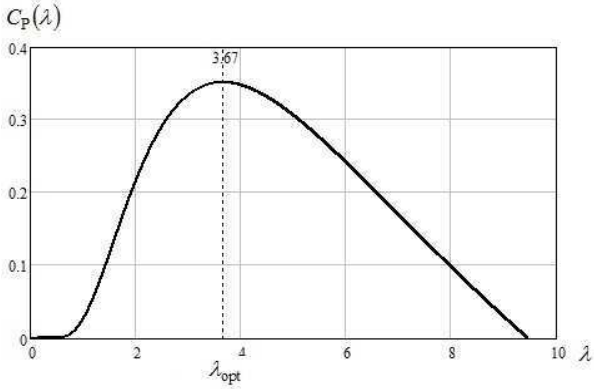


Рис. 3. Залежність коефіцієнта використання ВР потужності вітру $C_P(\lambda)$ від його швидкохідності λ

Залежність $C_p(\lambda)$ характеризує аеромеханічні властивості ВР і нелінійно залежить від його швидкохідності $\lambda = \omega r / V_в$ – відносної лінійної швидкості ВР, причому для різних вітророторів існують свої криві, одержані експериментальним шляхом, наприклад, їх дослідженнями в аеродинамічній трубі. У нашому випадку використовуємо залежність $C_P(\lambda)$ для ВР з ВВО Н-типу, яка наведена на рис. 3 і описується наступним рівнянням [5]:

$$C_P(\lambda) = 1{,}14\left(\frac{9{,}47}{\lambda} - 1\right) e^{\frac{-6}{\lambda}}. \qquad (3)$$

Показана на рис. 3 залежність $C_P(\lambda)$ забезпечує максимальне значення коефіцієнта $C_{P_{max}} = 0{,}351$ за оптимальної швидкохідності ВР $\lambda_{opt} = 3{,}675$.

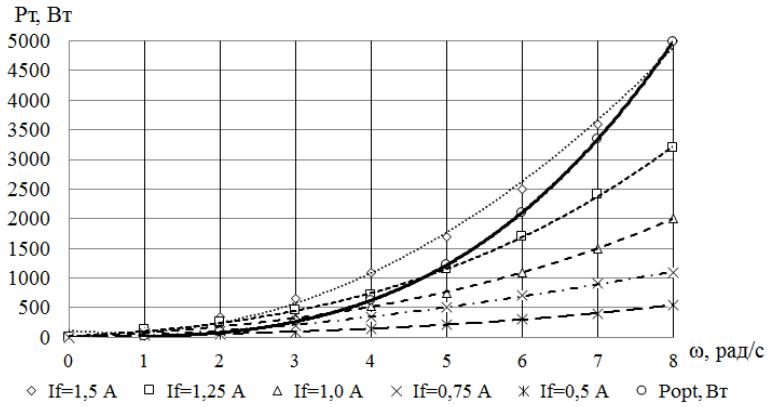


Рис. 4. Залежність генерованої теплової потужності ЕПМЕТ від його кутової швидкості при різних значеннях струму збудження If

Математичне моделювання роботи когенераційної ВЕУ. Для математичного моделювання та дослідження роботи ми взяли когенераційну ВЕУ з ВВО з номінальними значеннями електричної й теплової потужності 5 кВт, кожна з яких окремо досягається при швидкості вітру 8 м/с. Параметри ВР для такої ВЕУ, після відповідних розрахунків, такі: A = 50,25 м^2, r = 3,54 м, $n_н$ = 79,2 об/хв. За швидкості вітру 10 м/с такий ВР спроможний забезпечити сумарну вихідну потужність 10 кВт, тобто максимальне генерування енергії двома шляхами – електричним і тепловим. Таку ж потужність можна короткочасно отримати по кожному з каналів окремо за допомогою двократного перевантаження. За такого ж перевантаження можна короткочасно отримати вже 20 кВт згенерованої енергії при швидкості вітру 12,5 м/с. Ці прості розрахунки показують енергетичні переваги когенераційної ВЕУ в порівнянні з традиційною.

Параметри СГПМ номінальною потужністю 5 кВт з розміщеними на поверхні ротора постійними магнітами визначені на підставі комп'ютерного моделювання та мали такі значення: опір обмотки якоря R = 0,5 Ом;

індуктивності обмотки якоря по осях *d*-*q*, зв'язаних з ротором, $L_d = L_q = 5$ мГн; амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з потоком одного полюса $\Psi_m = 0{,}32$ Вб; кількість пар полюсів $p = 38$; сумарний момент інерції на валу (ВР з роторами СГПМ та ЕПМЕТ) $J_\Sigma = 100$ кг·м^2.

Робочі характеристики ЕПМЕТ з номінальною тепловою потужністю 5 кВт (рис. 4) сформовані аналогічно до отриманих теоретично та підтверджених експериментально в макетному взірці ЕПМЕТ потужністю 0,5 кВт.

Точка номінального режиму дослідного ЕПМЕТ вибрана такою, що відповідає потужності 5000 Вт при частоті обертання 80 об/хв. Для оптимального навантаження ВР, відповідно до виразу (1), отримаємо кубічну залежність необхідної потужності навантаження від кутової швидкості: $P_{opt} = k_M \omega^3$. Отже, з метою

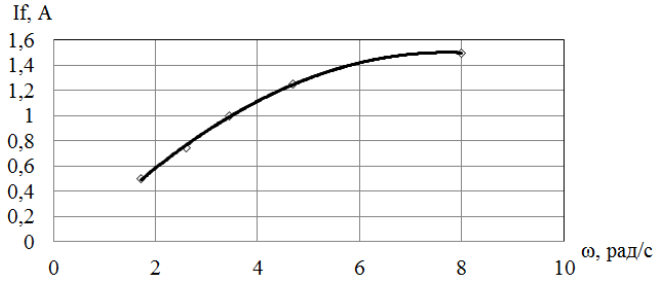


Рис. 5. Регулювальна характеристика ЕПМЕТ при його роботі в точках максимальної потужності ВР

оптимального навантаження ВР, за умови нехтування тертям в опорах, САК ЕПМЕТ повинна створювати потужність навантаження на його осі, відповідно до отриманого виразу (крива Popt на рис. 4). На перетині цієї кривої із сімейством робочих характеристик ЕПМЕТ визначені точки його регулювальної характеристики (рис. 5), використані для побудови системи автоматичного регулювання збудження ЕПМЕТ.

АБ вибрані свинцево-кислотні з робочою напругою 220 В (18 батарей, з'єднаних послідовно). Розрахована ємність батарей становить 60 А·год, що забезпечує середній одноденний запас електроенергії для приватного котеджу.

Комп'ютерна модель автономної гібридної ВЕУ. Дослідження роботи автономної когенераційної ВЕУ проводилося за допомогою комп'ютерного симулювання її роботи на турбулентному вітрі в середовищі MATLAB/Simulink. Основні підсистеми розробленої загальної комп'ютерної моделі когенераційної ВЕУ (рис. 6) є такими:

- Turbulence Wind Subsystem (підсистема турбулентного вітропотоку) [6];
- Wind Turbine Subsystem (підсистема ВР);
- Electric Subsystem (підсистема векторного керування СГПМ);
- Hit Generator Subsystem (підсистема ЕПМЕТ);
- Hit Container Subsystem (підсистема передачі теплоти до бойлера);
- Energy Flow Control Subsystem (підсистема керування ВЕУ на верхньому рівні);
- Current Consuption Subsystem (підсистема споживача електричної енергії).

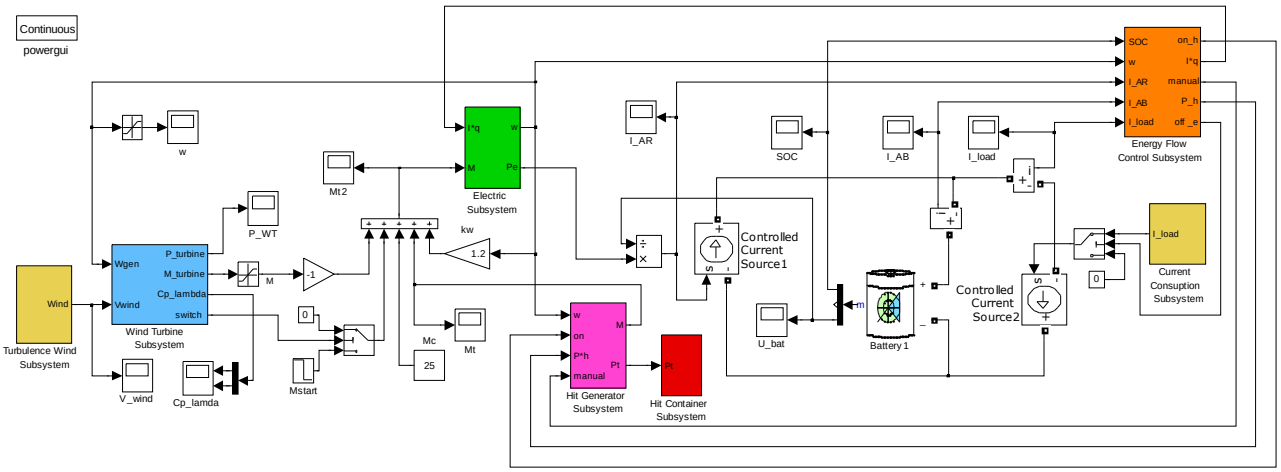


Рис. 6. Загальна комп'ютерна модель автономної когенераційної ВЕУ

Результати комп'ютерного симулювання. Для перевірки коректності роботи розробленої системи керування когенераційною ВЕУ, проведено три серії комп'ютерних досліджень роботи ВЕУ на турбулентному вітрі з моделюванням малого та великого споживання електроенергії за різних рівнів ступеня зарядженості SOC свинцево-кислотних АБ. Нижче представлені результати комп'ютерного симулювання лише для робочого діапазону зарядженості АБ. Осцилограми основних координат і показників роботи ВЕУ показані на рис. 7-12. Симулювання тривало 50 секунд.

На рис. 7 наведені осцилограми швидкості турбулентного вітру з середнім значенням 8,0 м/с і відповідної кутової швидкості ВР.

З часових залежностей струмів у ланці постійного струму з робочою напругою 220 В (рис. 8) видно, що їх сума рівна 0. Потужність споживання змінювалася кожних 11 с, причому спочатку значення струму були малі – 1 і 2 А, а потім великі – 40, 45 і 100 А. На інтервалах часу 3…5 с і 11…22 с, коли струм споживання малий, а швидкість вітру значна, струм заряджання АБ досягає встановленого допустимого значення 19 А, і тому система керування знижує його на виході АВН на цьому ж рівні (рис. 8 і 9, а). Решта потужності ВР у ці моменти часу передається до ЕПМЕТ, про що свідчить осцилограма на рис. 9,г. При великій потужності (22…44 с) струм споживання постачається як від АВН, так і від АБ. В інтервалі часу 34,5…44 с струм розряджання АБ є більшим, ніж встановлене значення 10-секундного перевантаження – 30 А, про що сигналізує сигнал логічної «1» на рис. 9,б. Проте система продовжує генерування та постачання електроенергії аж до моменту часу 44 с, коли струм споживання зростає до 100 А і перевищує встановлене допустиме миттєве значення 60 А. У цей час система відмикає електроспоживання (рис. 9,в), струм заряджання АБ обмежується на допустимому рівні 19 А, а решта навантаження передається до ЕПМЕТ (рис. 9,г).

Ступінь зарядженості АБ за час експерименту змінюється за характером, показаним на рис. 10, який відображає інтервали малого, великого та відімкненого електроспоживання.

З рис. 11 видно, що ЕПМЕТ достатньо точно відпрацьовує задану системою керування потужність теплового навантаження.

Оптимальне навантаження ВР за тестовий період, як за допомогою самого СГПМ чи самого ЕПМЕТ, так і за їхньої спільної роботи, відображають осцилограми на рис. 12. Як видно з останніх, C_P практично рівне своєму максимальному значенню 0,351, а λ коливається біля свого оптимального значення 3,675. Це свідчить про коректну роботу систем керування як на нижньому, так і на верхньому рівні в робочому діапазоні зарядженості АБ.

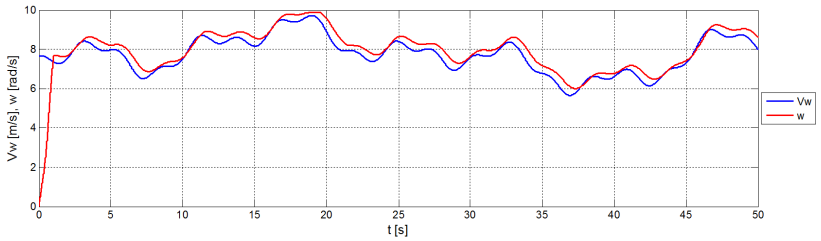


Рис. 7. Часові залежності швидкості вітру Vw і кутової швидкості ВР w

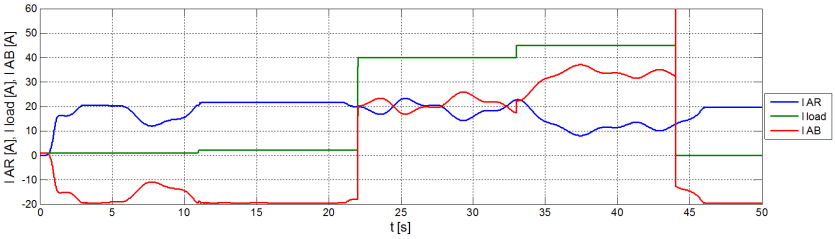


Рис. 8. Часові залежності струмів: I AR – на виході АВН, I load – споживання, I AB – акумуляторної батареї

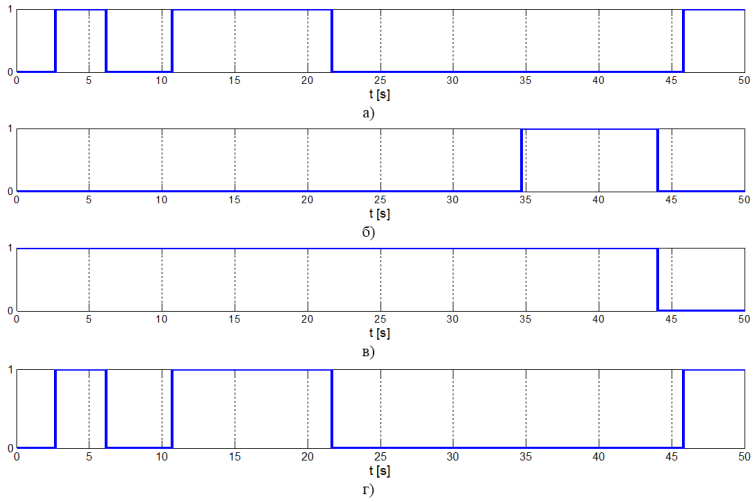


Рис. 9. Часові залежності логічних сигналів про стан системи:
а) перезаряд АБ; б) перерозряд АБ; в) ввімкнення електричного споживання; г) ввімкнення теплового навантаження

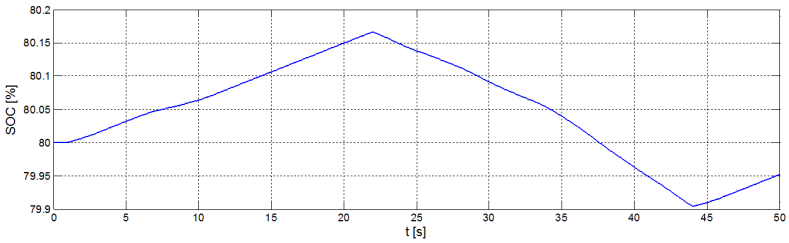


Рис. 10. Часова залежність ступеня зарядженості АБ

Висновки. Відповідно до функціональної схеми автономної когенераційної ВЕУ, розроблений алгоритм керування енергопотоками верхнього рівня, який керує оптимальним електричним навантаженням СГПМ через АВН або оптимальною потужністю теплового потоку ЕПМЕТ шляхом регулювання його струму збудження за допомогою ППН. Алгоритмом передбачені всі можливі стани системи як щодо потужності генерування та споживання електроенергії, так і щодо ступеня зарядженості АБ. Як показало комп'ютерне симулювання, в усіх можливих режимах роботи система керування забезпечує максимальний відбір потужності від вітру та максимальне використання цієї потужності для генерування електроенергії, як безпосередньо для споживання, так і для акумулювання в АБ. Алгоритм також передбачає функцію енергетичного менеджменту АБ: моніторинг ступеню їхньої зарядженості, запобігання як перерозряджання, так і перезаряджання, а також обмеження струму заряджання та дворівневий захист від надструмів розряджання. Завдяки когенерації в усіх режимах роботи вся доступна енергія вітру корисно використовується споживачем і акумулюється у вигляді електроенергії в АБ та у вигляді теплоти в бойлері.

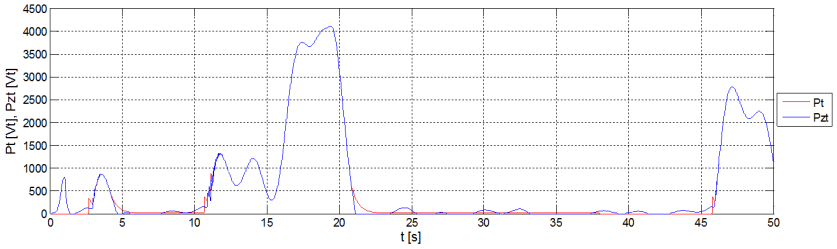


Рис. 11. Часові залежності заданої Pzt і забезпеченої ЕПМЕТ Pt теплової потужності

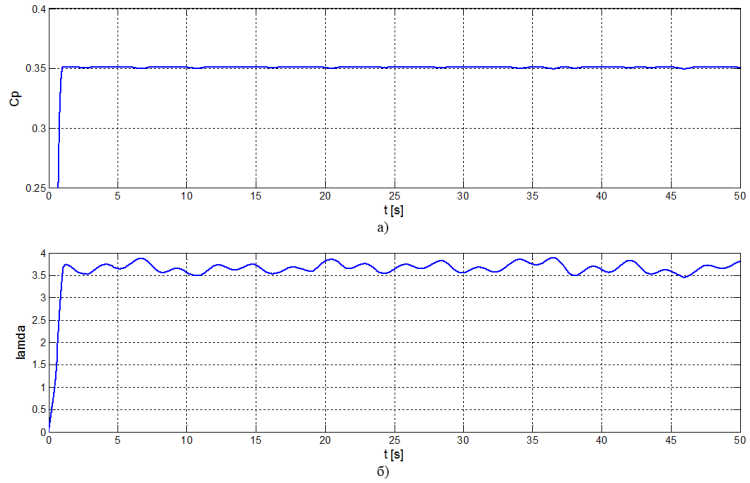


Рис. 12. Часові залежності коефіцієнта відбору ВР потужності від вітру (а) і швидкохідності ВР (б)

Список літератури: 1. *Goude A.* Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus/ *A. Goude, F. Bülow* // Renewable Energy. – 2013. – No. 60. – P. 284-292. **2.** Патент на винахід UA №105743. МПК F03D 9/02 (2006.01), H05B 6/10 (2006.01). Вітрова теплоелектростанція / *І.З. Щур, О.В. Макарчук, В.І. Щур, В.І. Клімко.* – Заявл. 15.07.2013, Опубл. 10.06.2014. – Бюл. №11. **3.** *Makarchuk O.* The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / *O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Shchur* // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2015. – R. 91, nr 1. – P. 179-182. **4.** *Morimoto S.* Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG / *S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, Y. Takeda* // IEEE Trans. on Ind. Electron. – 2005. – Vol. 41, no. 1. – P. 60-67. **5.** *Helle L.* Wind turbine systems / *L. Helle, F. Blaabjerg* // Control in Power Electronics. – Academic Press, 2002. – P. 483-510. **6.** *Щур В.І.* Математична модель турбулентного вітропотоку для комп'ютерного і фізичного моделювання роботи вітроустановок // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Матер. X Міжн. наук.-техн. конф. мол. учених і спец, 2012 р., м. Кременчук. – Кременч. націон. ун-т ім. М.Остроградського. – С. 199-200.

Bibliography (transliterated): 1. Goude, A. and Bülow, F. "Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus." *Renewable Energy.* No. 60. 2013. 284-292. Print. **2.** Shchur, I.Z., Makarchuk, O.V., Shchur, V.I. and Klymko, V.I. *Patent UA №105743. MPK F03D 9/02 (2006.01), H05B 6/10 (2006.01).* "Vitrova teploelectrostancija." *Declare.* 15.07.2013, *Publish* 10.06.2014, Bjul. №11. **3.** Makarchuk, O., Rusek, A., Shchur, I. and Shchur, V. "The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine." *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review).* R. 91. Nr 1. 2015. 179-182. Print. **4.** Morimoto, S., Nakayama, H., Sanada, M. and Takeda, Y. "Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG." *IEEE Trans. on Ind. Electron.* Vol. 41. No. 1. 2005. 60-67. Print. **5.** Helle, L. and Blaabjerg, F. "Wind turbine systems." *Control in Power Electronics. Academic Press.* 2002. 483-510. Print. **6.** Shchur, V. "Matematychna model` turbulentnoho vitropotoku dlja komp`juternoho i fizychnoho modeljuvannja roboty vitroustanovok." *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modelyuvannja ta optymizacii. Mater. X Mizhn. nauk-tekhn. konf. mol. uchenykh i spec. Kremen. nacion. university im. M. Ostrohradskoho.* 2012. 199-200. Print.

Надійшла (received) 30.06.2015

УДК 621.314

Ю. О. СЕМЕНЕНКО, аспірант, УкрДУЗТ, Харків

КОМБІНОВАНИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ПОСЛІДОВНОГО ТИПУ З ІМПУЛЬСНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЗА СТРУМОМ НАВАНТАЖЕННЯ

Вступ. Відомо, що вихідна напруга випрямної установки тягової підстанції постійного струму характеризується наявністю постійної та пульсуючої складової з гармоніками в широкому діапазоні частот. Дані гармонійні складові викликають додаткові втрати електричної енергії в тяговій мережі, погіршують електромагнітну сумісність системи тягового електропостачання з електричним рухомим складом, а також являються джерелом небезпечних та заважаючих перешкод, здатних викликати нестабільну роботу пристроїв залізничної сигналізації, централізації, автоблокування, автоматики, телемеханіки, високочастотного зв'язку та рейкових кіл [1,2]. Ця проблема суттєво ускладнюється впровадженням електричного рухомого складу з імпульсними перетворювачами та широким застосуванням модернізованих старих або введенням в експлуатацію нових магістралей з високошвидкісним рухом поїздів з асинхронним приводом. Спотворення напруги в тяговій мережі можуть бути настільки великими, що в інверторному режимі перетворювачів можуть виникнути збої комутації ключів, а робота електронної системи керування може стати нестійкою, внаслідок чого можуть відбуватися короткі замикання та інші аварійні ситуації. Особливістю негативного впливу гармонік напруги і струму в тяговій мережі є те, що вони можуть підсилювати вплив інших видів електромагнітних завад, тому дана стаття присвячена вирішенню завдання по зниженню величини пульсуючої складової напруги у вихідній напрузі тягової підстанції постійного струму.

Постановка задачі. Досвід експлуатації систем електропостачання електричного транспорту показує, що застосування пасивних детермінованих методів фільтрації має ряд суттєвих недоліків [3]. Це вимагає пошуку більш ефективних підходів до вирішення даної проблеми шляхом активних методів фільтрації змінної складової випрямленої напруги тягової підстанції постійного струму.

Матеріали досліджень. Застосування комбінованих систем фільтрації, які представляють собою з'єднання за певною схемою пасивного та активного фільтрів [4-10], суттєво підвищують ступінь фільтрації пульсацій напруги на виході випрямної установки тягової підстанції. В роботі [4] приведені результати дослідження динамічних характеристик комбінованого фільтра з активною ланкою послідовного типу неперервної дії, який встановлений на виході тягової підстанції постійного струму. Пасивна ланка його призначена для зниження амплітуд канонічних гармонійних складових вихідної напруги, а для ефективнішого придушення канонічних і неканонічних гармонійних складових використовується активна ланка фільтра. Основою такого активного фільтра є підсилювач, що формує напругу компенсації змінної складової вихідної напруги тягової підстанції постійного струму. Для підвищення коефіцієнта корисної дії системи активної фільтрації пропонується використати імпульсний спосіб формування напруги компенсації змінної складової шляхом застосування інвертора напруги на IGBT, що працює з підвищеною частотою широтно-імпульсної модуляції порядку 20 кГц. Завдяки цьому досягається висока якість формування гармонік напруги компенсації в широкому діапазоні частот. Схема комбінованого активного фільтра послідовного типу імпульсної дії, що пропонується для зниження величини пульсацій змінної складової у вихідній напрузі тягової підстанції постійного струму, представлена на рис. 1.

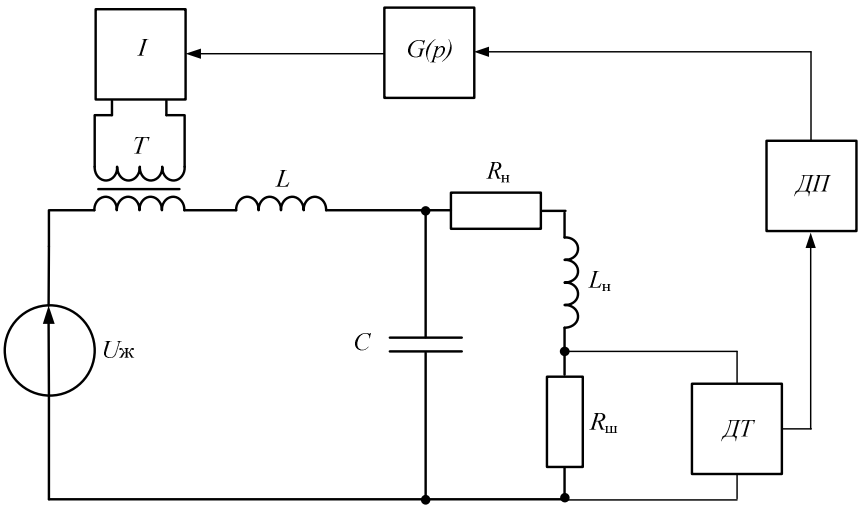


Рис. 1 Структурна схема комбінованого активного фільтра з імпульсною системою керування

© Ю.О. Семененко, 2015

Запропонований фільтр (рис. 1), як і схема комбінованого фільтра з активною ланкою неперервної дії [4], має пасивну та активну ланки. Пасивна ланка фільтра складається з дроселя *L* та конденсатора *C*, що утворюють *Г* – подібний аперіодичний *LC* – фільтр. Активна ланка складається з інвертора *I*, трансформатора *T* та системи керування. Для контролю струму навантаження, в тому числі й пульсуючої складової, використовується вимірювальний шунт $R_ш$, до якого підключений датчик струму *ДТ*. Із вихідного сигналу датчика струму датчиком пульсацій *ДП* виділяється змінна складова, яка несе інформацію про пульсації струму в активно-індуктивному навантаженні. Вихідний сигнал з датчика пульсацій передається до корегуючої ланки *G(p)*, на виході якої отримуємо сигнал компенсації. Далі цей сигнал підсилюється інвертором *I* та через трансформатор *T*, який потрібен для гальванічної розв'язки системи керування від силової частини схеми, напруга компенсації подається в протифазу з пульсуючою напругою, що діє на навантаженні.

Для аналізу динамічних властивостей комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження розглянемо його еквівалентну схему, яка наведена на рис. 2.

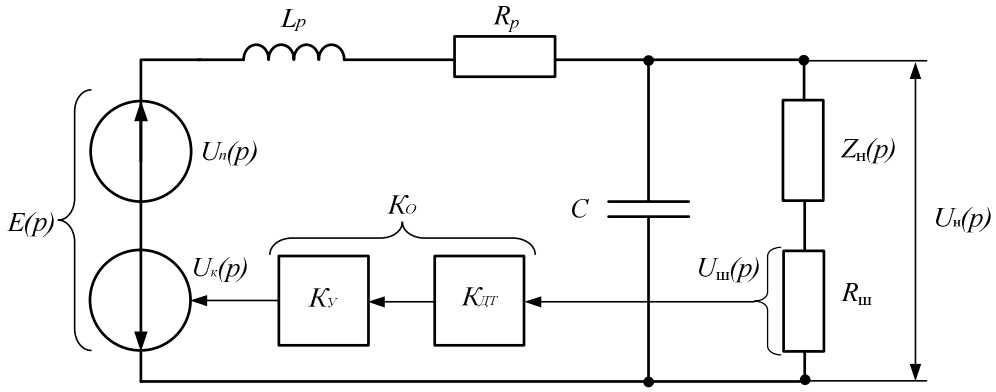


Рис. 2 Еквівалентна схема комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження

В запропонованій схемі фільтра компенсація пульсуючої складової $U_п(p)$ здійснюється внесенням в коло пасивної ланки напруги компенсації $U_к(p)$, що формується системою автоматичного регулювання. Система автоматичного регулювання зворотного зв'язку за струмом навантаження отримує сигнал напруги шунта $U_ш(p)$, який послідовно поєднаний з навантаженням $Z_н(p)$, що має комплексний характер. При цьому для спрощення аналізу активного фільтра послідовного типу тут і надалі активним опором реактора R_p можна знехтувати. Відповідно до схеми фільтра (рис. 2) пульсуюча складова напруги на навантаженні $U_н(p)$ з урахуванням активної та пасивної ланок фільтра визначається наступним виразом:

$$U_н(p) = E(p)\cdot H(p) = [U_п(p) - U_к(p)]\cdot H(p), \quad (1)$$

де $E(p)$ – електрорушійна сила; $H(p) = \dfrac{1}{LCp^2 + \dfrac{Lp}{Z_H(p)} + 1}$ – передавальна функція пасивної ланки фільтра; $U_п(p)$ – пульсуюча складова вихідної напруги тягової підстанції; $U_к(p)$ – напруга компенсації; $K_У$ – коефіцієнт передачі підсилюючого елемента, що формує напругу компенсації(в даному виконанні схеми це інвертор); $K_{ДТ}$ – коефіцієнт передачі датчика струму.

В представленій схемі (рис. 2) процес компенсації активним фільтром послідовного типу змінної складової вихідної напруги на навантажені буде еквівалентним внесенню джерела електрорушійної сили в коло дроселя пасивного *LC* – фільтра. Компенсуючий сигнал визначається властивостями кола зворотного зв'язку та визначається за наступною формулою:

$$U_к(p) = U_ш(p)\cdot K_у \cdot K_{ДТ} = U_ш(p)\cdot K_o . \quad (2)$$

де $K_o = K_у \cdot K_{ДТ}$ – контурний коефіцієнт передачі.

Далі потрібно визначити частотні властивості комбінованого активного фільтра послідовного типу. Тому для цього розглянемо схему заміщення (рис. 3) шляхом перетворення запропонованої еквівалентної схеми фільтра (рис. 2) відносно вхідного сигналу електрорушійної сили *E(p)*, прийнявши за вихідний сигнал напругу на шунті $U_ш(p)$.

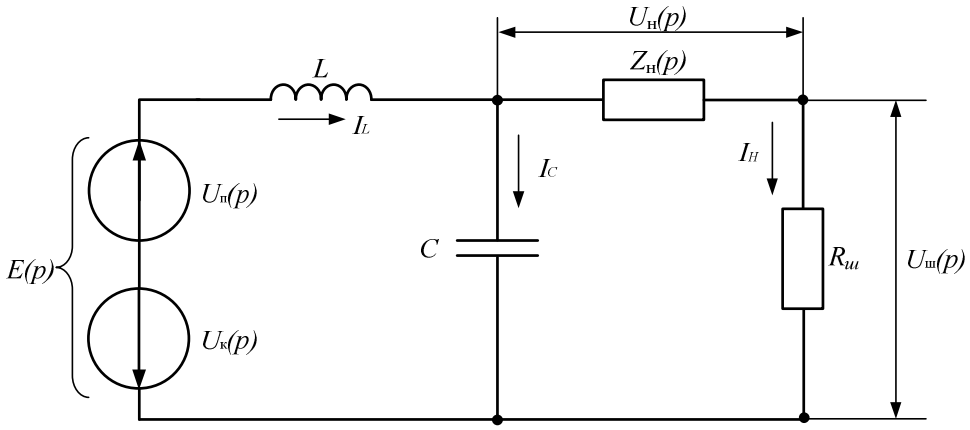


Рис. 3 Схема заміщення комбінованого активного фільтра послідовного типу

Зв'язок між сигналом електрорушійної сили $E(p)$ та напруги шунта $U_ш(p)$ отримуємо, використовуючи сигнальний граф, який зображений на рис. 4.

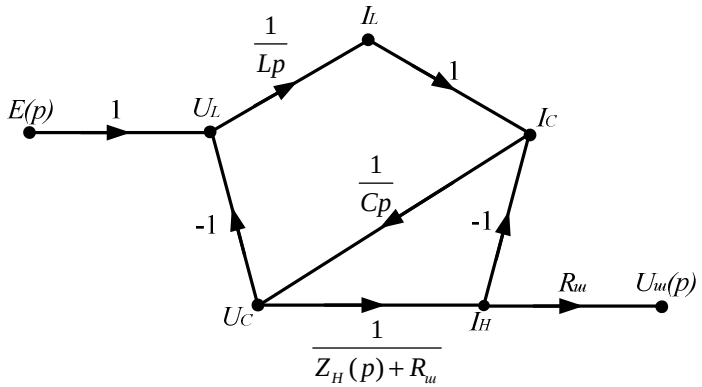


Рис. 4 Сигнальний граф, який відповідає еквівалентній схемі зображеній на рис. 2

Визначник сигнального графу рівний:

$$\Delta = 1-(L_1+L_2)\,, \tag{3}$$

де L_i – передача i-того контуру;

$$L_1 = -\frac{1}{LCp^2}\,; \tag{4}$$

$$L_2 = -\frac{1}{Cp\left[Z_H(p)+R_ш\right]}\,. \tag{5}$$

Таким чином, після підстановки (4) та (5) в (3) та проведення деяких перетворень, отримаємо вираз для визначника сигнального графу:

$$\Delta = 1+\frac{1}{LCp^2}+\frac{1}{Cp\left[Z_H(p)+R_ш\right]} = \frac{LCp^2\left[Z_H(p)+R_ш\right]+Z_H(p)+R_ш+Lp}{LCp^2\left[Z_H(p)+R_ш\right]}. \tag{6}$$

Шлях передачі сигнального графу:

$$P = \frac{R_ш}{CLp^2\cdot\left[Z_H(p)+R_ш\right]}. \tag{7}$$

Передавальна функція схеми заміщення комбінованого активного фільтра (рис. 3):

$$H(p) = \frac{R_ш CLp^2\left[Z_H(p)+R_ш\right]}{CLp^2\left[Z_H(p)+R_ш\right]\left\{CLp^2\left[Z_H(p)+R_ш\right]+Z_H(p)+R_ш+Lp\right\}} = \frac{R_ш}{\left[CLp^2+\frac{L}{Z_H(p)+R_ш}p+1\right]\left[Z_H(p)+R_ш\right]}. \tag{8}$$

Відповідно з виразів (1) та (2) отримаємо передавальну функцію запропонованого активного фільтра:

$$H(p) = \frac{U_ш}{E(p)} = \frac{U_ш}{U_п(p) - U_к(p)}, \tag{9}$$

де напруга шунта буде рівною $U_ш(p) = H(p) \cdot U_п(p) - H(p) \cdot U_к(p) = H(p) \cdot U_п(p) - U_ш(p) \cdot K_o$.

Визначаємо коефіцієнт $K_ш$, що залежить від комплексного опору навантаження $Z_н(p)$ та опору шунта $R_ш$:

$$K_ш = \frac{R_ш}{Z_н(p) + R_ш} \approx \frac{R_ш}{Z_н(p)}. \tag{10}$$

Опір навантаження в операторній та комплексних формах:

$$Z_н(\text{p}) = L_н \cdot p + R_н;\ Z_н(j\omega) = R_н + j\omega L_н. \tag{11}$$

Повний опір навантаження в скалярній формі:

$$Z_н = \sqrt{R_н^2 + \omega^2 L_н^2}. \tag{12}$$

Так як $U_ш(p)(1 + K_o) = H(p) \cdot U_п(p)$, виходячи з цього визначаємо залежність передавальної функції як відношення напруги шунта $U_ш(p)$ до пульсуючої складової вихідної напруги $U_п(p)$ тягової підстанції постійного струму:

$$W(p) = \frac{U_ш(p)}{U_п(p)} = \frac{H(p)}{1 + K_o} = \frac{K_ш}{1 + K_o} \cdot \frac{1}{LCp^2 + \dfrac{L}{Z_H(p) + R_ш} p + 1}. \tag{13}$$

Для переходу з операторної в комплексну форму запису підставляємо $p = j\omega$ у вираз (13) та отримуємо рівняння для частотних характеристик комбінованого активного фільтра:

$$W(j\omega) = \frac{K_ш}{(1 + K_o) \cdot (1 - \omega^2 LC + j\omega \dfrac{L}{Z_н + R_ш})}. \tag{14}$$

Далі отримуємо рівняння для побудови амплітудно-частотної характеристики комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження:

$$K(\omega) = \frac{K_ш}{(1 + K_o) \cdot \sqrt{(1 - \omega^2 LC)^2 + \dfrac{\omega^2 L^2}{(Z_н + R_ш)^2}}}. \tag{15}$$

За виразом (15) будуємо амплітудно-частотні характеристики комбінованого активного фільтра запропонованої схеми (рис.2).

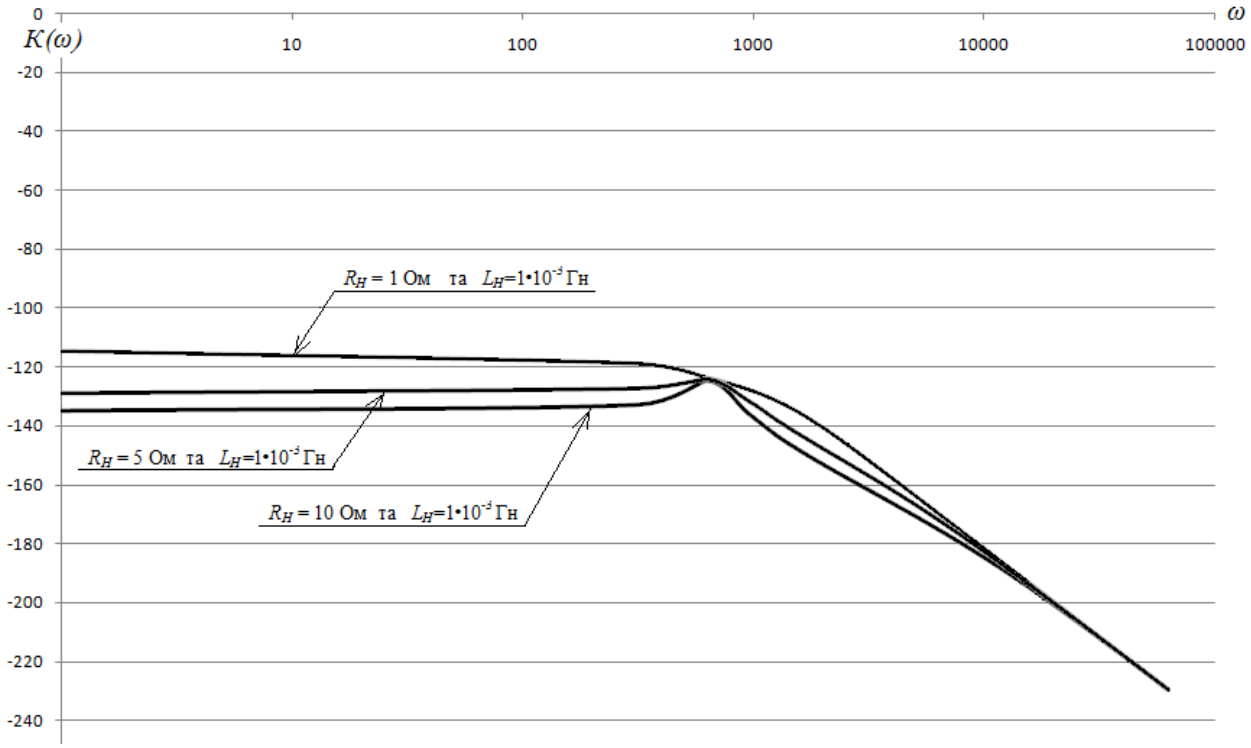


Рис. 5 Амплітудно-частотні характеристики передавальної функції запропонованого комбінованого фільтра послідовного типу при різних видах навантажень

На рис. 5 приведені графіки амплітудо-частотних характеристик, що розраховані з урахуванням рекомендованих відповідно ЦЕ-0024 «Інструкція з технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення та секціонування електрифікованих залізниць» параметрів пасивного фільтра тягової підстанції постійного струму де $L = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ Гн, $C = 300 \cdot 10^{-6}$ Ф. Індуктивність навантаження була прийнята рівною $L_H = 1 \cdot 10^{-3}$ Гн, активний опір навантаження відповідно був прийнятий рівним $R_{H1} = 1$ Ом, $R_{H2} = 5$ Ом, $R_{H3} = 10$ Ом. Опір шунта був прийнятий рівним $R_ш = 2 \cdot 10^{-5}$ Ом. Контурний коефіцієнт передачі прийнятий $K_o = 10$. Проаналізувавши отримані залежності логарифмічно-амплітудних характеристик системи автоматичного регулювання комбінованого активного фільтра при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження показав, що частотні властивості його схеми значно залежать від величини навантаження. Аналіз замкнутої структури активного фільтра заключається в корекції методом частотних характеристик заданої системи, яка забезпечує необхідні частотні властивості та критерії якості системи автоматичного регулювання. При побудові частотних характеристик комбінованого активного фільтра послідовного типу з різними видами навантажень було виявлено, що зі зменшенням струму навантаження відбувається процес покращення властивостей запропонованого фільтра з точки зору придушення гармонік.

Висновки з дослідження. Проведений аналіз динамічних властивостей комбінованого активного фільтра показав, що його застосування доцільно для покращення якості електричної енергії на виході тягової підстанції та в тяговій мережі постійного струму. Це досягається за рахунок компенсації гармонійних складових напруги та струму в широкому діапазоні частот, в тому числі й неканонічних гармонійних складових, таким чином забезпечується необхідний рівень електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з електричним рухомим складом і засобами залізничної сигналізації, централізації, автоблокування та автоматики.

Список літератури: 1. *Семененко Ю.О.* Дослідження роботи силового активного фільтра послідовного типу // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 76-ї міжнародної науково-технічної конференції 15 – 17 квітня 2014 р. – Харків. – Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп, №143, 2014 р. – С. 244. **2**. *Семененко Ю.О.* Дослідження роботи комбінованого активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 77-ї міжнародної науково-технічної конференції 21 — 23 квітня 2015 р. – Харків. – Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп, №151. – Т.1. – 2015 р. – С. 87. **3.** *Щербак Я.В.* Аналіз роботи пасивних фільтрів тягової підстанції постійного струму / *Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко* // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – №1(110) – С. 53-57. **4.** *Щербак Я.В.* Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції / *Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко* // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків. – 2013. – №142. – С. 137 – 143. **5.** Johan Lundquist, On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden, P.147. – 2001. **6.** *Dán A.* Filtering of harmonics generated by thyristor controlled AC traction systems/ *A. Dán, J. Kisvölcsey, Gy. Varjú* // In Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems, pp.404-413., Winnipeg, 6-7.- October, 1986. **7.** Stephen M. Williams, Richard G. Hoff. Discrete controlled harmonic and reactive power compensator // IEEE/ IAS 23-th Annu Mact. Pittsburgh (Pennselvania). – Oct. 1988. – P. 881 – 887. **8.** *Ludbork Allan* Harmonic filtered for notch reduction // IEEE IAS 21-th Annu. Denver. – P. 1043 – 1047. **9.** *G.T. Heydt, Y. Liu*, "Second harmonic components in power system voltages and currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521-523. **10.** *Luo A.* Design considerations for maintaining DC side voltage of hybrid active power filter with injection circuit/ A.Luo, Z.Shuai, J.Shen [et. al.] // Power Electronics, IEEE Transactions.- 2009.-vol. 24.- P. 75-84.

Bibliography (transliterated): 1. Semenenko Y.A. Study of the power active filter type. Development of consistent research and innovation in transport materials 76 th International Scientific Conference, (2014), *Coll. Science. works Ukr. state. Acad. boxcars. transp.* No. 143. – Kharkov, Ukraine, p. 244. **2.** Semenenko Y.A. The study of the combined active serial-type filter with impulse control system. Development of scientific and innovation in transport materials 77 th International Scientific Conference, (2015), *Coll. Science. works Ukr. state. Acad. boxcars. transp.* No. 151. – Vol.1. – Kharkov, Ukraine, p. 87. **3.** Shcherbak J.V. and Semenenko Y.A. Analysis of passive filters traction substation DC, (2015), *Information management systems for rail transport.* No. №1(110) – Kharkov, Ukraine, pp. 53-57. **4.** Shcherbak J.V. and Semenenko Y.A. Analysis of dynamic characteristics of traction substation combined filter, (2011), *Coll. Science. works Ukr. state. Acad. boxcars. transp.* No. 142. – Kharkov, Ukraine, pp. 137 - 143. **5.** Johan Lundquist, On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden, P.147. – 2001. **6.** Dán A., J. Kisvölcsey, and G. Varjú, (1986) Filtering of harmonics generated by thyristor controlled AC traction systems, *In Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems*, Winnipeg, 6-7 - October,. 1986, – pp. 404 – 413. **7.** Williams S. M., and Hoff R. G., (1988), Discrete controlled harmonic and reactive power compensator, *IEEE IAS 23-th Annu Mact*. Pittsburgh (Pennselvania). – Oct. 1988. – pp. 881 – 887. **8.** Ludbork Allan, (1993), Harmonic filtered for notch reduction, *IEEE IAS 21-th Annu*. Denver. – P. 1043 – 1047. **9.** Heydt G.T., and Liu Y., (2006), Second harmonic components in power system voltages and currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521 – 523. **10.** Luo A., Shuai Z., and Shen J., (2006), Design considerations for maintaining DC side voltage of hybrid active power filter with injection circuit, *Power Electronics, IEEE Transactions*, Vol. 24. – pp. 75-84.

Поступила (received) 21.08.2015

УДК 631.316

А. В. КИПЕНСКИЙ, канд. техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
Е. И. КОРОЛЬ, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ».

АНАЛИЗ НА КООРДИНАТНОЙ ПЛОСКОСТИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С РЕГУЛЯТОРАМИ ПО ВХОДНОМУ ВОЗМУЩЕНИЮ

При регулировании постоянного напряжения с помощью импульсных преобразователей (ИП) наиболее часто используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), поскольку он позволяет получить на выходе преобразователя напряжение заданного качества с меньшими затратами на подавление гармонических составляющих [1-3]. При этом связь между выходным напряжением $U_{\text{ВХ}}$ преобразователя и его входным напряжением $U_{\text{ВЫХ}}$ может быть определена через коммутационную функцию $U_{\text{ВЫХ}} = S \cdot U_{\text{ВХ}}$, где $S = 1$ на интервале проводимости коммутатора и $S = 0$, когда коммутатор разомкнут. Для обеспечения высокого качества выходного напряжения ИП целесообразно использовать методы комбинированного регулирования [1, 4]. Такое регулирование предполагает наличие двух контуров регулирования: по отклонению и по возмущению. Основными возмущениями для преобразователей постоянного напряжения являются нестабильность входного напряжения и его низкочастотные пульсации, которые не полностью подавляются входным фильтром и не компенсируются регулятором по отклонению в силу инерционности соответствующей обратной связи.

Для обеспечения инвариантности выходного напряжения ИП к изменениям входного напряжения в свое время были разработаны аналоговые системы управления вертикального типа. Поскольку среднее значение коммутационной функции в таких системах определяется выражением $S = u_{\text{У}}/U_{m\text{ОП}}$, где $u_{\text{У}}$ – напряжение управления, $U_{m\text{ОП}}$ – амплитуда опорного пилообразного напряжения, то очевидно, что для решения задачи инвариантности достаточно ввести в коммутационную функцию множитель $1/U_{\text{ВХ}}$. Первоначально для реализации обратно пропорциональной зависимости между входным напряжением и напряжением управления использовались узлы геперболической нелинейности [5, 6]. Основными недостатками этих узлов являлось то, что они не обеспечивали инвариантности коэффициента усиления отрицательной обратной связи к изменениям входного напряжения. Кроме того, с повышением скорости изменения входного напряжения увеличивалась погрешность формирования выходного сигнала узла, что было обусловлено инерционностью его выходного фильтра [7].

Устранить указанные недостатки удалось путем применения аналоговых перемножителей (делителей) сигналов [8]. Поскольку коммутационная функция определяется двумя переменными, то условия инвариантности могут быть достигнуты путем деления напряжения управления на сигнал, пропорциональный входному напряжению [9], либо – путем умножения на этот сигнал опорного пилообразного напряжения. Второй вариант был обеспечен аналогово-цифровой системой управления, где в качестве перемножителя использовался ЦАП, а опорный сигнал формировался счетчиком, суммирующим тактовые импульсы [10]. В последующем были разработаны системы, реализующие принципы прямого микропроцессорного управления и обеспечивающие инвариантность выходного напряжения ИП к изменениям его входного напряжения.

Цель настоящей работы состояла в анализе регулировочных характеристик импульсных преобразователей с широтно-импульсным методом регулирования постоянного напряжения и микропроцессорными системами импульсного управления, содержащими регуляторы по входному возмущению различных типов.

Схема ИП постоянного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления (МПСИУ) и регулятором по входному возмущению (РВВ) первого типа представлена на рис. 1. Управляющее воздействие N формируется здесь с учетом сигнала задания $Y_{\text{З}}$ и сигнала обратной связи по отклонению $Y_{\text{ОСО}}$ выходного параметра нагрузки $Z_{\text{Н}}$ в виде некоторой функции $N = F_1(Y_{\text{З}}, Y_{\text{ОСО}})$. В работе [11] было показано, что для компенсации входных возмущений достаточно входное напряжение $U_{\text{ВХ}}$ с помощью датчика напряжения (ДН) и АЦП преобразовать в цифровой код $Y_{\text{ОСВ}}$ сигнала обратной связи по возмущению, а затем использовать этот сигнал для корректировки управляющего воздействия по выражению

$$M_1 = N / Y_{OCB} . \qquad (1)$$

В схеме ИП, приведенной на рис. 1, выходной сигнал датчика входного напряжения ДН будет определяться выражением

$$U_{Д1} = k_1 U_{BX} , \qquad (2)$$

где k_1 – коэффициент передачи датчика входного напряжения, значение которого может быть однозначно определено при номинальном значении входного напряжения $U_{\text{ВХ(Н)}}$

$$k_1 = U_{Д1(Н)} / U_{BX(Н)} . \qquad (3)$$

При этом на выходе АЦП будет формироваться цифровой код числа $Y_{\text{ОСВ}}$, значение которого определим как

$$Y_{OCB} = k_{АЦП} U_{Д1} , \qquad (4)$$

где $k_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразований АЦП, который при номинальном входном напряжении будет определяться выражением

© Кипенский А.В., Король Е.И., 2015

$$k_{АЦП}=Y_{ОСВ(Н)}/U_{Д1(Н)}\,, \qquad (5)$$

а значение числа $Y_{ОСВ(Н)}$ в этом случае найдем как отношение

$$Y_{ОСВ(Н)}=N_{(Н)}/M_{1(Н)}\,. \qquad (6)$$

Поскольку при номинальном входном напряжении корректировка управляющего воздействия не требуется, т.е. можно положить $N_{(Н)} = M_{1(Н)}$, следовательно, $Y_{ОСВ(Н)} = 1$.

С учетом принципа формирования сигнала обратной связи по возмущению, управляющее воздействие после корректировки может быть представлено в виде

$$M_1=N/k_1k_{АЦП}U_{ВХ}=\frac{N}{\frac{U_{Д1(Н)}}{U_{ВХ(Н)}}\cdot\frac{1}{U_{Д1(Н)}}\cdot U_{ВХ}}=\frac{NU_{ВХ(Н)}}{U_{ВХ}} \qquad 7$$

Анализ регулировочной характеристики рассмотренного ИП, выполним графоаналитическим методом с использованием координатной плоскости, особенностью которой является то, что по всем осям квадрантов устанавливают такие же знаки, как и в первом квадранте (рис. 2). Для начала выражение (7) представим в относительных единицах

$$M_1^*=M_1/M_{1\,MAX}\,,\ N^*=N/N_{MAX}\,,$$

где $N_{MAX}=M_{1\,MAX}=2^n-1$, n – разрядность чисел N и M_1, а $U_{ВХ}^*=U_{ВХ}/U_{ВХ(Н)}$, а полученную зависимость

$$M_1^*=N^*/U_{ВХ}^*\,, \qquad (8)$$

построим в четвертом квадранте координатной плоскости при трех значениях $U^*_{ВХ}$ (рис. 2, совокупность прямых 4).

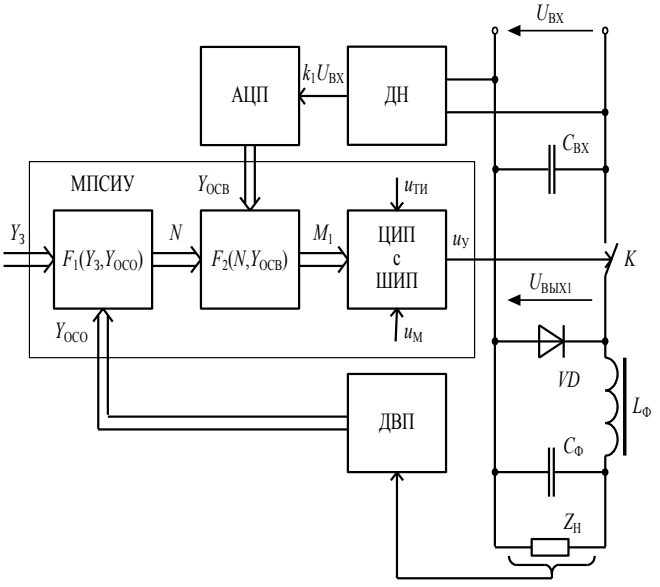


Рис. 1 Импульсный преобразователь постоянного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления и регулятором по входному возмущению первого типа

Для формирования управляющих импульсов $u_У$ в МПСИУ используется цифро-импульсный преобразователь (ЦИП) и широтно-импульсным законом преобразования (ШИП), который реализует метод регулируемого среза [12]. Длительность управляющих импульсов при этом будет определяться выражением

$$\tau_{У1}=M_1\cdot T_{ТИ1}\,, \qquad (9)$$

где $T_{ТИ1} = T_М /(2^n – 1)$ период следования тактовых импульсов, используемых для выполнения ЦИ-преобразований, $T_М$ – период модуляции выходного напряжения ИП.

С учетом (9) выражение для среднего значения коммутационной функции будет иметь вид

$$S_1=M_1\cdot T_{ТИ1}/T_M\,. \qquad (10)$$

Используя относительные единицы, выражение (10) перепишем в виде

$$S_1=M_1^* \qquad (11)$$

и представим полученную зависимость прямой 3 в третьем квадранте координатной плоскости (рис. 2).

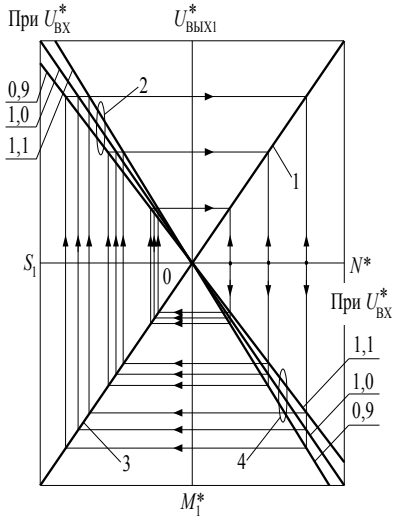


Рис. 2 Анализ регулировочных характеристик импульсного преобразователя постоянного напряжения с регулятором по входному возмущению первого типа

Зависимость выходного напряжения ИП от среднего значения коммутационной функции имеет вид

$$U_{ВЫХ1}=S_1U_{ВХ}\,. \qquad (12)$$

Во втором квадранте координатной плоскости для трех значений входного напряжения строим зависимость (12), представленную в относительных единицах

$$U^*_{ВЫХ1}=S_1U^*_{ВХ}\,, \qquad (13)$$

где $U^*_{ВЫХ1}=U_{ВЫХ1}/U_{ВЫХ\,МАХ(Н)}$; $U_{ВЫХ\,МАХ(Н)}=U_{ВХ(Н)}$.

Для получения в графическом виде регулировочной характеристики ИП с РВВ первого типа совместим в первом квадранте координатной плоскости (рис. 2) абсциссы прямой 4 и соответствующие ординаты прямых 2. Из полученного графика видно, что регулировочная характеристика ИП оказывается линейной, возрастающей и инвариантной к изменениям входного напряжения.

Аналитическое выражение для прямой 1 может быть получено из выражения для прямой 3 (см. выражение (11)), поскольку прямая в первом квадранте координатной плоскости может быть получена из прямой в третьем квадранте, если ее повернуть относительно начала координат (точка 0) на угол π. Переходные уравнения при этом будут иметь вид

$$S_1 = N^*, M_1^* = U_{ВЫХ\,1}^*, \tag{14}$$

а выражение для регулировочной характеристики ИП может быть записано как

$$U_{ВЫХ\,1}^* = N^*. \tag{15}$$

Последнее выражение можно переписать в абсолютных единицах

$$U_{ВЫХ\,1} = U_{ВЫХ\ МАХ(Н)} N / N_{МАХ} = U_{ВХ(Н)} N / N_{МАХ}. \tag{16}$$

В ИП с РВВ второго типа инвариантность регулировочной характеристики обеспечивается за счет тактирования ЦИП с ШИП импульсами, следующими с частотой, пропорциональной входному напряжению [13]. Для обеспечения такого технического решения достаточно выходной сигнал ДН подключить ко входу преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), а выход последнего – к тактовому входу ЦИП с ШИП (см. рис. 3). При этом следует установить соотношение $M_2 = N$ (или в относительных единицах $M_2^* = N^*$).

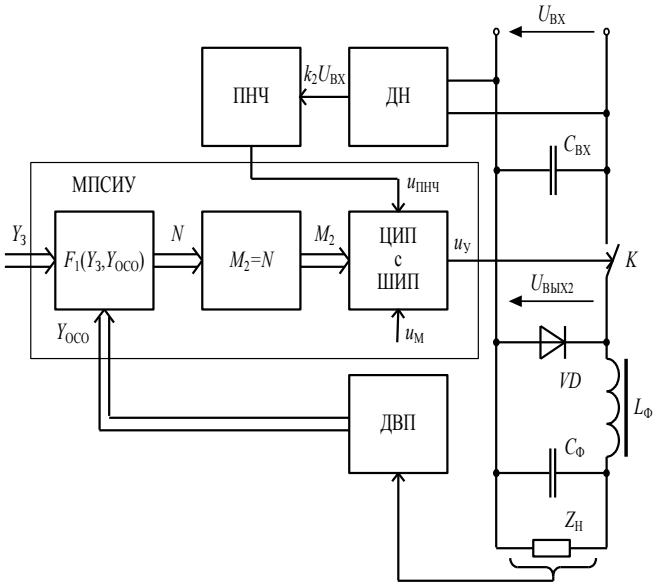


Рис. 3 Импульсный преобразователь постоянного напряжения с микропроцессорной системой импульсного управления и регулятором по входному возмущению второго типа

В приведенной схеме напряжение на выходе датчика входного напряжения будет определяться выражением

$$U_{Д2} = k_2 U_{ВХ}, \tag{17}$$

где k_2 – коэффициент передачи датчика входного напряжения, значение которого при номинальном входном напряжении $U_{ВХ(Н)}$ может быть определено как

$$k_2 = U_{Д2(Н)} / U_{ВХ(Н)}. \tag{18}$$

При этом выражение для определения частоты следования импульсов на выходе ПНЧ будет иметь вид

$$f_{ПНЧ} = k_{ПНЧ} U_{Д2}. \tag{19}$$

где $k_{ПНЧ}$ – коэффициент преобразований ПНЧ, значение которого также может быть определено при номинальном входном напряжении

$$k_{ПНЧ} = f_{ПНЧ(Н)} / U_{Д2(Н)}, \tag{20}$$

$f_{ПНЧ(Н)}$ – частота выходного сигнала ПНЧ, которая при номинальном значении входного сигнала должна определяться выражением

$$f_{ПНЧ(Н)} = (2^n - 1) / T_М. \tag{21}$$

С учетом (21) выражение (20) можно переписать в виде

$$k_{ПНЧ} = (2^n - 1) / T_М U_{Д2(Н)}. \tag{22}$$

Длительность управляющих импульсов, формируемых ЦИП с ШИП при указанном способе его тактирования (т.е. с учетом реальных отклонений входного напряжения $U_{ВХ}$), будет определяться выражением

$$\tau_{y2} = M_2 T_{ПНЧ} = \frac{M_2}{k_2 \cdot k_{ПНЧ} \cdot U_{ВХ}} \ . \tag{23}$$

Для анализа регулировочной характеристики ИП в четвертом квадранте координатной плоскости (рис. 4) построим в относительных единицах зависимость числа M_2 от N, которая имеет вид прямой линии 4.

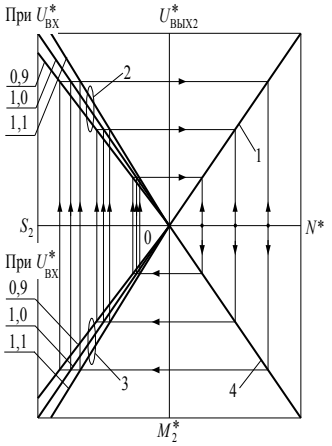


Рис. 4 Анализ регулировочных характеристик импульсного преобразователя постоянного напряжения с регулятором по входному возмущению второго типа

Зависимость среднего значения коммутационной функции от числа M_2 с учетом принципа формирования длительности управляющих импульсов (см. выражение (23)), будет иметь вид

$$S_2 = \frac{M_2}{T_M \cdot k_2 \cdot k_{ПНЧ} \cdot U_{ВХ}} \tag{24}$$

или в относительных единицах

$$S_2 = \frac{M_2^*(2^n - 1)}{T_M \cdot \frac{U_{Д2(Н)}}{U_{ВХ(Н)}} \cdot \frac{(2^n - 1)}{T_M \cdot U_{Д2(Н)}} \cdot U^*_{ВХ} \cdot U_{ВХ(Н)}} = \frac{M_2^*}{U^*_{ВХ}} \ . \tag{25}$$

Полученную зависимость представим в графическом виде в третьем квадранте координатной плоскости при трех значениях входного напряжения (см. рис. 4, совокупность прямых 3).

Далее во втором квадранте координатной плоскости при трех значениях входного напряжения строим зависимость выходного напряжения ИП от среднего значения коммутационной функции (см. рис. 4, прямые 2), которая имеет вид

$$U_{ВЫХ2} = S_2 \cdot U_{ВХ} \tag{26}$$

или в относительных единицах

$$U^*_{ВЫХ2} = S_2 \cdot U^*_{ВХ} \ . \tag{27}$$

Для получения в графическом виде регулировочной характеристики ИП с РВВ второго типа, совместим в первом квадранте координатной плоскости (рис. 4) абсциссы прямой 4 и соответствующие ординаты прямых 2. Из полученного графика видно, что регулировочная характеристика преобразователя оказывается линейной, возрастающей и инвариантной к изменениям входного напряжения.

Аналитическое выражение для прямой 1 может быть получено из выражения для прямой 4, поскольку прямая в первом квадранте координатной плоскости может быть получена из прямой в четвертом квадранте, если ее повернуть относительно оси $0N^*$ на угол π. Переходное уравнение при этом будет иметь вид

$$M^* = U^*_{ВЫХ2} \ , \tag{28}$$

а выражение для регулировочной характеристики ИП может быть записано как

$$U^*_{ВЫХ2} = N^* \tag{29}$$

или в абсолютных единицах

$$U_{ВЫХ2} = U_{ВЫХ\ МАХ(Н)} N / N_{МАХ} = U_{ВХ(Н)} N / N_{МАХ} \ . \tag{30}$$

Анализ двух различных приемов компенсации влияния возмущений со стороны входа импульсных преобразователей на их выходное напряжение показал, что оба эти приема обеспечивают инвариантность регулировочных характеристик к таким возмущениям.

С точки зрения программно-аппаратных затрат, второй тип регулятора по входному возмущению оказывается более предпочтительным.

Предварительный анализ динамических свойств импульсных преобразователей (реакция на быстрые изменения входного напряжения) также подтверждает преимущества регулятора по входному возмущению второго типа.

Список литературы: 1. Замкнутые системы преобразования электрической энергии / [под ред. В.Я. Жуйкова]. – К.: Тэхника; Братислава: Альфа, 1989. – 320 с. 2. Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М.Е. Гольц, А.Б. Гудзенко, В.М. Остреров [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с. 3. Мкртчян Ж.А. Основы построения устройств электропитания ЭВМ / Ж.А. Мкртчян. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с. 4. Источники вторичного электропитания / [под. ред. Ю.И. Конева]. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с. 5. А.с. 957190 СССР, МКИ 3 G 05 F 1/56. Способ импульсной стабилизации напряжения постоянного тока / Ю.П. Гончаров, С.Н. Иванов, Н.И. Лазарев [и др.]. – Опубл. 7.09.82. Бюл. № 3. 6. Иванов С.Н. Узел гиперболической нелинейности импульсного стабилизатора / С.Н. Иванов, А.А. Пономаренко, Г.И. Онищенко // Вестник Харьк. политехн. ин-та, серия «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: «Вища школа», 1988. – № 255. – Вып. 13. – С. 86–89. 7. Определение частоты модуляции в узле параметрической компенсации импульсного стабилизатора напряжения / Ю.П. Гончаров, С.Н. Иванов, П.В. Натаров [и др.]. // Вестник Харьк. политехн. ин-та, серия «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: «Вища школа», 1982. – № 191. – Вып. 7. – С. 51–53. 8. Система управления источником электропитания, работающим по методу широтно-импульсной модуляции / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, В.А. Шеенко [и др.]. // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тез. докл. Третьего Всесоюз. науч.-техн. совещания. – Таллин: АН ЭССР, 1986. – Ч. 3. – С. 98–99. 9. А.с. 1377836 СССР, МКИ 4 G 05 F 1/56. Способ управления преобразователем постоянного напряжения в постоянное / Ю.П. Гончаров, Н.А. Тимченко, А.В. Кипенский [и др.]. – Опубл. 29.02.88. Бюл. № 8. 10. Кипенский А.В. Широтно-импульсный преобразователь с аналогово-цифровым регулятором по входному возмщению / А.В. Кипенский // Вестник Харьк. политехн. ин-та, серия «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: ХПИ, 1992. – № 5. – Вып. 17. – С. 72–76. 11. Долбня В.Т. Использование графоаналитического метода для синтеза на координатной плоскости регулировочных характеристик полупроводниковых преобразователей электроэнергии / В.Т. Долбня, А.В. Кипенский, Н.И. Кубышкина // Электротехника. – М., 2004. – № 6. – С. 45–49. 12. Кипенский А.В. Цифро-импульсные преобразователи с широтно-импульсным законом преобразования / А.В. Кипенский, А.А. Лашин // Вестник Харьк. гос. политехн. ун-та. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 32. – С. 29–38. 13. Патент 1742964 РФ, МКИ 5 НО2 М 7/12. Способ управления полупроводниковым преобразователем постоянного напряжения / А.В. Кипенский, А.В. Кипенская. – Опубл. 23.06.92. Бюл. № 23.

Bibliography (transliterated): 1. Zamknutye sistemy preobrazovanija jelektricheskoj jenergii / [pod red. V.Ja. Zhujkova]. – K.: Tjehnika; Bratislava: Al'fa, 1989. – 320 p. 2. Bystrodejstvujushhie jelektroprivody postojannogo toka s shirotno-impul'snymi preobrazovateljami / M.E. Gol'c, A.B. Gudzenko, V.M. Ostrerov [i dr.]. – Moscow.: Jenergoatomizdat, 1986. – 184 p. 3. Mkrtchjan Zh.A. Osnovy postroenija ustrojstv jelektropitanija JeVM / Zh.A. Mkrtchjan. – Moscow: Radio i svjaz', 1990. – 208 p. 4. Istochniki vtorichnogo jelektropitanija / [pod. red. Ju.I. Koneva]. – Moscow: Radio i svjaz', 1983. – 280 p. 5. A.s. 957190 SSSR, MKI 3 G 05 F 1/56. Sposob impul'snoj stabilizacii naprjazhenija postojannogo toka / Ju.P. Goncharov, S.N. Ivanov, N.I. Lazarev [i dr.]. – Opubl. 7.09.82. Bjul № 3. 6. Ivanov S.N. Uzel giperbolicheskoj nelinejnosti impul'snogo stabilizatora / S.N. Ivanov, A.A. Ponomarenko, G.I. Onishhenko // Vestnik Khark. politehn. in-ta, serija «Jelektromashinostroenie i avtomatizacija promyshlennyh predprijatij». – Kharkiv: «Vishha shkola», 1988. – № 255. – Issue 13. – P. 86–89. 7. Opredelenie chastoty moduljacii v uzle parametricheskoj kompensacii impul'snogo stabilizatora naprjazhenija / Ju.P. Goncharov, S.N. Ivanov, P.V. Natarov [i dr.]. // Vestnik Khark. politehn. in-ta, serija «Jelektromashinostroenie i avtomatizacija promyshlennyh predprijatij». – Kharkiv: «Vishha shkola», 1982. – № 191. – Issue 7. – P. 51–53. 8. Sistema upravlenija istochnikom jelektropitanija, rabotajushhim po metodu shirotno-impul'snoj moduljacii / E.I. Sokol, A.V. Kipenskij, V.A. Sheenko [i dr.]. // Problemy jelektromagnitnoj sovmestimosti silovyh poluprovodnikovyh preobrazovatelej: Tez. dokl. Tret'ego Vsesojuz. nauch.-tehn. soveshhanija. – Tallin: AN JeSSR, 1986. – Part 3. – P. 98–99. 9. A.s. 1377836 SSSR, MKI 4 G 05 F 1/56. Sposob upravlenija preobrazovatelem postojannogo naprjazhenija v postojannoe / Ju.P. Goncharov, N.A. Timchenko, A.V. Kipenskij [i dr.]. – Opubl. 29.02.88. Bjul. № 8. 10. Kipenskij A.V. Shirotno-impul'snyj preobrazovatel' s analogovo-cifrovym reguljatorom po vhodnomu vozmcshheniju / A.V. Kipenskij // Vestnik Khark. politehn. in-ta, serija «Jelektromashinostroenie i avtomatizacija promyshlennyh predprijatij». – Kharkiv: HPI, 1992. – № 5. – Issue. 17. – P. 72–76. 11. Dolbnja V.T. Ispol'zovanie grafoanaliticheskogo metoda dlja sinteza na koordinatnoj ploskosti regulirovochnyh harakteristik poluprovodnikovyh preobrazovatelej jelektrojenergii / V.T. Dolbnja, A.V. Kipenskij, N.I. Kubyshkina // Jelektrotehnika. – Moscow, 2004. – № 6. – P. 45–49. 12. Kipenskij A.V. Cifro-impul'snye preobrazovateli s shirotno-impul'snym zakonom preobrazovanija / A.V. Kipenskij, A.A. Lashin // Vestnik Khark. gos. politehn. un-ta. – Kharkiv: HGPU, 1999. – Issue. 32. – P. 29–38. 13. Patent 1742964 RF, MKI 5 NO2 M 7/12. Sposob upravlenija poluprovodnikovym preobrazovatelem postojannogo naprjazhenija / A.V. Kipenskij, A.V. Kipenskaja. – Opubl. 23.06.92. Bjul. № 23.

Поступила (received) 24.08.2015

УДК. 621.314.

А. А. ПЛАХТИЙ, аспирант, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТОЙ МОДУЛЦИИ

Введение. Активные трехфазные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности обладают рядом преимуществ по сравнению диодными и тиристорными выпрямителями, они позволяют реализовать коэффициент мощности близкий к единице, форму входных фазных токов близкую к синусоиде, а также двунаправленную передачу энергии. В связи с этим данный тип преобразователей обретает все больший интерес.

Постановка проблемы. Наиболее распространенными являются системы управления активными трехфазными выпрямителями основанные на гистерезисной модуляции [1, 2]. Достоинством данного типа модуляции является простота, возможность реализации коэффициента мощности близкого к единице (в установившемся режиме не менее 0,99), реализация режимов выпрямления и рекуперации. Однако он же имеет существенный недостаток, а именно переменную частоту модуляции, достигающую десятков кГц. Высокие частоты коммутации ключей обуславливают ограничение применения элементной базы IGBT при реализации преобразователей мощностей порядка нескольких МВт. Кроме этого повышенные частоты коммутации вызывают увеличение динамических потерь в IGBT ключах. Актуальным является вопрос реализации и исследования АВН с системой управления с постоянной частотой модуляции.

Целью данной работы является исследование энергетических характеристик активных трехфазных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности при реализации системы автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией.

Материалы исследований. Существуют различные топологии активных трехфазных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности. Среди них следует отметить активный выпрямитель напряжения, активный выпрямитель тока и Виена-выпрямитель [3]. Активный выпрямитель напряжения (далее АВН) в сравнении с другими топологиями обладает следующими преимуществами: данная схема обеспечивает двунаправленную передачу энергии и предъявляет меньшие нагрузочные пребывания к IGBT ключам. Схема АВН представлена на рисунке 1. Схема состоит из шести силовых IGBT ключей, выходного конденсатора и трех входных дросселей.

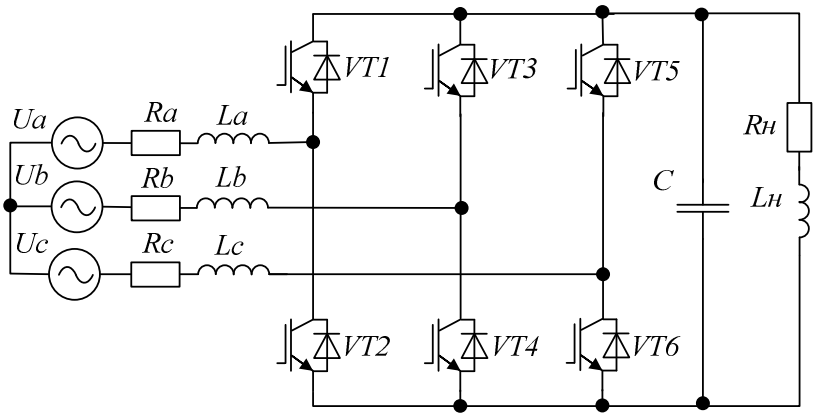


Рис. 1. Схема активного трехфазного выпрямителя

Система автоматического управления АВН. Не менее важной составляющей преобразователя является его система автоматического управления. В общем случае, система автоматического управления АВН состоит из следующих составляющих: измерителей входных фазных токов и напряжений, измерителей выходного напряжения, измерителя выходного тока (для регулирования процесса рекуперации), регулятор выходного напряжения, блок модуляции. Так же в системе управления может быть реализован блок преобразования систем координат abc-αβ0, abc-pqr, abc-dqo для применения теорий мгновенных мощностей, а также реализации прогнозирующего управления [4].

В существующих системах управления АВН наиболее часто применяемой является гистерезисная модуляция. Система управления с гистерезисным модулятором приведена на рисунке 2. В гистерезисной системе управления регулирование выходного напряжения осуществляется путем сравнения мгновенных значения линейных напряжений и масштабированных значений фазных токов и подачи сигнала рассогласования на гистерезисный модулятор.

© А. А. Плахтий, 2015

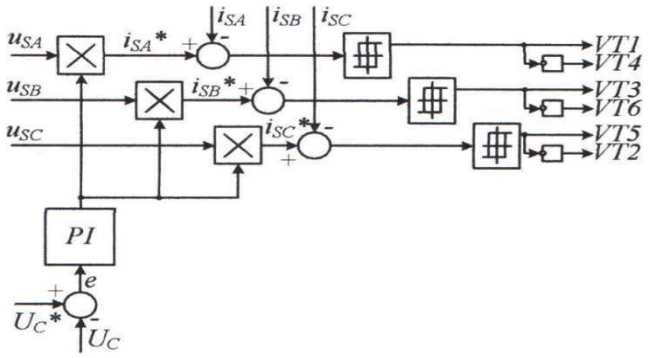


Рис.2 Система управления с гистерезисным модулятором

Входные фазные токи АВН повторяют форму опорного сигнала, полученного из сигналов фазных напряжений, но с амплитудой необходимой для поддержания заданного уровня выходного напряжения. Выходным сигналом регулятора выходного напряжения является ξ, который формирует амплитуду входного фазного тока, от которой зависит амплитуда выходного напряжения.

Существенным недостатком гистерезисной модуляции является переменная частоту коммутации ключей. Это обуславливает максимальные частоты коммутации ключей порядка нескольких десятков кГц, что налагает ограничение на применение элементной базы IGBT при реализации мощностей порядка нескольких МВт. Кроме этого повышенные частоты коммутации вызывают увеличение динамических потерь в IGBT ключах. Исходя из частотных характеристик существующей базы IGBT транзисторов, для АВН тяговых подстанции с мощностью до десятка МВА предпочтительна реализация частот коммутации порядка 1-4 кГц.

Автором предложена система автоматического управления активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности с широтно-импульсной модуляцией. В системе управления сигнал рассогласования масштабированных входных фазных токов и напряжений Δi_a подается на апериодическое звено первого порядка, синусоидальных выходной сигнал которого идет на двустороннюю ШИМ. При этом наличие апериодического звена обязательно, так как без него частота коммутации ключей будет выше частоты модуляции. Предложенная система управления с двусторонней широтно-импульсной модуляцией приведена на рисунке 3.

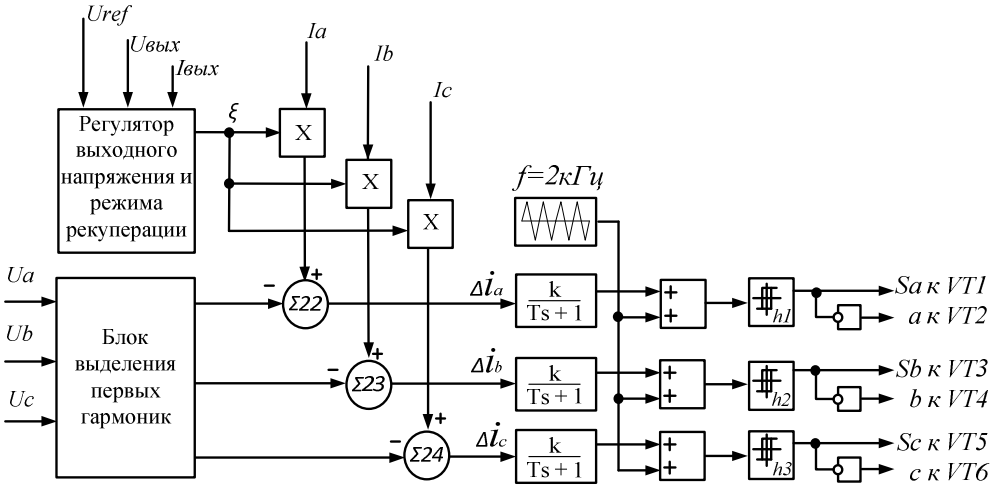


Рис. 3. Система автоматического управления трехуровневого активного выпрямителя

где: $U_{вых}$ – выходное напряжение активного выпрямителя; $I_{вых}$ – выходной ток активного выпрямителя U_{ref} – уровень задания выходного напряжения активного выпрямителя; U_{abc} – мгновенные значения фазных напряжений; I_{abc} – мгновенные значения фазных токов АВ; S_{abc} – сигналы управления ключей;

Проектирование регулятора выходного напряжения возможно исходя из регулировочных характеристик и динамических свойств преобразователя. Для предложенной системы управления была получена регулировочная характеристика - зависимость выходного напряжения от регулировочного коэффициента ξ, рисунок 4. Регулировочная характеристика приведена в двух квадрантах работы преобразователя: выпрямления и рекуперации. Режим рекуперации реализуется при превышении выходного напряжения выше заданного уровня и смене направления выходного тока, при этом регулятор выдает отрицательное ξ. При этом токи будут сдвинуты относительно напряжения на 180°, а энергия будет передаваться из звена постоянного тока в трехфазную сеть.

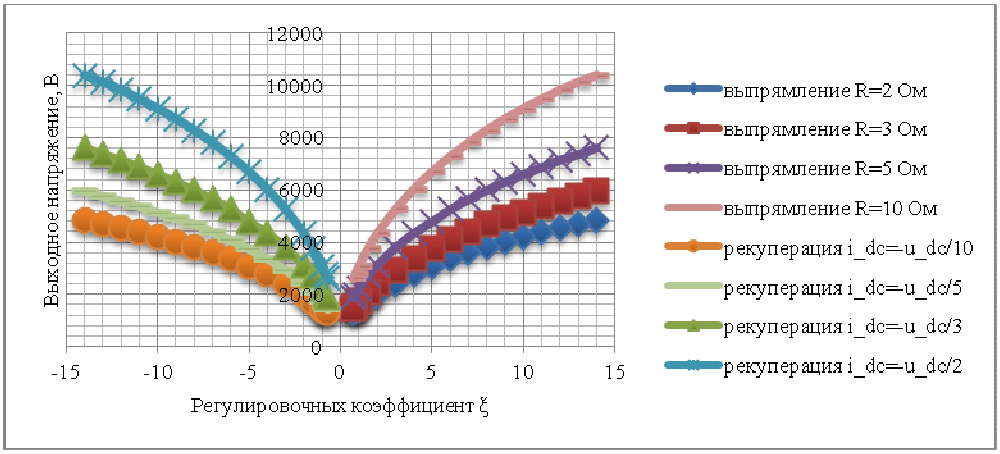


Рис. 4 Регулировочные характеристики АВН в режимах выпрямления и рекуперации

Как видно из рисунка 4, регулировочная характеристика АВН $U_{вых}=f(\xi)$ имеет явно выраженный нелинейный характер при изменении тока нагрузки. В связи с этим для работы в двух квадранта наиболее целесообразно синтезировать адаптивный ПИД регулятор с обратной связью по выходному напряжению и току. Синтез регулятора и анализ его устойчивости является достаточно обширный вопросом, которому будет посвящена отдельная статья.

Имитационная Matlab-модель активного трехфазного выпрямителя. Для подтверждения преимуществ предложенной системы управления в пакете Matlab r2011 была создана иммитационная модель активного выпрямителя с двумя типами модуляторов: ШИМ и гистерезисным модулятором. Модель представлена на рисунке 5. Параметры иммитационной модели приведены в таблице 1.

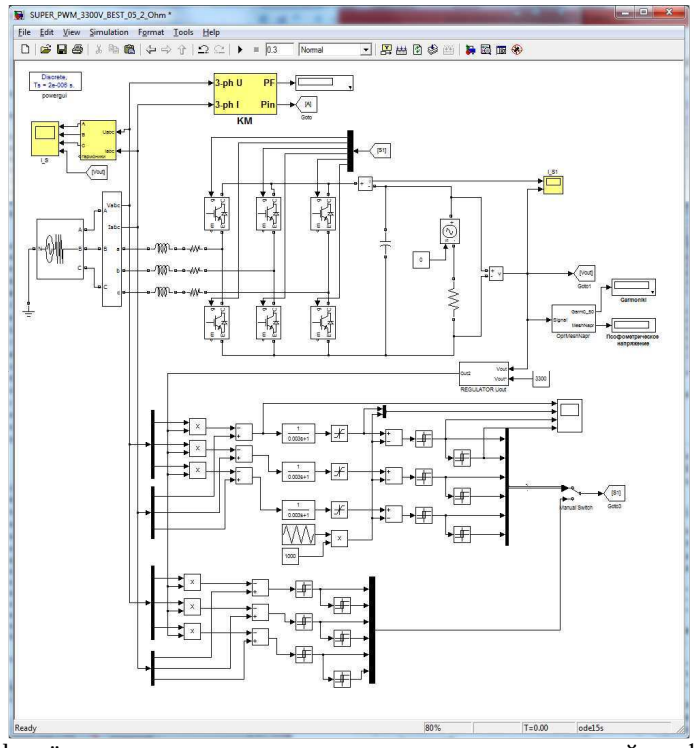


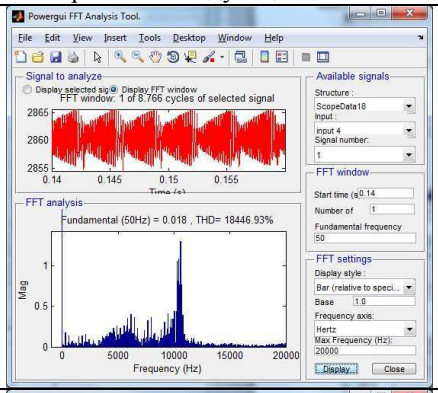
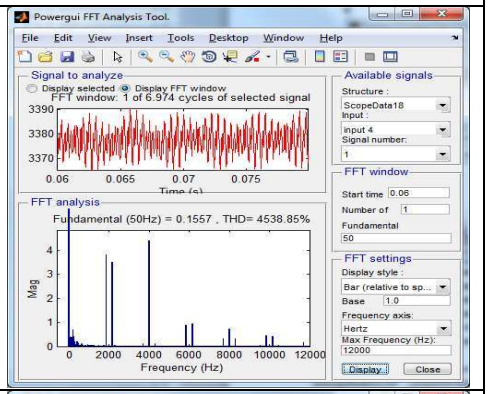
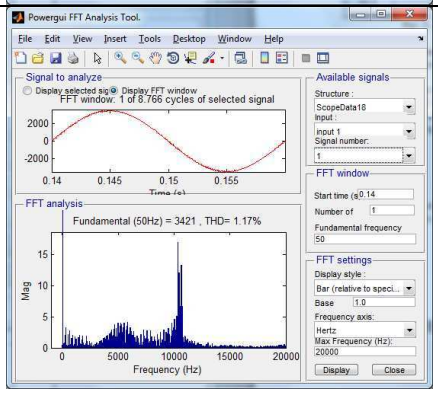
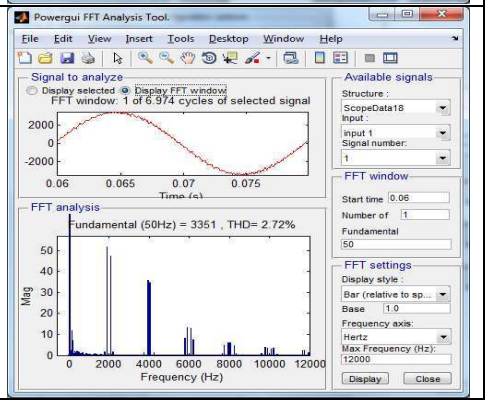
Рис. 5. Модель Matlab трёхуровневого активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности

Таблица 1 - Параметры имитационной Matlab-модели АВН

Параметр	Значение параметра
Межфазное напряжение трехфазной сети	1400В
Индуктивность входного дросселя	0,6 мГн
Активное сопротивление входного дросселя	0,5 Ом
Выходная емкость	9 мФ
Внутреннее сопротивление IGBT	2 мОм
Сопротивление нагрузки	2÷14 Ом
Частота модуляции ШИМ, кГц	2

В ходе моделирования были получены энергетические характеристики преобразователя при работе с различными типами модуляции: коэффициент мощности, коэффициент гармонических искажений фазного тока (THD), коэффициент пульсаций выходного напряжения, уровень псофометрического напряжения. Основные результаты Фурье-анализа фазных токов и выходного напряжения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты Фурье-анализа фазных токов и выходного напряжения выполненные в Matlab.

Параметр	Гистерезисная модуляция	ШИМ
Фурье-анализ выходного напряжения		
Фурье-анализ фазного тока выпрямителя		

Как видно таблицы 2 спектры гармоник фазного тока и выходного напряжения, полученные при гистерезисной модуляции и ШИМ, различны. Для ШИМ характерны гармоники кратные частоте модуляции, в то время как для гистерезисной модуляции характерен более широкий спектр.

Анализ энергетических характеристик. Сравнение качества реализуемой электроэнергии при работе с гистерезисной модуляцией и ШИМ проводилась по следующим параметрам: коэффициент мощности, коэффициент гармонических искажений, коэффициента пульсации, уровень псофометрического напряжения и КПД.

Коэффициент мощности с учетом наличия в форме фазного напряжения и тока высших гармоник коэффициент мощности может быть рассчитан согласно формуле 1.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cdot \frac{U_{1rms}}{U_{rms}} \cdot \cos(\varphi) \tag{1}$$

Уровень наличия высших гармоник в форме фазного тока часто выражают через коэффициент гармонических искажений ($K_г$ или THD) — величину, выражающую степень нелинейных искажений в сигнале тока и равную отношению среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник сигнала, кроме первой, к первой гармонике тока при воздействии на вход устройства синусоидального сигнала. Коэффициент гармонических искажений может быть рассчитан по формуле 2.

$$K_г = THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \cdots}}{I_1} \tag{2}$$

Коэффициент пульсаций выходного напряжения равен отношению среднеквадратического значения суммы высших гармоник выходного напряжения и значения постоянной составляющей. Коэффициент пульсаций может быть рассчитан по формуле 3.

$$K_{пульс}=\frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2+V_4^2+V_5^2+V_6^2+....}}{V_{dc}} \quad (3)$$

Уровень псофометрического (мешающего) напряжения является интегральным показателем, который характеризирует уровень наличия высших гармоник в выходном напряжении выпрямительной установки, которые влияют на близлежащие линии связи. Уровень псофометрического напряжения может быть рассчитан согласно формуле 4:

$$U_{мешающее}=\sqrt{(V_n\cdot K_n)^2} \quad (4)$$

При расчете КПД учитывались следующие потери в преобразователе: потери в активном сопротивлении входных дросселей, потери в IGBT ключах, потери в эквивалентном последовательном сопротивлении выходного конденсатора. Расчет КПД выполнен по формуле 5.

$$КПД=\frac{P_{вых}}{P_{вх}}=\frac{P_{вх}-P_{потерь}}{P_{вх}} \quad (5)$$

Сравнение энергетических характеристик АВН при реализации в системе управления гистерезисной и широтно-импульсной модуляции приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Энергетические характеристики АВН при работе с гистерезисной и широтно-импульсной модуляцией

Параметр	Гистерезисная модуляция	Широтно-импульсная модуляция
Коэффициент мощности, %	99,99	99,83
Коэффициент гармонических искажений фазного тока, (THD), %	1,17	2,72
Амплитуда пульсации выходного напряжения, В	14,21	23,36
Коэффициент пульсаций выходного напряжения, %	0,116	0,209
Уровень псофометрического напряжения, В	2,15	3,93
КПД, %	93,45	95,62

Выводы: Реализация ШИМ в АВН по сравнению гистерезисной модуляцией имеет ряд преимуществ: снижение частот коммутации ключей, что обуславливает снижение динамических потерь в IGBT и как следствие повышение КПД активного выпрямителя и расширение диапазона реализуемых мощностей. В программе Matlab была разработана имитационная модель активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности с ШИМ. Результаты имитационного моделирования показали, что ШИМ реализует сравнительно худшее, но, тем не менее, вполне удовлетворительное качество выходного напряжения и входных фазных токов, однако позволяет снизить частоту коммутации и повысить КПД.

Список литературы: **1.** Овчинников Д.А., Кастров М.Ю., Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности [Текст] / Практическая силовая электроника. 2002. вып. 6. с. 12–39. **2.** Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Част. 2. – 2011. С.75 – 82. **3.** J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, and P. Lezana, "PWM regenerative rectifiers: state of the art," , [Текст], IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 52, pp. 5-22, 2005. **4.** F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, “A new approach to harmonic compensation in power system—A combines system of shunt passive and series active filters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 26, no. 6, pp. 983–990, Dec. 1990.

Bibliography (transliterated): 1. Ovchinikov, D.A., Kastrov M. Yu. (2002), Tryehfazniy vipryamitel’ s korrektsiey koeffitsienta moshchnosti, Practical Power Electronic, , No. 6, pp.12-39. **2.** G.G. Zhemerov, O.I. Koval'chuk. Avtonomnyj vypryamitel' - istochnik napryazheniya s gisterezisnoj sistemoj upravleniya // Tehnɔchna elektrodinamɔka. Tem. vip. Silova elektronɔka ta energoefektivnist'. Chast. 2. - 2011. S. 75-82. **3.** J. R. Rodríguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, and P. Lezana, "PWM regenerative rectifiers: state of the art," , [Текст], IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 52, pp. 5-22, 2005. **4.** F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, “A new approach to harmonic compensation in power system—A combines system of shunt passive and series active filters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 26, no. 6, pp. 983–990, Dec. 1990.

Поступила (received) 25.08.2015

УДК 621.314.58

С. Л. ЛАМАНОВ, мол. науков. співр. Інститут електродинаміки НАН України, Київ;
Ю. В. ПЕРЕТЯТКО, канд. техн. наук, доц. НТУУ «Київський політехнічний інститут»;
Р. В. БЄЛЯНІН, начальник виробництва ПАТ «Завод «Південкабель», Харків.

ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО МАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ В ІНДУКЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ПОСЛІДОВНИМ РЕЗОНАНСНИМ ОДНОКОМІРКОВИМ ІНВЕРТОРОМ

Вступ. У більшості сучасних установок індукційного нагрівання (УІН) первинних і вторинних металів використовують напівпровідникові послідовні резонансні інвертори, що забезпечують швидке і енергоефективне регулювання режимів електроживлення індукторів і відповідно технологічного навантаження. Для реалізації у ньому максимальної електричної потужності при високій комутаційній стійкості інвертора необхідно узгоджувати опір навантаження з вихідним хвильовим опором інвертора [1–6].

Напівмостові послідовні резонансні інвертори, які використовуються в УІН, при живленні від трифазної промислової мережі напругою ~380 В і частотою 50 Гц мають вихідну напругу 200-250 В, а мостові інвертори – 400-500 В. Це значно ускладнює проблему узгодження хвильового опору інвертора з опором індукційного навантаження та змушує використовувати спеціальні трансформатори на підвищену нестандартну напругу, зокрема на 660 В. Такий підхід використовувався в розробках авторів статті промислових УІН потужністю до 630 кВт, з частотою струмів у навантаженні 2,4 кГц. Розробки впроваджено на ПАТ "Завод "Південкабель" (м. Харків) та підприємстві "Армліт-Донбас" (м. Харцизьк, Донецької обл.), в установках індукційного нагрівання алюмінієвих, мідних та залізних сплавів.

Для узгодження параметрів промислових УІН у більшості випадків використовують електричні схеми з трансформаторами і автотрансформаторами на магнітопроводах, або автоконденсаторні схеми підключення навантаження. Кожна з таких схем має недоліки, які обмежують її використання [1–7]. Так, схеми УІН з низькочастотними трансформаторами і автотрансформаторами на магнітопроводах мають низькі ККД, значні масу, габарити та вартість. Крім цього, використання в схемах УІН автотрансформаторів ускладнює конструкцію струмопроводів, вимагає наявність відпайки в індукторах, виконання чого є не завжди можливим.

Наявність гальванічного зв'язку таких схем з мережею електроживлення вимагає використання в них додаткових заходів по забезпеченню електробезпеки персоналу. При чому в різних частинах індукторів таких УІН протікає різний струм, що ускладнює регулювання технологічних процесів індукційної обробки металів і металевих виробів. Автоконденсаторні схеми підключення індукційного навантаження мають значні масу, габарити і вартість через істотне збільшення (до 4-х разів) встановленої потужності конденсаторної батареї та не забезпечують гальванічної розв'язки навантаження від промислової мережі електроживлення напругою 380 В і частотою 50 Гц, через що захист обслуговуючого персоналу плавильної печі від ураження електричним струмом потребує додаткових заходів.

Указані вище недоліки засобів узгодження режимів в УІН можуть бути усунені при застосуванні в них регульованого магнітного зв'язку між контурами індукційного навантаження та напівпровідникового послідовного резонансного інвертора. Принципова схема одного з таких УІН приведена на рис. 1.

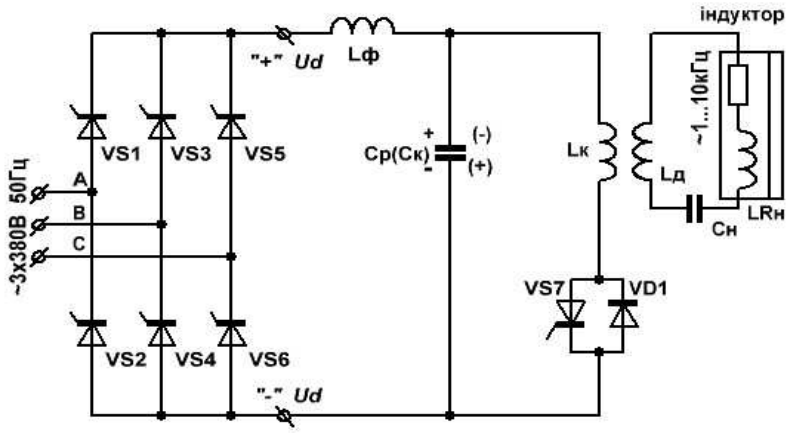


Рис. 1 Принципова схема УІН з регульованим магнітним зв'язком контурів навантаження та інвертора

© С. Л. Ламанов, Ю. В. Перетятко, Р. В. Белянін, 2015

Особливістю даної схеми є те, що енергія від резонансного інвертора передається в індуктор через додатково введений регульований повітряний магнітний зв'язок між комутуючою індуктивністю L_K власного резонансного контуру інвертора та контуром навантаження через введену додаткову індуктивність $L_д$. Такий зв'язок можливо використовувати безпосередньо між L_K та L_H без використання $L_д$.

Обговорення результатів дослідження. Тривалий час особливості гальванічної розв'язки та регульованого узгодження режимів контурів навантаження та напівпровідникового інвертора навантаження шляхом створення регульованого повітряного магнітного зв'язку між такими контурами практично не досліджувались. Використання сучасних пакетів прикладних програм *COMSOL Multiphysics* і *MATLAB Simulink* дозволяє розробити необхідні математичні моделі та дослідити на них особливості використання запропонованого в роботі [8] пристрою узгодження і гальванічної розв'язки режимів навантаження та інвертора. У роботі проводився аналіз режимів в контурах електричної схеми напівпровідникового послідовного резонансного однокоміркового інвертора, який забезпечував електроживлення індуктора при різних опорах навантаження. Досліджувалась залежність характеристик навантаження від значення його електричного опору та від ступеню магнітного зв'язку між комутуючою індуктивністю L_K резонансного контуру послідовного резонансного однокоміркового інвертора та додатковою індуктивністю $L_д$ контуру навантаження.

На рис. 2 приведено електричну схему УІН в програмному середовищі *MATLAB Simulink*, яку було розроблено для визначення параметричних взаємних залежностей характеристик інвертора та індукційного навантаження.

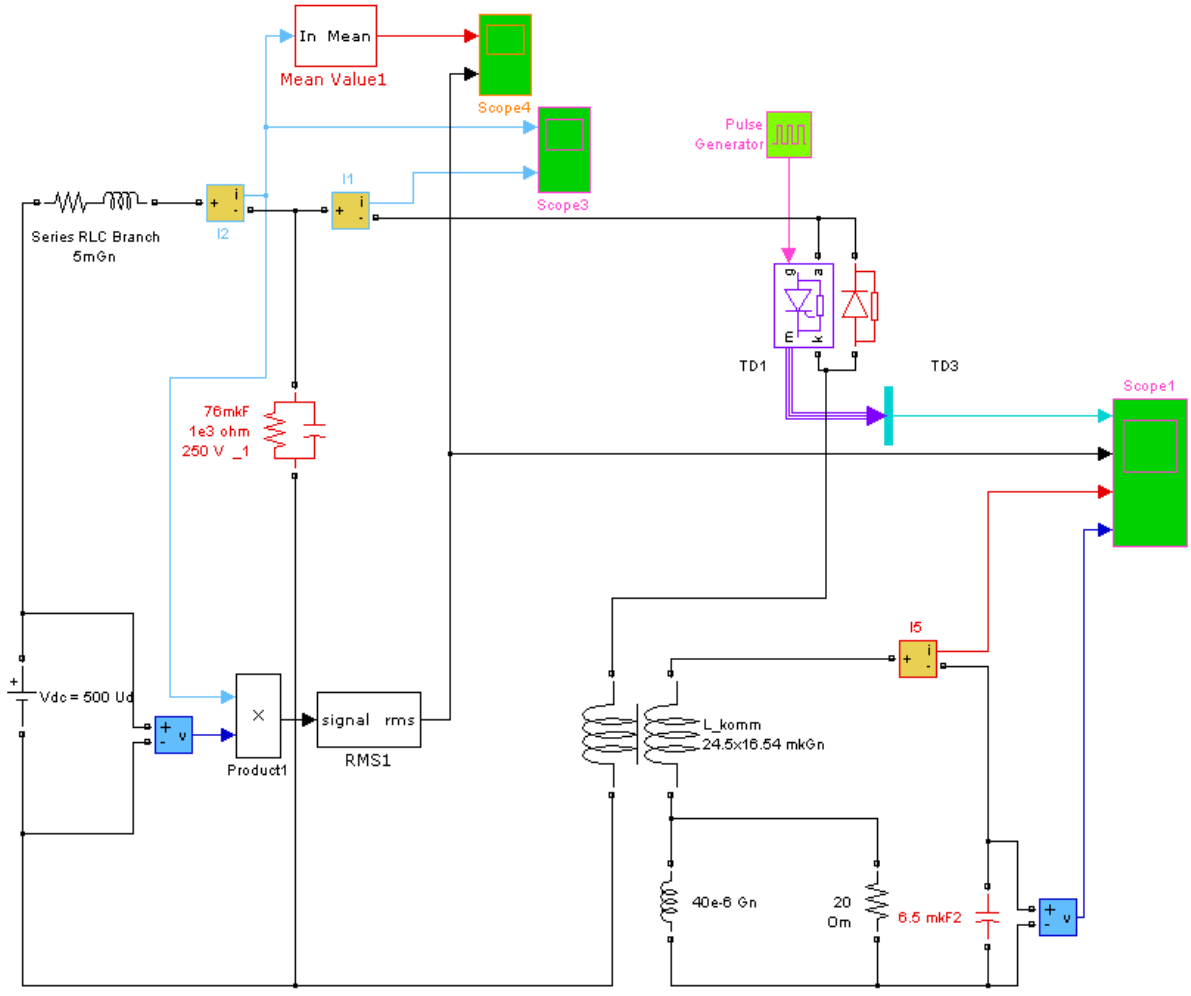


Рис. 2 Електрична схема УІН в програмі *MATLAB Simulink*

Параметри елементів схеми вказано безпосередньо на рис. 2. Період генератора Pulse становив *580 мкС*. Випрямляч змінного струму було замінено на джерело ідеальної електрорушійної сили *500 В*, яка імітувала вихідну напругу напівпровідникового трифазного випрямляча за схемою Ларіонова, включеного у промисловій трифазній мережі *380 В* частотою *50 Гц*.

На рис. 3 приведено фотографію конструкції реальних магнітозв'язаних котушок L_K та $L_Д$, які були закріплені в конструкції діючої індукційної установки з напівпровідниковим послідовним резонансним однокомірковим інвертором, який забезпечував електроживлення індуктора при різних опорах металевої сировини, що нагрівалась.

Дані про індуктивність та взаємоіндуктивність котушок L_K і $L_Д$, необхідні для аналізу схеми на рис. 2, було отримано на основі розрахунку просторового розподілу електромагнітного поля біля цих котушок, проведеного з використанням відомого пакету прикладних програм *COMSOL Multiphysics*.

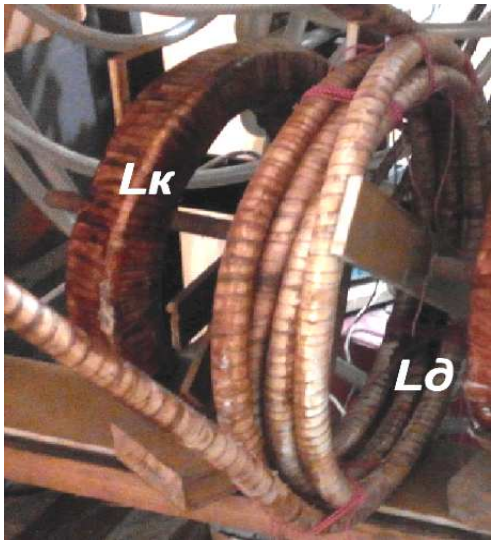


Рис. 3 Фотографія конструкції магнітозв'язаних котушок L_K та $L_Д$

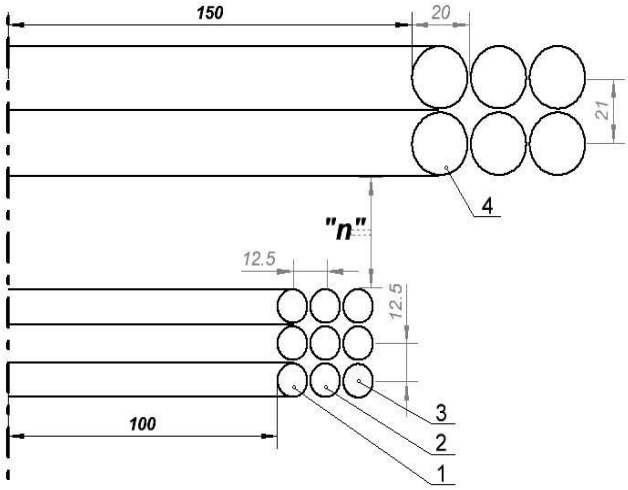


Рис. 4 Конструкція магнітозв'язаних котушок LK та LД

Вхідні дані для розрахунку значень індуктивності та взаємоіндуктивності котушок L_K і $L_Д$ в програмі *COMSOL Multiphysics* наведено на рис. 4.

Скріншот результатів розрахунку магнітного поля магнітозв'язаних котушок L_K та $L_Д$ в програмі *COMSOL Multiphysics* для варіанту "*n*"=20 мм наведено на рис. 5.

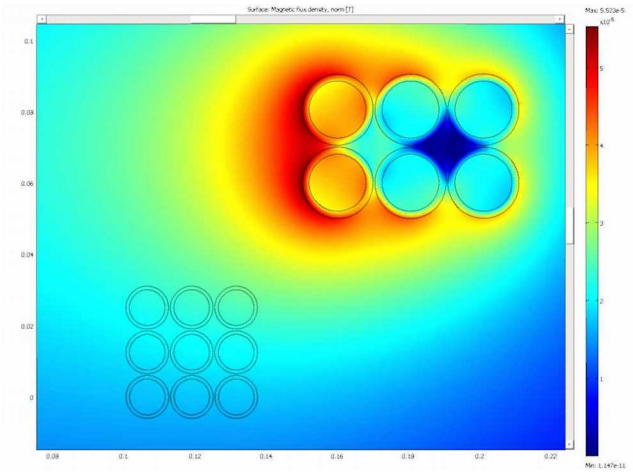


Рис. 5 Розподіл магнітного поля біля магнітозв'язаних котушок L_K та $L_Д$

Індуктивності котушок L_K та $L_Д$ не залежать від їх взаємного розташування і становлять: L_K = 24,5 мкГн, та $L_Д$ = 16,4 мкГн.

Результати розрахунку взаємоіндуктивності $L_{ВЗ}$ котушок L_K та $L_Д$ при різних значеннях відстані "*n*" між котушками на рис. 4, які отримано з використанням програми *COMSOL Multiphysics*, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Взаємоіндуктивність LВЗ котушок LK та LД

"*n*", мм	20	40	60	80
$L_{ВЗ}$, мкГн	6,96	5,75	4,7	3,83

Розрахунки режимів в контурах електричної схеми, приведеної на рис. 2, виконано при відстанях між котушками L_K і $L_Д$ "n" = 20, 40, 60, 80 мм та зміненні активного опору навантаження $R_Н$ від 5 до 50 Ом .

Результати розрахунків зведено в графіки, які наведено на рис. 6 та 7.

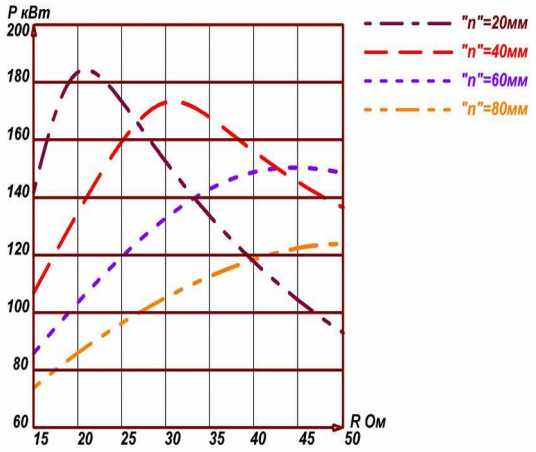


Рис. 6 Залежність потужності інвертора від опору навантаження $R_Н$ при різних відстанях між котушками L_K та $L_Д$

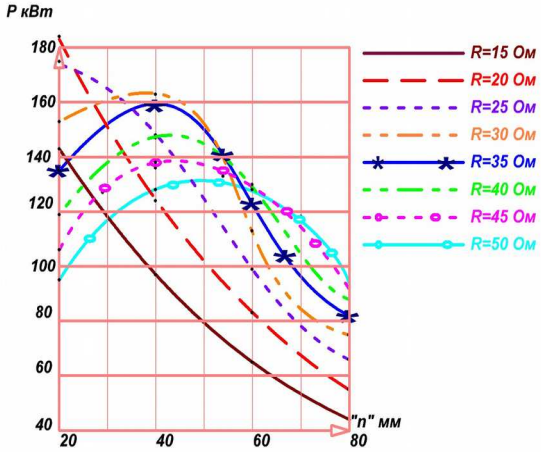


Рис. 7 Залежність потужності інвертора від відстані між котушками L_K і $L_Д$ при різних значеннях опору навантаження $R_Н$

Висновки. 1. Графіки на рис. 6 і 7 підтверджують залежність вхідної потужності напівпровідникового однокоміркового послідовного резонансного інвертора від опору навантаження та можливість регулювання цієї потужності зміненням відстані між котушками L_K і $L_Д$ при всіх значеннях опору навантаження $R_Н$.

Такий підхід також забезпечує надійну гальванічну розв'язку навантаження від промислової мережі електроживлення, а змінення відстані між котушками L_K та $L_Д$ забезпечує регулювання режимів навантаження.

2. При використанні представленого методу узгодження інвертора з навантаженням не потрібно додаткових засобів, а лише реалізацію магнітного зв'язку між контурами навантаження та резонансного інвертора. Такий регульований магнітний зв'язок можливо реалізувати на всіх частотах резонансного інвертору.

Описаний метод гальванічної розв'язки та узгодження інвертора з індукційним навантаженням впроваджено в установках індукційного нагрівання металів під закалку і пластичну деформацію та в установках плавлення чорних і кольорових металів при використанні резонансних інверторів потужністю 30, 100, 200, 320 і 630 кВт, формуючих у навантаженнях струмів частотою від 2,4 до 22 кГц.

Список літератури: **1.** *Лавлес Д.Л.* Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева // Силовая электроника. - 2007. - №4. **2.** *Дзлиев СВ.* Принципы построения систем питания установок индукционной закалки зубчатых колес при двухчастотном нагреве //Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева (АРИН-2005)". Материалы международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург, 2005. - С 193-200. **3.**Тиристориые преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / *Е.И. Беркович, Г.В. Ивенский, Ю.С. Иоффе, В.В. Моргун*-2-е изд. перераб и доп. - 1983. -208с. **4.** *Гусев Ю.М., Белкин А.К., Шуляк А.А., Рогинская Л.Э.* / Согласование тиристорного преобразователя частоты с нагрузкой. // Технічна електродинаміка. - Спец выпуск 1998, №2, Т2. – С. 23-26. **5.** *Казанцев В.Г., Рогинская Л.Э.* Анализ способов автоподстройки частоты автономных инверторов, нагруженных на колебательный контур. Электротехника — 1994. -№10- С. 17-20. **6.** *Белкин А.К., Костюкова Т.П., Рогинская Л.Э., Шуляк А.А.* Тиристориые преобразователи частоты - М.: Энергоатомиздат — 2000. - 263с: ил. **7.** *Саратовский А.Н.* Особенности способов согласования тиристорного преобразователя частоты с индукционной нагрузкой - Сборник научных работ студентов Донбасского Государственного Технического Университета, Вып. 3 Ч. II, - г. Алчевск, 2010, - С.143-150. **8.** *Ламанов С.Л.* Патент № 64098 «Інвертор для індукційного нагріву металів» *Ламанов С.Л та ін.* Опубл. 25.10.2011; Бюл. №20.

Bibliography (transliterated): ***1.*** *Lavels, D.L.*, Obzor poluprovodnikovyih istochnikov pitaniya dlya induktsionnogo nagreva // Silovaya elektronika. - *2007. - №4. Print.* **2.** *Dzliev, S.V.*, Printsipyi postroeniya sistem pitaniya ustanovok induktsionnoy zakalki zubchatyih koles pri dvuhchastotnom nagreve *// Aktualnyie problemyi teorii i praktiki induktsionnogo nagreva (ARIN-2005)". Materialyi mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. - Sankt-Peterburg, 2005. - 193-200. Print.* **3.**Tiristoriyie preobrazovateli povyishennoy chastotyi dlya elektrotehnologicheskih ustanovok / *E.I. Berkovich, G.V. Ivenskiy, Yu.S. Ioffe, V.V. Morgun-2-e izd. pererab i dop. - 1983. -208. Print.* **4.** *Gusev Yu.M., Belkin A.K., Shulyak A.A., Roginskaya L.E.* / Soglasovanie tiristornogo preobrazovatelya chastotyi s nagruzkoy. *// TehnIchna elektrodinamIka. - Spets vyipusk 1998, №2, T2. – 23-26. Print.* **5.** *Kazantsev V.G., Roginskaya L.E.* Analiz sposobov avtopodstroyki chastotyi avtonomnyih invertorov, nagruzhennyih na kolebatelnyiy kontur. *Elektrotehnika — 1994. -№10 - 17-20. Print.* **6.** *Belkin A.K., Kostyukova T.P., Roginskaya L.E., Shulyak A.A.* Tiristoriyie preobrazovateli chastotyi - *M.: Energoatomizdat — 2000. - 263 Print.* **7.** *Saratovskiy A.N. Osobennosti sposobov soglasovaniya tiristornogo preobrazovatelya chastotyi s induktsionnoy nagruzkoy - Sbornik nauchnyih rabot studentov Donbasskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta, Vyip. 3 Ch. II, - g. Alchevsk, 2010, - S.143-150. Print.* **8.** *Lamanov S.L. Patent № 64098* «Invertor dlya induktsiynogo nagrivu metaliv» *Lamanov S.L ta In. Opubl. 25.10.2011; Byul. №20.*

Надійшла (received) 31.08.2015

УДК 621.314

О. В. ОМЕЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «Криворізький національний університет»
В. С. КОЗЛОВ, аспірант ДВНЗ «Криворізький національний університет»

СИЛОВИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ІЗ СИСТЕМОЮ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Постановка проблеми. Сучасні силові активні фільтри (САФ) є ефективним рішенням для вирішення низки задач, пов'язаних із показниками якості електричної енергії (ПЯЕ): компенсацією реактивної потужності, симетруванням фазних струмів (напруг), видаленням вищих гармонік тощо [1, 2, 3, 4]. З іншої сторони, активні фільтрі можна застосовувати для компенсації втрат потужності в мережі живлення. Таким чином, САФ являють собою невід'ємну технічну складову сучасної концепції енергозбереження.

Незважаючи на переваги САФ по відношенню до класичних технічних заходів корекції ПЯЕ застосування активних компенсаторів обмежується відносно високою вартістю останніх [2]. Інший недолік пов'язано із коректністю роботи САФ в умовах напруги живлення із значно погіршеними ПЯЕ (несиметрія напруги, несинусоїдність тощо)[5] та обмеженістю стратегій компенсації (робота лише в режимі видалення вибіркових вищих гармонік, балансування навантаження тощо).

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Вирішення проблеми вартості САФ полягає у заміні компонентів пристрою на більш дешеві за рахунок оптимізації силової частини. Щодо оптимізації силової частини САФ для зменшення ціни установки розроблено низку гібридних топології САФ[2].

Очевидно, що розробка нових способів керування САФ для вирішення вищезазначених проблем є більш привабливою, оскільки не вимагає фізичної перебудови структури пристрою. Дослідниками ведеться робота у напрямку розробки нових теорій декомпозиції складових потужності [6], застосування штучного інтелекту (нейромереж, нечіткої логіки тощо)[7], синтезу складних регуляторів для покращення роботи САФ (фільтр Калмана, інші складні фільтри)[8], синтезу систем, що використовують методи екстремального регулювання (ЕР)[4].

Останній напрямок дослідження є достатньо перспективним виходячи із суті застосування методів ЕР: оптимальне налаштування параметрів електротехнічного комплексу для досягнення найкращого результату корекції ПЯЕ, компенсації втрат потужності в електричній мережі тощо. Національними дослідниками розроблено декілька способів оптимального керування САФ, до недоліків яких можна віднести необхідність додаткової інформації про мережу живлення (опір провідника)[4] тощо.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка математичного апарату САФ із застосування ЕР та подальше підтвердження працездатності останнього на основі фізичного моделювання. При цьому необхідно забезпечити мінімум вхідних величин для цифрової системи керування (ЦСК).

Матеріали досліджень. Інтелектуальну частину САФ можна розділити на дві основні складові: *до першої складової* належать алгоритми виміру, аналізу та обчислення сигналу корекції, який необхідно генерувати до мережі; *до другої складової* належать алгоритми керування силовою частиною пристрою, яка є відповідальною за формування силовою частиною раніше обробленого сигналу. В роботі основну увагу надано *першій* названій вище складовій.

Основною складовою інтелектуальної частини САФ є математичний апарат визначення сигналу корекції, який пристрій повинен генерувати до мережі. Серед існуючих способів визначення сигналу корекції більш доцільним є використання способів, що оперують із реальними фізичними величинами, наприклад *CPC («Теорія фізичних складових струму») метод* [6], на відміну від методів, що оперують із «фіктивними» величинами (*IRP P-q theory* [5]). Вищенаведений факт обґрунтовано можливістю подальшого використання САФ для технічного контролю електричних параметрів мережі живлення.

Спираючись на вищесказане, за базовий метод керування САФ обрано **IcosFi** метод [9], який засновано на понятті трикутника потужностей. У разі застосування САФ, що впливає на струм мережі, метод можна описати наступним виразом:

$$\begin{cases} i_{cA} = \left[I_A^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UA}^{(1)} - \varphi_{IA}^{(1)}) \right] \cdot sin(\varphi_{UA}^{(1)}) \\ i_{cB} = \left[I_B^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UB}^{(1)} - \varphi_{IB}^{(1)}) \right] \cdot sin(\varphi_{UB}^{(1)}) \\ i_{cC} = \left[I_C^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UC}^{(1)} - \varphi_{IC}^{(1)}) \right] \cdot sin(\varphi_{UC}^{(1)}) \end{cases}, \quad (1)$$

де i_{cA}, i_{cB}, i_{cC} - миттєве значення струму корекції; $I_A^{(1)}$, $I_B^{(1)}$, $I_C^{(1)}$ - вектори першої гармоніки фаз мережі; $\varphi_{UA}^{(1)}$, $\varphi_{IA}^{(1)}$, $\varphi_{UB}^{(1)}$, $\varphi_{IB}^{(1)}$, $\varphi_{UC}^{(1)}$, $\varphi_{IC}^{(1)}$, - фази векторів напруг та струмів першої гармоніки.

У роботі запропоновано замінити вектори струму та напруги окремих фаз на вектор струму та напруги першої гармоніки прямої послідовності для можливості компенсації струмів несиметрії (балансування навантаження). Тоді формула ((1) прийме вигляд:

© О.В. Омельченко, В.С. Козлов, 2015

$$\begin{cases} i_{cA} = \left[I_{Net}^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)}) \right] \cdot sin(\varphi_{UNet}^{(1)}) \\ i_{cB} = \left[I_{Net}^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)}) \right] \cdot sin(\varphi_{UNet}^{(1)} + \frac{2\pi}{3}), \\ i_{cC} = \left[I_{Net}^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)}) \right] \cdot sin(\varphi_{UNet}^{(1)} + \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

де $I_{Net}^{(1)}$ - амплітуда вектора першої гармоніки прямої послідовності струму мережі; $\varphi_{UNet}^{(1)}$, $\varphi_{INet}^{(1)}$ - фази векторів напруги та струму першої гармоніки прямої послідовності.

Далі позначимо складову формули (2):

$$I_{Net}^{(1)} \cdot cos(\varphi_{UNet}^{(1)} - \varphi_{INet}^{(1)}) = \Delta Id , \quad (3)$$

де ΔId - амплітудне значення активного струму навантаження.

Математичний вираз (3) можна застосовувати для видалення всіх складових повної потужності, окрім активної складової. Зазначений метод має наступне обмеження: за наявності несиметрії напруги, винуватцем якої є енергогенеруюча кампанія, не враховується активна потужність вищих гармонік струму та напруги:

$$\begin{cases} P_{hA} = \sum_{n=2}^{\infty} U_A^{(n)} \cdot I_A^{(n)} \cdot cos(\varphi_{UA}^{(n)} - \varphi_{IA}^{(n)}) \\ P_{hB} = \sum_{n=2}^{\infty} U_B^{(n)} \cdot I_B^{(n)} \cdot cos(\varphi_{UB}^{(n)} - \varphi_{IB}^{(n)}) , \\ P_{hC} = \sum_{n=2}^{\infty} U_C^{(n)} \cdot I_C^{(n)} \cdot cos(\varphi_{UC}^{(n)} - \varphi_{IC}^{(n)}) \end{cases} \quad (4)$$

де P_{hA}, P_{hB}, P_{hC} - потужність вищих гармонік фаз А, В, С; n – порядковий номер гармоніки; $U_A^{(n)}$, $U_B^{(n)}$, $U_C^{(n)}$, $I_A^{(n)}$, $I_B^{(n)}$, $I_C^{(n)}$ - діючі значення гармонік напруг та струмів фаз А, В, С; $\varphi_{UA}^{(n)}$, $\varphi_{UB}^{(n)}$, $\varphi_{UC}^{(n)}$, $\varphi_{IA}^{(n)}$, $\varphi_{IB}^{(n)}$, $\varphi_{IC}^{(n)}$ - кути зсуву фаз сигналів напруг та струмів фаз А, В, С.

Цей недолік є суттєвим при доволі великому значенні несиметрії напруги, винуватцем якої є енергогенеруюча кампанія. Таке явище на практиці зустрічається досить нечасто (як свідчить ГОСТ 13109-97), та **в подальшому виключається** новою, запропонованою в роботі, системою керування.

Перевагою IcosFi методу є відсутність необхідності у визначенні рівня напруги живлення. Зазначена перевага *дозволяє використовувати більш дешеві датчики напруги*.

Передумовами для синтезу ЦСК з ЕР стали наведені нижче факти:

1. У ході практичних експериментів було виявлено,при що збільшенні напруги на ємності в ланці постійного струму інвертора вище рівня $2{,}34 \cdot U_{Фази}$ коефіцієнт гармонік покращується, але при досягненні деякої точки (екстремуму), процес корекції сигналу мережі знову погіршується. Тобто існує деяка точка екстремуму або (на практиці) *«зона бажаної роботи»* (термін автора).
2. При зменшенні напруги на ємності струм (напруга) мережі наближується до струму навантаження. При збільшенні напруги на ємності у формі струму мережі збільшується рівень високочастотних компонент.
3. Рівнем напруги на ємності можна керувати без додаткових схемотехнічних заходів, використовуючи лише основний алгоритм визначення струму корекції (спосіб описано нижче). При цьому, на практиці напругу на ємності можна регулювати в досить широких межах.
4. Для багатьох відомих алгоритмів основним значенням для розрахунку є рівень активної потужності мережі або еквівалентні енергетичні показники (активний струм, еквівалентна активна провідність), впливом на які і регулюють рівень напруги на ємності.

Таким чином, *основна ідея реалізації ЕР* полягає у наступному: існує деякий оптимальний рівень напруги на ємності, який можна регулювати зміною величини розрахункової активної потужності мережі в ЦСК САФ. Робота САФ у зазначеному режимі є оптимальною за обраною стратегією (компенсація вищих гармонік, балансування навантаження тощо).

Структурна схема САФ з ЕР представлена на рис. 1.

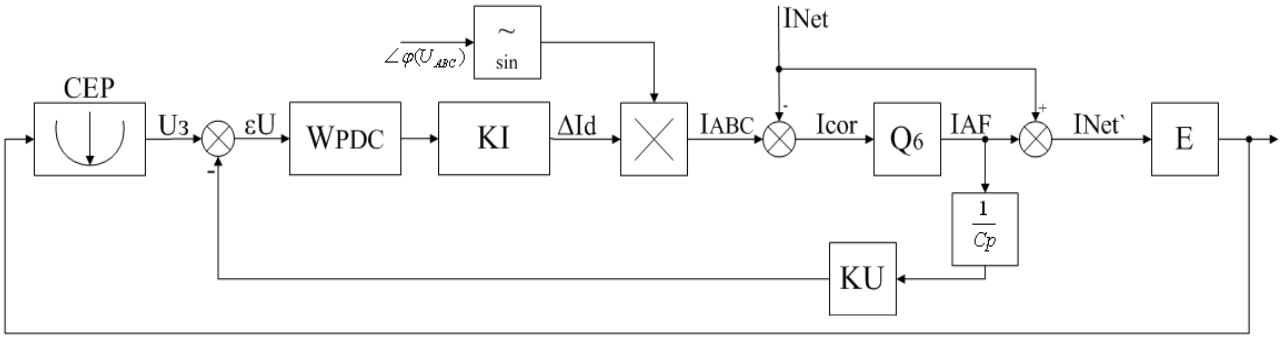
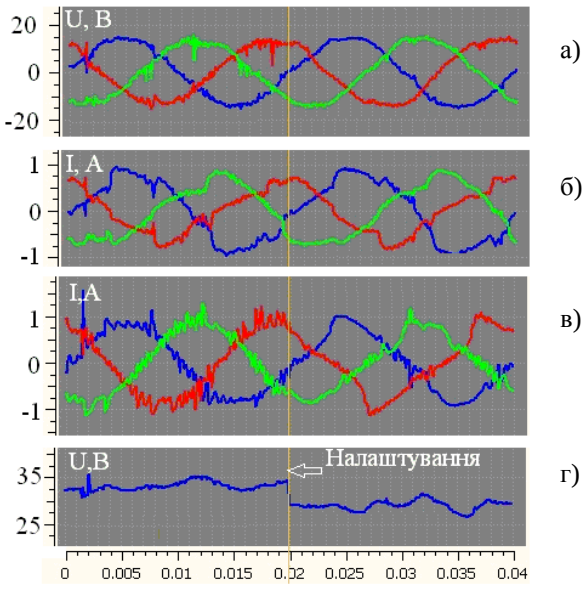


Рис. 1 Структурна схема САФ з ЕР

Таблиця - Можливі *критерії якості компенсації* для активного фільтру струму

№	Критерій	Пояснення
1	$\begin{cases} \dfrac{\sqrt{\sum I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \to 0 \\ arg\left(\overline{U_{(1)}}\right) - arg\left(\overline{I_{(1)}}\right) \to 0 \end{cases}$	Критерій мінімізує сумарний коефіцієнт гармонік порядків першого та третього десятків із умовою генерації струму першої гармоніки у фазі із напругою першої гармоніки мережі.
2	$\begin{cases} \dfrac{(dI)^2}{d^2t} \to min \\ arg\left(\overline{U_{(1)}}\right) - arg\left(\overline{I_{(1)}}\right) \to 0 \end{cases}$	Критерій мінімізує другу похідну струму, яка набуває мінімуму за умови синусоїдної форми.
3	$\begin{cases} \sqrt{\dfrac{\int_0^T I^2}{T}} \to min \\ arg\left(\overline{U_{(1)}}\right) - arg\left(\overline{I_{(1)}}\right) \to 0 \end{cases}$	Критерії мінімізує діюче значення струму мережі, яке є мінімальним за умови синусоїдності струму, який співпадає за фазою із фазою напруги мережі.



а) б) в) г)

Рис. 2 Осцилограми цифрового осцилографа а) напруга мережі, б) струм навантаження, в) струм мережі, г) напруга в ланці постійного струму

На рис. 1: СЕР – блок екстремального регулятора, Uз – напруга завдання в ланці постійного струму; εU – сигнал похибки вищезазначеної напруги; $\angle\varphi(U_{ABC})$ – кут вектора напруги мережі живлення першої гармоніки прямої послідовності; W_{PDC} – регулятор напруги; KI – коефіцієнт узгодження напруги в ланці постійного струму та активного струму мережі; ΔId – амплітудне значення активного струму навантаження; I_{ABC} – вектор струму завдання першої гармоніки прямої послідовності (синусоїда); I_{cor} – вектор завдання струму корекції САФ; Q_6 – силовий інвертор; IAF – струм корекції САФ; INet та INet' – струм мережі до та після корекції; C – значення ємності конденсаторної батареї; E – блок обчислення критерію якості (цільова функція для ЕР); kU – коефіцієнт напруги для зворотного зв'язку за напругою.

Контур регулювання напруги є внутрішнім по відношенню до контуру системи екстремального регулювання (СЕР). Необхідно зазначити, що ЕР може впливати на амплітудне *розрахункове* значення активної потужності (активного струму мережі) ΔId, обходячи контур регулювання напруги.

Наступним важливим кроком синтезу ЕР для САФ є вибір функціоналу якості, мінімізуючи (або максимізуючи) який досягається введення пристрою до оптимального режиму роботи. В табл. наведено декілька варіантів нових розроблених цільових функцій. Для практичних досліджень обрань перший варіант.

Достовірність запропонованого математичного апарату було підтверджено на основі фізичного моделювання комплексу «Мережа-САФ-Навантаження». Нижче наведено структурну схему моделі енергетичного об'єкту (рис. 3) та цифрові осцилограми (рис. 2) результатів досліду компенсації вищих гармонік, несиметрії та реактивної потужності. На схемі (рис. 3) $R1 \neq R2 \neq R3$ та кути керованого випрямляча для кожного плеча $\alpha_A \neq \alpha_B \neq \alpha_C$. Параметри експериментальної установки: напруга живлення = 12 В, струм навантаження ≈ (0,5÷1) А, активна потужність ≈ 16 Вт.

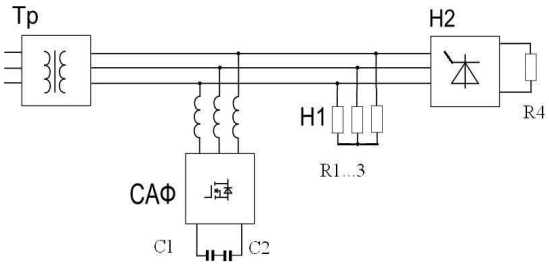


Рис. 3 Структурна схема тестової мережі

Для початку роботи (або перестройці на новий оптимальний рівень при зміні навантаження мережі) САФ вимагає часової затримки, що дорівнює одному періоду напруги живлення. Наступним кроком починається компенсація ПЯЕ мережі із налаштуванням на оптимальний рівень. Практично в ході зазначеного експерименту ЦСК настроює САФ на оптимальний рівень за час 30÷40 періодів напруги живлення. *Підкреслимо*, що корекція мережі під час налаштування на оптимальний рівень відбувається із якістю, близької до такої, що забезпечує класичний варіант САФ без ЕР.

На рис. 2 представлено установлений режим роботи САФ (оптимальний рівень) та початковий період перед налаштуванням. В результаті корекції коефіцієнт гармонік струму зменшено з ≈ 20% до ≈ 11%, реактивну потужність першої гармоніки зменшено на ≈ 61%, коефіцієнт несиметрії струму за зворотною послідовністю зменшено з ≈ 11% до ≈ 2%, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з ≈ 4% до ≈ 3%.

Необхідно зазначити іншу перевагу запропонованого способу керування САФ, а саме: відсутність датчиків струму навантаження САФ та необхідність отримувати лише поточні значення струму та напруги мережі живлення. Для виміру останньої величини можна використовувати спрощений датчик визначення фази напруги.

Висновки. В роботи запропоновано новий підхід побудови системи керування САФ на основі екстремального регулювання. Основна ідея реалізації зазначеного регулятора полягає у наступному: існує деякий оптимальний рівень напруги на ємності в ланці постійного струму, який можна регулювати зміною величини розрахункової активної потужності мережі в системі керування. Робота САФ у зазначеному режимі є оптимальною за обраною стратегією (компенсація вищих гармонік, балансування навантаження тощо). Для визначення оптимального режиму роботи САФ запропоновано декілька цільових функцій.

Достовірність запропонованого методу керування перевірено за допомогою фізичного моделювання: до тестової мережі напругою 12 В підключено несиметричне активне навантаження та керований випрямляч. В результаті корекції коефіцієнт гармонік струму зменшено з ≈ 20% до ≈ 11%, реактивну потужність першої гармоніки зменшено ≈ 61%, коефіцієнт несиметрії струму за зворотною послідовністю зменшено з ≈ 11% до ≈ 2%, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з ≈ 4% до ≈ 3%.

Пристрій, побудований за вищенаведеною методикою має наступні переваги: відсутність датчиків струму навантаження, спрощений датчик напруги мережі, відсутність необхідності в отриманні інформації про тип силових кабелів мережі, її індуктивність, значення індуктивності реакторів або ємності конденсаторів САФ тощо. Також перевагою запропонованої системи керування САФ з ЕР є виправлення недоліку обраного IcosFi методу керування, пов’язаного із визначенням активної потужності при роботі в умовах напруги, насиченої вищими гармоніками.

Список літератури: **1.** *И.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др.* Баланс энергий в электрических цепах. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с. **2.** *Akagi H.* Modern Active Filters and Traditional Passive Filters // Bulletin of the Polish Academy of science. Technical sciences. – 2006. – Iss. 54. – PP. 255–269. **3.** *Волков В.А.* Методика оценки энергоэффективности использования силового активного фильтра / *В.А. Волков* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2012. – Вип. 3. (19) – С.213-215. **4.** Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі / *С.Й. Поліщук, М.Ю. Артеменко, В.М. Михальський [та ін.]* // Технічна електродинаміка. — 2013. — № 3. — С. 12–19. **5.** *Czarnecki L. S.* On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / *L. S. Czarnecki* // IEEE Trans. On Power Electronics Vol. 19. – 2004. – No. 3, pp. 828-836. **6.** *Czarnecki L.S.* Currents’ Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory / *L.S. Czarnecki* // Przegląd elektrotechniczny, R84. – 2008. – No. 6. – P. 28-37. **7.** *Janpong S.* A Literature Survey of Neural Network Applications for Shunt Active Power Filters / *S. Janpong, K-L. Areerak, K-N. Areerak //* World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 60. – 2011. – № 5(12). – P. 273 - 279. **8.** *Rosendo J.A.* Application of Self-Tuned Kalman Filters to Control of Active Power Filters / *J.A. Rosendo, A. Bachiller, A. Gomez* // Power Tech, IEEE Lausanne. – 1-5 July, 2007. – P. 1262-1265 **9.** *Charles S.* Comparison of Three Phase Shunt Active Power Filter Algorithms / *S. Charles, G. Bhuvaneswari* // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 2, no. 1. – P.175-180.

Bibliography (translated): **1.** Tonkal', I.E., Novosel'tsev A.V. and Denisyuk S.P. *Balans energiy v elektricheskikh tsepakh.* Kyiv: Naukova dumka, 1992. Print. **2.** H, Akagi. "Modern active filters and traditional passive filters." *Polish Academy of Sciences, Technical Sciences.* 54.3 (2006): 255-269. Print **3.** V., Volkov. "Metodika otsenki energoeffektivnosti ispol'zovaniya silovogo aktivnogo fil'tra." *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi.* Vol. 3.19 (2012): 213-215. Print. **4**. S, Polishchuk, Artemenko M, Mikhal's'kiy V, Batrak L and Shapoval I. "Strategiya keruvannya paralel'nim aktivnim fil'trom z chastkovim poslablennyam skladovoї nul'ovoї poslidovnosti naprug trifaznoї chotiriprovidnoї merezhi." *Tekhnichna elektrodinamika.* 3 (2013): 12–19. Print. **5**. L., Czarnecki . "On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory ." *IEEE Trans. On Power Electronics* . 19.3 (2004): 828-836. Print. **6**. L, Czarnecki. "Currents’ Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory." *Przegląd elektrotechniczny.* R84.6 (2008): 28-37. Print. **7**. S, Janpong, Areerak K-L and Areerak K-N. "A Literature Survey of Neural Network Applications for Shunt Active Power Filters ."*World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 60.* 5.12 (2011): 273 - 279. Print. **8**. J.A., Rosendo. "Application of Self-Tuned Kalman Filters to Control of Active Power Filters ." *Power Tech, IEEE Lausanne.* 1-5 July.(2005): 1262-1265. Print. **9**. S., Charles and Bhuvaneswari G. "Comparison of Three Phase Shunt Active Power Filter Algorithms." 2.1 (2010): 175-180. Print.

Надійшла (received) 07.08.2015

УДК 621.314

Я. В. ЩЕРБАК, д-р техн. наук, проф. зав. каф.УГУЖТ, Харьков;
Е. Я. ИВАКИНА, канд. техн. наук, ст. препод. ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, Харьков;
В. В. ПАНЧЕНКО, ст. препод., УГУЖТ, Харьков

ИМПУЛЬСНАЯ МОДЕЛЬ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ДВУХСТОРОННЕЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В РЕЖИМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ТОКА

Введение. Результаты исследований динамических характеристик тиристорного выпрямителя и импульсного преобразователя постоянного напряжения приведены в работах [1-5]. В работах [2-5] показано, что для малых приращений входного воздействия тиристорный выпрямитель и преобразователь постоянного напряжения с односторонней широтно-импульсной модуляцией представляют собой амплитудо-импульсные модуляторы второго рода. Указанные преобразователи имеют одинаковые структуры импульсных моделей. Отличие состоит в разных законах изменения фактора пульсаций [3,4], что вызвано разной формой выходных напряжений. Приведенные в указанных работах импульсные модели дают возможность исследования динамических процессов в замкнутых системах, содержащих тиристорный выпрямитель и импульсный преобразователь постоянного напряжения в режимах непрерывного и прерывистого токов, с учетом и без учета интервала коммутации. В работах [4,5] показано влияние на динамические характеристики тиристорного выпрямителя и импульсного преобразователя постоянного напряжения несимметрий управления и питающей сети. В работе [12] получена импульсная модель выпрямителя с односторонней широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.

Постановка задачи. Управляемые выпрямители широко применяются в замкнутых системах преобразования электрической энергии. Полоса пропускания тиристорного выпрямителя зависит от пульсности m и определяется теоремой Котельникова. При построении стабилизированных систем питания с высокими показателями качества электрической энергии в выходной цепи в ряде случаев требуется расширение полосы пропускания. Повышение пульсности тиристорного выпрямителя связано со значительным усложнением силовой части выпрямителя и его трансформатора. Одним из путей расширение полосы пропускания выпрямителя является применение вместо фазового управления широтно-импульсного регулирования среднего значения выпрямленного напряжения [6-9].

Целью данной работы является исследование динамических характеристик выпрямителя, в котором среднее значение выпрямленного напряжения регулируется с помощью двухсторонней широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Материалы исследования: Обобщенная эквивалентная схема выпрямителя для одного тактового интервала широтно-импульсной модуляции приведена на рис.1. Временные диаграммы, характеризующие динамические процессы выпрямителя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией изображены на рис 2. На приведенных рисунках приняты следующие обозначения:

U_m - линейное напряжение на m-том тактовом интервале выпрямителя; E_o - э.д.с. нагрузки; $\theta_o = 2\pi / m$ - период дискретности выпрямителя; $\theta_1 = \theta_o / K_o$ - период дискретности ШИМ, где $K_o = 1,2,3,...$; $\theta_\gamma = \gamma \cdot \theta_1$ - длительность выходного импульса ШИМ; $\Delta\theta_{\gamma 1}$ и $\Delta\theta_{\gamma 2}$ - приращение длительности выходного импульса ШИМ.

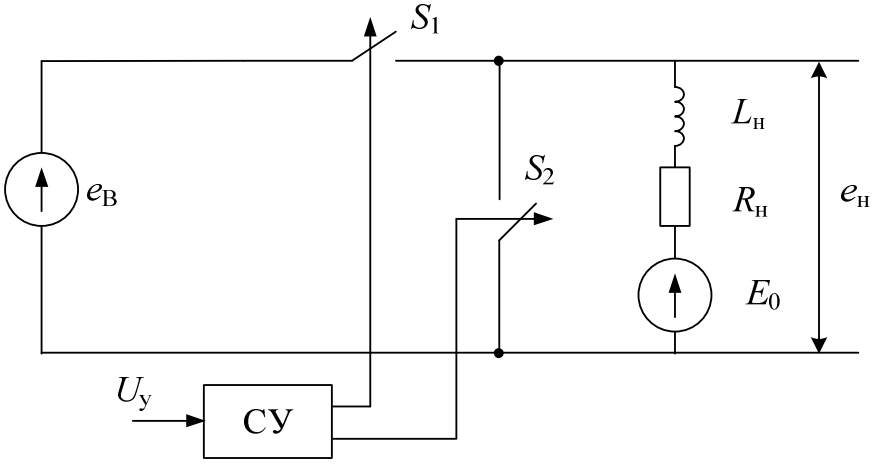


Рис.1 Обобщенная эквивалентная схема выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией.

© Я. В. Щербак, Е. Я. Ивакина, В. В. Панченко, 2015

Выходной координатой выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией является периодическая последовательность импульсов длительностью θ_γ, ограниченных по амплитуде действующим на m-том тактовом интервале дискретности выпрямителя линейным напряжением U_m (см.рис.2).

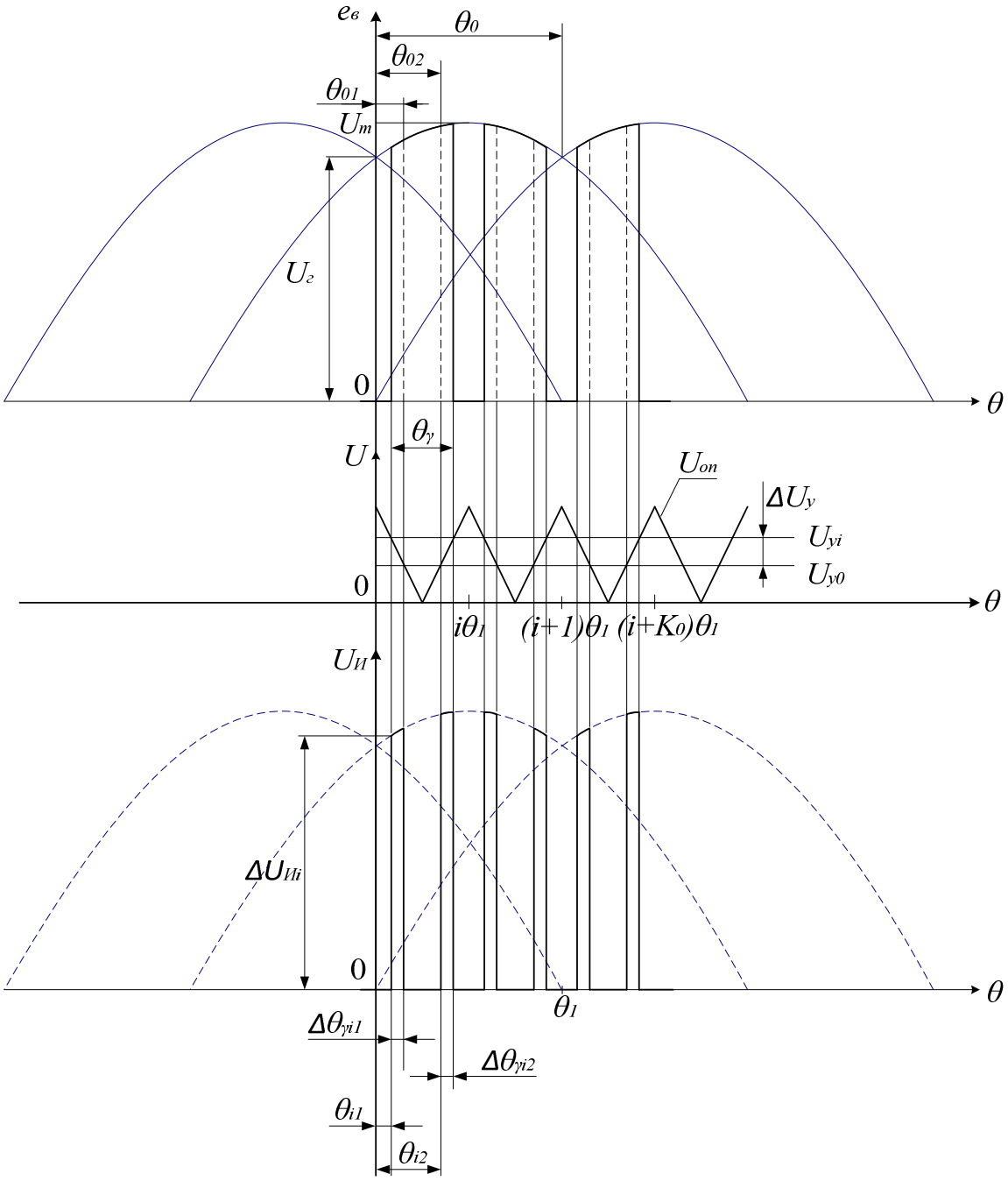


Рис.2 Временные диаграммы выпрямителя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией в динамическом режиме

При рассмотрении процессов протекающих в системе выпрямитель с ШИМ -нагрузка, за начало отсчета угловых координат примем момент естественной коммутации. Процесс протекания тока в нагрузке определяется системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \omega L_н \dfrac{dI_н^{'}}{d\theta} + I_н^{'} R_н = e_в - E_o; \\ \omega L_н \dfrac{dI_н^{''}}{d\theta} + I_н^{''} R_н = -E_o. \end{cases} \qquad (1)$$

Первое уравнение системы определяет ток в цепи нагрузки, когда ключ S_1 замкнут (см. рис.1), а второе – когда он разомкнут и замкнут ключ S_2.

Система уравнений (1) отражает кусочно-линейные свойства процесса преобразования выпрямителем с широтно-импульсной модуляцией входного напряжения. Переход от одного дифференциального уравнения к другому определяется моментами коммутации ключей S_1 и S_2 в силовой части выпрямителя, которые носят периодический характер. Моменты коммутации силовых ключей определяются условиями переключения в системе управления СУ. В режиме непрерывного тока в цепи нагрузки условие переключения определяется системой уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{U_o}{\omega T_1}\left(\dfrac{\omega T_o}{2} - \theta_{i1}\right) = U_y(\theta_{i1}); \\ \dfrac{U_o}{\omega T_2}\left(\theta_{i2} - \dfrac{\omega T_o}{2}\right) = U_y(\theta_{i2}). \end{cases} \tag{2}$$

При переходе в режим прерывистого тока первое и второе условие дополняются третьим

$$I_н(\theta_i; \theta_i + \tau\omega) = 0, \tag{3}$$

где τ - определяет момент спада тока нагрузки до нуля.

Режим прерывистого тока в цепи нагрузки возникает когда

$$E_o = U_d, \tag{4}$$

где U_d - среднее значение выходного напряжения выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией.

Анализ выражений (2) и (3) указывает на более сложный характер протекания динамических процессов в выпрямителе с двухсторонней ШИМ по сравнению с односторонней [12]. Объясняется это наличием двух точек встречи сигнала управления и опорного сигнала.

Кусочно-линейная система уравнений (1)-(3) позволяет описывать электромагнитные и динамические процессы выпрямителя с двухсторонней ШИМ.

Для определения динамических характеристик выпрямителя с двухсторонней ШИМ дадим малое приращение ΔU_y сигналу управления U_y. Приращение выходного сигнала выпрямителя под действием ΔU_y в замкнутой структуре определяется трансцендентным уравнением относительно сигнала управления

$$\Delta e_в[\Delta U_y(\theta_{i1}; \theta_{i2})] = e_в(U_{yo} + \Delta U_y) - e_в(U_{yo}). \tag{5}$$

Полученное приращение выходного сигнала выпрямителя представляет собой две периодически повторяющиеся последовательности импульсов $\Delta\theta_{и1}$ и $\Delta\theta_{и2}$. Импульсные последовательности ограничены по амплитуде линейным напряжением, действующим на соответствующем интервале дискретности выпрямителя. Из рис.2 следует, что в динамическом режиме при бесконечно малых приращениях управляющего воздействия ΔU_y импульсные последовательности $U_u(\theta_{i1})$ и $U_u(\theta_{i2})$ содержат информацию о приращениях гладкой составляющей выходного сигнала выпрямителя с амплитудой [12]

$$U_Г = U_m \cdot \sin\frac{2\pi}{m}. \tag{6}$$

И пульсирующей составляющей

$$U_П(\theta_{i1}) = U_m \cdot \sin(\theta + \frac{2\pi}{m}) - U_Г. \tag{7}$$

Динамическую связь между входной ΔU_y и выходной $\Delta e_в$ величинами определим линеаризацией уравнения (5) относительно нового состояния системы при $U_y = U_{yi}$. Разложив уравнение (5) в обобщенный ряд Тейлора и ограничившись линейными членами получим

$$\Delta e_в = \frac{\mathrm{D}e_в(\theta_{i1})}{dU_y} \cdot \frac{\Delta U_y}{1!} + \frac{\mathrm{D}e_в(\theta_{i2})}{dU_y} \cdot \frac{\Delta U_y}{1!}, \tag{8}$$

где оператор *D* обозначает операцию обобщенного дифференцирования [10].

Согласно [10] обобщенная производная от функции имеющей разрыв первого рода и зависящей от параметра, вычисляется как

$$\frac{\mathrm{D}e_в(\theta_i)}{dU_y} = \frac{\partial e_в(\theta_i)}{\partial U_y(\theta_i)} - \Delta U_{ui}(\theta_i)\frac{d(\theta_i)}{dU_y} \cdot \delta(\theta_\gamma - \theta_i), \tag{9}$$

Величины скачков выходной э.д.с. в точках разрыва на каждом интервале дискретности ШИМ определяется суммой гладкой и пульсирующих составляющих импульсной последовательности U_u

$$\Delta U_{ui1}(\theta_{i1}) = U_m \cdot \sin[\theta_{i1} + \frac{\pi(m-2)}{2m}]; \tag{10}$$

$$\Delta U_{ui2}(\theta_{i2}) = U_m \cdot \sin[\theta_{i2} + \frac{\pi(m-2)}{2m}];$$

Так как, на интервале действия выходного импульса широтно-импульсного модулятора выходной сигнал выпрямителя $e_в$ инвариантен к изменениям регулируемого параметра γ_i, то

$$\frac{\partial e_в(\theta)}{\partial U_y(\theta)} = \theta_o. \tag{11}$$

С учетом (9)-(11) выражение (8), записанное для n-того интервала дискретности выпрямителя принимает вид

$$\begin{aligned}\Delta e_в(\theta_i) = &-\frac{\Delta U_y(\theta_{i1})}{1!} \cdot U_m \cdot \sin[\theta_{i1} + \frac{\pi(m-2)}{2m}] \cdot \frac{d\theta_{\gamma i1}}{dU_y} \cdot \sum_{i=o}^{k_o} \partial(\theta - \theta_{i1}) - \\ &-\frac{\Delta U_y(\theta_{i2})}{1!} \cdot U_m \cdot \sin[\theta_{i2} + \frac{\pi(m-2)}{2m}] \cdot \frac{d\theta_{\gamma i2}}{dU_y} \cdot \sum_{i=o}^{k_o} \partial(\theta - \theta_{i2}).\end{aligned} \tag{12}$$

Угловые координаты $\theta_{\gamma i1}$ и $\theta_{\gamma i2}$ определяются из условий переключения (2). Для замкнутой структуры, содержащей выпрямитель с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией, условия переключения имеют вид:

- для первой точки встречи (см. рис.2)

$$\Delta U_y(\theta_{i1} + \theta_{\gamma i1}) = U_{on}(\theta_{i1}); \tag{13}$$

- для второй точки встречи

$$\Delta U_y(\theta_{i2} + \theta_{\gamma i2}) = U_{on}(\theta_{i2}). \tag{14}$$

Для малых приращений $\Delta\theta_{\gamma i1}$ и $\Delta\theta_{\gamma i2}$ трансцендентные уравнения (13) и (14) могут быть аппроксимированы относительно начального состояния системы первыми двумя членами ряда Тейлора. В этом случае левые и правые части данных уравнений принимают вид:

- для первой точки встречи

$$\begin{aligned}&\Delta U_y(\theta_{i1} + \Delta\theta_{\gamma i1}) = U_y(\theta_{i1}) + \Delta U_y(\theta_{i1}) + \frac{dU_y(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1}; \\ &\Delta U_{on}(\theta_{i1}) = U_{on}(\theta_{i1}) + \frac{dU_{on}(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1};\end{aligned} \tag{15}$$

- для второй точки встречи

$$\begin{aligned}&\Delta U_y(\theta_{i2} + \Delta\theta_{\gamma i2}) = U_y(\theta_{i2}) + \Delta U_y(\theta_{i2}) + \frac{dU_y(\theta_{i2})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i2}; \\ &U_{yo}(\theta_{i1}) + \Delta U_{yo}(\theta_{i1}) + \frac{dU_{yo}(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1} + U_n(\theta_{i1}) + \frac{dU_n(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1} = U_{on}(\theta_{i1}) + \frac{dU_{on}(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1}.\end{aligned} \tag{16}$$

В замкнутой структуре управляющее воздействие U_y содержит две составляющие

$$U_y(\theta) = U_{yo} + U_n(\theta). \tag{17}$$

Первая составляющая представляет собой задающее воздействие, пропорциональное среднему значению выходного напряжения выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией. Вторая – пропорциональна пульсационной составляющей выходного напряжения выпрямителя, попадающая на вход его системы управления по цепи обратной связи.

Подставив выражения (15) и (16) с учетом (17) в (13) и (14) получим:

- для первой точки встречи

$$U_{yo}(\theta_{i1}) + \Delta U_{yo}(\theta_{i1}) + \frac{dU_{yo}(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1} + U_n(\theta_{i1}) + \frac{dU_n(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1} = U_{on}(\theta_{i1}) + \frac{dU_{on}(\theta_{i1})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i1}; \tag{18}$$

- для второй точки встречи

$$U_{yo}(\theta_{i2}) + \Delta U_{yo}(\theta_{i2}) + \frac{dU_{yo}(\theta_{i2})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i2} + U_n(\theta_{i2}) + \frac{dU_n(\theta_{i2})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i2} = U_{on}(\theta_{i2}) + \frac{dU_{on}(\theta_{i2})}{d\theta}\Delta\theta_{\gamma i2}. \tag{19}$$

Из выражений (18) и (19) легко получить выражения, устанавливающие связь между приращениями сигнала задания ΔU_{yo} и длительностями приращений $\Delta\theta_{\gamma i}$ выходного импульса для обеих точек встречи:

$$\Delta\theta_{\gamma i1}=\frac{U_{yo}(\theta_{i1})+U_n(\theta_{i1})-U_{on}(\theta_{i1})+U_{yo}(\theta_{i1})}{\frac{dU_{on}(\theta_{i1})}{d\theta}-\frac{dU_{yo}(\theta_{i1})}{d\theta}-\frac{dU_n(\theta_{i1})}{d\theta}};\tag{20}$$

$$\Delta\theta_{\gamma i2}=\frac{U_{yo}(\theta_{i2})+U_n(\theta_{i2})-U_{on}(\theta_{i2})+U_{yo}(\theta_{i2})}{\frac{dU_{on}(\theta_{i2})}{d\theta}-\frac{dU_{yo}(\theta_{i2})}{d\theta}-\frac{dU_n(\theta_{i2})}{d\theta}}.\tag{21}$$

В установившемся режиме в соответствии с условием переключения (2)

$$U_{yo}(\theta_{i1})+U_n(\theta_{i1})-U_{on}(\theta_{i1})=0;\tag{22}$$

$$U_{yo}(\theta_{i2})+U_n(\theta_{i2})-U_{on}(\theta_{i2})=0.\tag{23}$$

В результате предельных переходов в выражениях (20) и (21) с учетом (22) и (23) получим:

$$\frac{\Delta\theta_{\gamma i1}}{dU_{yo}(\theta_{01})}=\frac{1}{\frac{dU_{on}(\theta_{01})}{d\theta}-\frac{dU_{yo}(\theta_{01})}{d\theta}-\frac{dU_n(\theta_{01})}{d\theta}};\tag{24}$$

$$\frac{\Delta\theta_{\gamma i2}}{d(\theta)}=\frac{1}{\frac{dU_{on}(\theta_{02})}{d\theta}-\frac{dU_{yo}(\theta_{02})}{d\theta}-\frac{dU_n(\theta_{02})}{d\theta}}.\tag{25}$$

Следует отметить, что в тех случаях, когда передаточная функция приведенной непрерывной части замкнутой системы автоматического регулирования выходных координат выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией имеет разность порядков полиномов знаменателя и числителя меньше двух, управляющее воздействие U_y имеет разрывы первого рода в моменты переключений θ_{0i}.

В таком случае, производные $U_{yo}(\theta_{0i})$ выражениях (24) и (25) равны их левосторонним значениям.

Введя в выражения (24) и (25) обозначение фактора пульсаций [11]

$$F_1^{-1}=1-\frac{\frac{dU_{yo}(\theta_{01})}{d\theta}}{\frac{dU_{on}(\theta_{01})}{d\theta}}-\frac{\frac{dU_n(\theta_{01})}{d\theta}}{\frac{dU_{on}(\theta_{01})}{d\theta}};\tag{26}$$

$$F_2^{-1}=1-\frac{\frac{dU_{yo}(\theta_{02})}{d\theta}}{\frac{dU_{on}(\theta_{02})}{d\theta}}-\frac{\frac{dU_n(\theta_{02})}{d\theta}}{\frac{dU_{on}(\theta_{02})}{d\theta}};\tag{27}$$

получим:

$$\frac{d\theta_{\gamma i1}}{dU_{yo}(\theta_{01})}=-F_1^{-1}\frac{d\theta}{dU_{on}(\theta_{01})};\tag{28}$$

$$\frac{d\theta_{\gamma i2}}{dU_{yo}(\theta_{02})}=-F_2^{-1}\frac{d\theta}{dU_{on}(\theta_{02})}.\tag{29}$$

С учетом выражений (28), (29) выражение (12) принимает вид

$$\begin{aligned}\Delta e_в(\theta_i)=U_m\cdot\sin[\theta_{i1}+\frac{2\pi}{m}]\cdot\Delta U_y(\theta_{i1})F_1^{-1}\frac{d\theta_{i1}}{dU_{on}(\theta_{i1})}\cdot\sum_{i=o}^{k_o}\delta(\theta-\theta_{i1})+\\+U_m\cdot\sin[\theta_{i2}+\frac{2\pi}{m}]\cdot\Delta U_y(\theta_{i2})F_2^{-1}\frac{d\theta_{i2}}{dU_{on}(\theta_{i2})}\cdot\sum_{i=o}^{k_o}\delta(\theta-\theta_{i2}).\end{aligned}\tag{30}$$

Из выражения (30) следует, что для малых приращений сигнала управления выпрямитель с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией представляет собой амплитудо-импульсный модулятор второго рода, в котором передача информации осуществляется двумя каналами. Каждый из каналов содержит статический и динамический коэффициенты передачи, определяемые видом опорного сигнала и пульсирующей составляющей выходного напряжения выпрямителя.

С учетом повторяемости процессов на интервалах дискретности выпрямителя и статических коэффициентов передачи выражение (30) принимает вид

$$\Delta e_в(\theta_i) = \Delta U_y(\theta_{i1})\omega T_1 \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{i=0}^{k_o} K_{i1}F_{i1}\delta(\theta-\theta_{i1}) - \Delta U_y(\theta_{i2})\omega T_2 \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{i=0}^{k_o} K_{i2}F_{i2}\delta(\theta-\theta_{i2}), \quad (31)$$

где; $K_{i1} = \frac{d\theta_{i1}}{dU_{on}(\theta_{i1})}\cdot U_m \cdot \sin[\theta_{i1} + \frac{2\pi}{m}]$; $K_{i2} = \frac{d\theta_{i2}}{dU_{on}(\theta_{i2})}\cdot U_m \cdot \sin[\theta_{i2} + \frac{2\pi}{m}]$.

Выражению (31) соответствует импульсная модель выпрямителя с двухсторонней ШИМ, изображенная на рис. 3.

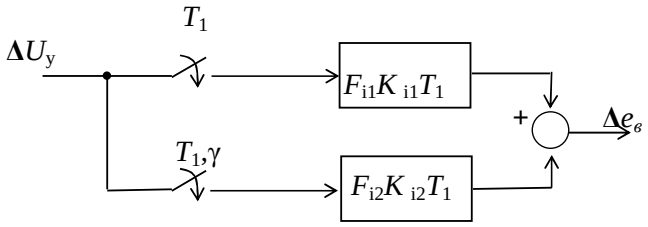


Рис.3. Импульсная модель выпрямителя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией

Модель содержит два идеальных импульсных элемента с периодом квантования равным периоду широтно-импульсной модуляции. Один из импульсных элементов имеет запаздывание квантования входного сигнала на величину длительности выходного импульса широтно-импульсной модуляции. Приведенные непрерывные части содержат информацию о статических K_i и динамических F_i коэффициентах передачи. При отсутствии пульсирующей составляющей выпрямителя данная импульсная модель вырождается в модель, приведенную в [13]. Полученная импульсная модель предназначена для исследования динамических процессов в замкнутых структурах, содержащих выпрямитель с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией.

Из выражения (31) следует, что динамическая связь между приращениями управляющего воздействия ΔU_y и выходного сигнала $\Delta e_в$ имеет переменный характер на каждом интервале дискретности широтно-импульсного модулятора, что вызывается изменениями K_i и F_i. Данное свойство необходимо учитывать при описании динамических процессов замкнутой системы в которой реализуется предельное быстродействие.

Список литературы; 1.*Bjaresten N. A.* The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier/ N. A. Bjaresten // Direct Current.-1963.-Vol.6.-P.154-165. **2.** Замкнутые системы преобразования электрической энергии /Под ред. В.Я. Жуйкова.- К.: Техніка.-1989.-320с. **3.** *Чикотило И.И.* Исследование устойчивости и переходных режимов тиристорных широтно-импульсных преобразователей в быстродействующих замкнутых системах – Дис…канд. техн. наук 05.09.12- Харьков, 1979.-239с. **4.***Щербак Я.В.* Теоретические основы и методы регулирования субгармоник полупроводниковых преобразователей электроэнергии - Дис…доктора. техн. наук 05.09.12- Харьков, 2001.-408с. **5.** *Щербак Я.В.* Широтно-импульсный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией второго рода в условиях несимметрии // Технічна електродинаміка .- 1999.-№1.-С.31-35. **6.** *Grzegorz Benysek ,Marian Pasko* Editors Power Theories for Improved Power Quality.- Springer-Verlag London 2012.-216p. **7.** Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits / Sanders [et al] //IEEE Trans. Power Elektron. Vol.2. NO.2.1991.-P.71-81. **8.** *Мелешин В.И., Овчинников Д.А.* Управление транзисторными преобразователями электроэнергии._ М.:ТЕХНОСФЕРА.-2011.-575с. **9.** *Розанов Ю.К.* Основы силовой электроники .-М.: Энергоатомиздат.-1992.-296с. **10.** *Розенвассер Е.Н.* Периодически нестационарные системы управления.- М.:Наука.-1973.-511с. **11.** *Шипилло В.П., Зинин Ю.С.* Фактор пульсаций в системах регулирования с вентильными преобразователями //Электричество.- 1977.-№3.-С.86-89. **12.** *Щербак Я.В.* Динамические характеристики выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией / Я.В. Щербак, Ивакина Е.Я. // Технічна електродинаміка.- Київ, 2014.-№3.-С.47-51. **13.** *Поздеев А.Д.* Динамическая модель для малых отклонений систем с двусторонней широтно-импульсной модуляцией/ Поздеев А.Д., Никитин В.М., Пименов В.М. //Электричество.-1981.-№9.-С.66-69.

Bibliography (transliterated): 1.*Bjaresten N. A.* The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier/ N. A. Bjaresten // Direct Current.-1963.-Vol.6.-P.154-165. **2.** Zamknutыe systemы preobrazovanyya эlektrycheskoy эnerhyy /Pod red. V.Ya. Zhuykova.- K.: Tekhnika.-1989.-320s. **3.** *Chykotylo Y.Y.* Yssledovanye ustoychyvosty y perekhodnыkh rezhymov tyrystornыkh shyrotno-ympul'snыkh preobrazovateley v bыstrodeystvuyushchykh zamknutыkh systemakh – Dys…kand. tekhn. nauk 05.09.12- Khar'kov, 1979.-239s. **4.** *Shcherbak Ya.V.* Teoretycheskye osnovы y metodы rehulyrovanyya subharmonyk poluprovodnykovыkh preobrazovateley эlektroэnerhyy - Dys…doktora. tekhn. nauk 05.09.12- Khar'kov, 2001.-408s. **5.** *Shcherbak Ya.V.* Shyrotno-ympul'snыy preobrazovatel' s shyrotno-ympul'snoy modulyatsyey vtoroho roda v uslovyyakh nesymmetryy // Tekhnichna elektrodynamika .-1999.-#1.-C.31-35. **6.** *Grzegorz Benysek ,Marian Pasko* Editors Power Theories for Improved Power Quality.- Springer-Verlag London 2012.-216p. **7.** Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits / Sanders [et al] //IEEE Trans. Power Elektron. Vol.2. NO.2.1991.-P.71-81. **8.** *Meleshyn V.Y., Ovchynnykov D.A.* Upravlenye tranzystornыmy preobrazovatelyamy эlektroэnerhyy._ M.:TEKhNOSFERA.-2011.-575s. **9.** *Rozanov Yu.K.* Osnovы sylovoy эlektronyky .-M.: Эnerhoatomyzdat.-1992.-296s. **10.** *Rozenvasser E.N.*Peryodychesky nestatsyonarnыe systemы upravlenyya.- M.:Nauka.-1973.-511s. **11.** *Shypyllo V.P.* Faktor pul'satsyy v systemakh rehulyrovanyya s ventyl'nыmy preobrazovatelyamy / Shypyllo V.P., Zynyn Yu.S. //Эlektrychestvo.- 1977.-#3.-S.86-89. **12**. *Shcherbak Ya.V.* Dynamycheskye kharakterystyky vыpryamytelya s shyrotno-ympul'snoy modulyatsyey / Ya.V. Shcherbak, Yvakyna E.Ya. // Tekhnichna elektrodynamika.- Kyyiv, 2014.-#3.-S.47-51. **13.** *Pozdeev A.D.* Dynamycheskaya model' dlya malыkh otklonenyy system s dvustoronney shyrotno-ympul'snoy modulyatsyey/ Pozdeev A.D., Nykytyn V.M., Pymenov V.M. //Эlektrychestvo.-1981.-9.-S.66-69.

Поступила (received) 27.08.2015

УДК 519.248:621.86:621.313.2

А. П. КУШНІР, канд. техн. наук, доц. ЛДУБЖД;
В. М. ОКСЕНТЮК, канд. техн. наук, директор СКБ ЕМС НУ «ЛП»;
Т. О. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук, доц. НУ «ЛП»;
С. В. ЩЕРБОВСЬКИХ, д-р. техн. наук, с.н.с. НУ «ЛП»

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ ПОВОРОТУ ПЛАТФОРМИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДЙОМНИКА

Вступ. Для проведення рятувальних робіт та подачі вогнегасної речовини безпосередньо в осередок пожежі застосовують спеціальну пожежно-аварійну техніку, зокрема, висотні автопідйомники та автодрабини. До складу висотних автопідйомників та автодрабин входить велика кількість систем, від надійної роботи яких залежить життя та здоров'я рятувальників та потерпілих. Однією із таких систем є система повороту платформи, яка характеризується змінним моментом інерції, змінними статичним і динамічним навантаженням, великою масою. Непрацездатність цієї системи унеможливлює проведення пожежно-рятувальних робіт.

Постановка проблеми. Під час проектування нових та модернізації існуючих систем повороту платформи пожежного автопідйомника важливим етапом є забезпечення заданого рівня їх надійності [1]. Цей етап проектування зводиться не лише до визначення сумарного показника надійності, але й передбачає аналіз причин непрацездатності таких систем та розроблення рекомендацій щодо підвищення їх надійності. Базовою складовою системи повороту платформи є привод. В такій системі навантаження елементів гідравлічного та ручного приводів залежить від стану гідравлічного приводу. Якщо гідравлічний привод працездатний, то ручний перебуває у ненавантаженому стані. Якщо гідравлічний привод непрацездатний, то ті його елементи, які залишились працездатними, є ненавантаженими. Дана публікація присвячена актуальній проблемі підвищення точності аналізу причин непрацездатності системи повороту платформи шляхом врахування впливу зміни навантаження елементів, яке зумовлено зміною стану функціонування гідравлічного приводу.

Аналіз останніх досліджень. Для визначення ймовірнісних характеристик причин непрацездатності систем виділяємо два підходи [2]. Перший ґрунтується на складанні дерева відмов системи, яке аналізують логіко-ймовірнісним методом [3, 4]. Зміст цього підходу полягає у тому, що на основі дерева відмов складають логічні умови, які відповідають причинам непрацездатності системи, а потім їх перетворюють у ймовірнісні вирази. Такий підхід простий у застосуванні, проте на його основі не можна коректно враховувати процеси, пов'язані зі зміною навантаження елементів. Другий підхід базується на побудові динамічного дерева відмов системи, для аналізу якого застосовують кілька різних методів. Зокрема, в [5] динамічне дерево відмов перетворюють у мережу Петрі, кількісний аналіз якої виконують методом Монте-Карло. Недоліком цього методу є спотворення результатів моделювання стохастичними флуктуаціями, а також значні часові затрати на обчислення. В [6, 7] динамічне дерево відмов перетворюють у марковську модель, яку обчислюють чисельним методом. Недолік цього методу полягає у високій розмірності марковської моделі, а також у її обмеженні експоненціальним розподілом. Для послаблення обмеження експоненціальним розподілом необхідно застосувати розщеплення простору станів [8–10], яке забезпечує адекватне врахування запам'ятовування передісторії напрацювання елементів системи за навантаженням.

У цій статті розв'язано такі завдання:

- математично описано надійність системи повороту платформи пожежного автопідйомника на основі динамічного дерева відмов;
- побудовано модель станів та подій і марковську модель системи повороту платформи;
- визначено кількісні характеристики причин непрацездатності системи повороту платформи.

Матеріали дослідження.

Опис системи та її динамічне дерево відмов. Нехай досліджувана у роботі система повороту платформи складена із п'яти елементів: гідравлічний насос 1, гідравлічний розподільник 2, гідравлічний двигун 3, ручний привод 4 та редуктор 5. Структурна схема надійності системи подана на рис. 1.

Гідравлічний привод, який складається із гідравлічного насоса 1, гідравлічного розподільника 2 та гідравлічного двигуна 3, утворюють основну підсистему, а ручний привод 4 — резервну. Обидві підсистеми, незалежно одна від одної, можуть привести у рух шестерню редуктора 5, яка забезпечує обертання платформи пожежного автопідйомника. Якщо гідравлічний привод працездатний, то ручний перебуває в холодному резерві. Вважаємо, що у холодному резерві ручний привод відмовити не може. Якщо гідравлічний привод непрацездатний, то його функцію тимчасово виконує ручний привод, який переходить у навантажений режим.

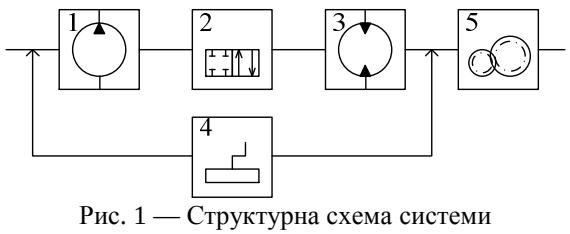


Рис. 1 — Структурна схема системи

© А. П. Кушнір, В. М. Оксентюк, Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських

Вважаємо, що у непрацездатному гідравлічному приводі ті елементи, які залишились працездатними, переходять у ненавантажений режим і відмовити у такому стані не можуть. Після ремонтування відновлений елемент за експлуатаційними характеристиками вважаємо аналогічним новому, а інші працездатні елементи такими, що мають попереднє напрацювання.

Формалізуємо надійність системи динамічним деревом відмов, структура якого подана на рис. 2. Динамічне дерево відмов є математичною моделлю, яка описує умову непрацездатності системи та умови зміни навантаження між її елементами на основі блоків, які позначають логічні операції та операції відношення.

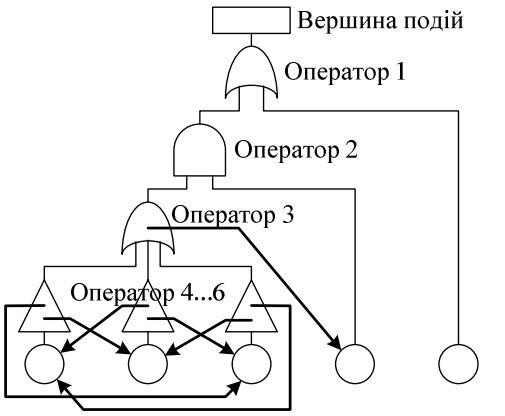


Рис. 2. Динамічне дерево відмов системи

Непрацездатність системи позначена блоком «Вершина подій». Така подія є катастрофічною, тобто поки вона не відбулась, допускається ремонтування будь-якого елемента системи. Якщо непрацездатність наступила, то подальше ремонтування елементів системи не розглядаємо. Непрацездатність системи настає, якщо непрацездатний привод або редуктор, що описано блоком «Оператор 1», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність приводу настає, якщо непрацездатні одночасно гідравлічний та ручний приводи, що описано блоком «Оператор 2», тип якого задано логічною операцією І. Непрацездатність гідравлічного приводу настає у разі відмови хоча б одного із його елементів 1–3, що описано блоком «Оператор 3», тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність гідравлічного насоса 1, гідравлічного розподільника 2 та гідравлічного двигуна 3 позначено блоками «Базова подія 1»–«Базова подія 3», а напрацювання таких елементів до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_1 і β_1, α_2 і β_2, α_3 і β_3. Непрацездатність ручного приводу 4 позначено блоком «Базова подія 4», а його напрацювання до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_4 і β_4. В свою чергу, непрацездатність редуктора 5 позначено блоком «Базова подія 5», а його напрацювання до відмови розподілено за законом Вейбулла із параметрами α_5 і β_5.

У системі відбуваються з точки зору надійності два динамічних явища:

- зміна навантаження ручного приводу залежно від стану гідравлічного приводу;
- зміна навантаження елементів гідравлічного приводу залежно від стану гідравлічного приводу в цілому.

Для опису першого явища задамо у блоці «Оператор 3» умови зміни навантаження. Якщо на вхід цього блоку подається логічний сигнал ХИБНО, тобто гідравлічний привод працездатний, то інтенсивність процесу напрацювання ручного приводу 4, заданого блоком «Базова подія 4», становить 0.

Для опису другого явища введемо у структуру динамічного дерева відмов блоки «Оператор 4», «Оператор 5» та «Оператор 6», які є повторювачами логічного сигналу, і задамо у них умови зміни навантаження. Якщо на вхід блоку «Оператор 4» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний насос 1 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного розподільника 2, заданого блоком «Базова подія 2» та гідравлічного двигуна 3, заданого блоком «Базова подія 3», становить 0. Для двох наступних повторювачів формуємо логічні умови зміни навантаження за аналогією. Якщо на вхід блоку «Оператор 5» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний розподільник 2 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного насоса 1, заданого блоком «Базова подія 1», та гідравлічного двигуна 3, заданого блоком «Базова подія 3», становить 0. І, відповідно, якщо на вхід блоку «Оператор 6» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто гідравлічний двигун 3 непрацездатний, то інтенсивність процесу напрацювання гідравлічного насоса 1, заданого блоком «Базова подія 1», та гідравлічного розподільника 2, заданого блоком «Базова подія 2», становить 0.

Модель станів та подій. На підставі поданого вище динамічного дерева відмов системи згідно із формалізованими правилами [10] складено модель станів та подій системи повороту платформи. Така модель є математичним описом станів, в яких може перебувати система, та подій, які у ній можуть відбуваються, у проекційному зв'язку до процесів, що у ній протікають. Граф такої моделі подано на рис. 3, а її параметри у табл. 1. У моделі станів та подій процеси напрацювання і ремонтування для гідравлічного насоса 1 позначено як P_1 та P_6, для гідравлічного розподільника 2 — P_2 та P_7 та для гідравлічного двигуна 3 — P_3 та P_8. Процес напрацювання для ручного приводу 4 позначено як P_4 та для редуктора — P_5. Оскільки відмова ручного приводу та редуктора призводить одразу до катастрофічної відмови системи, то ремонтування цих елементів у даній моделі не розглядаємо. На рис. 3 працездатні стани системи позначені колом, яке зафарбоване білим, а непрацездатні стани — колом, яке зафарбоване сірим. Система перебуває в одинадцяти станах, із яких чотири відповідають працездатності — S_8–S_{11}. Непрацездатні стани згруповано у чотири множини C_1–C_4, кожна із яких відповідає окремій причині непрацездатності системи. Перша множина C_1 відповідає непрацездатності системи внаслідок відмови гідравлічного двигуна та ручного приводу. В таку множину входить один непрацездатний стан S_7. Друга множина C_2 — внаслідок відмови гідравлічного розподільника та ручного приводу, і включає один непрацездатний стан S_6; третя множина C_3 — внаслідок відмови гідравлічного двигуна та ручного

приводу, і включає один непрацездатний стан S_5; та четверта множина C_4 — внаслідок відмови редуктора, і включає чотири непрацездатних стани S_1–S_4.

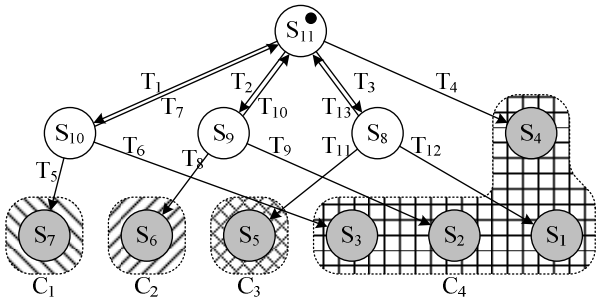


Рис. 3. Граф станів та переходів системи

У системі відбувається тринадцять подій, із яких сім спричиняють катастрофічну відмову — T_4, T_5, T_6,T_8, T_9, T_{11} та T_{12}. Параметрами станів є значення коефіцієнтів масштабування для процесів P_1–P_8 та логічна функція *y*, яка набуває значення «1», якщо система працездатна, та «0» — якщо ні. Параметрами подій є назва початкового стану, назва процесу, який завершився, та назва кінцевого стану.

Таблиця 1 — Параметри моделі станів та подій системи

№	Опис станів											Опис подій		
	Поч. стан	Графічний опис стану	Коефіцієнти масштабування								*y*	Назва події	Заверш. процес	Кінц. стан
			P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8				
1	S_{11}		1	1	1	0	1	0	0	0	1	T_1	P_1	S_{10}
2												T_2	P_2	S_9
3												T_3	P_3	S_8
4												T_4	P_5	S_8
5	S_{10}		0	0	0	1	1	0	0		1	T_5	P_4	S_3
6												T_6	P_5	S_7
7												T_7	P_6	S_8
8	S_9		0	0	0	1	0	1	0		1	T_8	P_4	S_2
9												T_9	P_5	S_7
10												T_{10}	P_7	S_8
11	S_8		0	0	0	1	0	0	1		1	T_{11}	P_4	S_1
12												T_{12}	P_5	S_7
13												T_{13}	P_8	S_8
14	S_7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
15	S_6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
16	S_5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
17	S_4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
18	S_3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
19	S_2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—
20	S_1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—

Ґрунтуючись на моделі станів та подій системи повороту платформи на основі тензорних виразів [10] сформована розщеплена однорідна марковська модель, яка містить 352 диференціальних рівняння.

Ймовірнісні характеристики системи. Значення параметрів для елементів системи повороту платформи взято такими: α_1 = 4 000 год., α_2 = 6000 год., α_3 = 5 000 год. $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ = 1.2; α_4 = 3000 год., β_4 = 1.3; α_5 = 200 000 год., β_4 = 1.1, інтенсивність відновлення μ = 0.02 1/год. На основі розщепленої однорідної марковської моделі обчислено ймовірнісні характеристики причин непрацездатності системи, які подано на рис. 4, а ймовірнісні показники для тривалості експлуатації 10 000 год. — у табл. 2. Крива 1 відповідає ймовірності непрацездатності системи внаслідок відмови гідравлічного насоса та ручного приводу, крива 2 — гідравлічного розподільника та ручного приводу, крива 3 — гідравлічного двигуна та ручного приводу і крива 4 — редуктора. На підставі одержаних ймовірнісних показників робимо висновок, що для зменшення ймовірності непрацездатності системи повороту платформи для моменту часу 10 000 год. необхідно вжити заходів щодо підвищення безвідмовності редуктора, оскільки його відмова є найімовірнішою причиною відмови системи із відносною вагою 46.55 %.

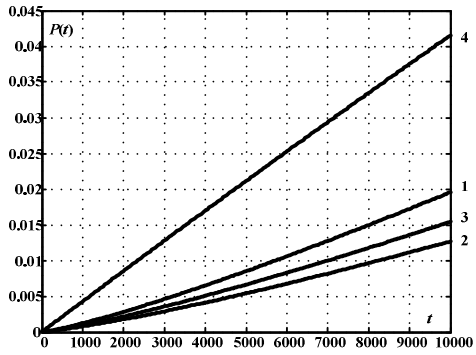


Рис. 4. Криві ймовірнісних характеристик причин непрацездатності системи

Таблиця 2 — Ймовірнісні показники причини непрацездатності системи

№	Опис причини непрацездатності		Ймовірність причини	Відносна вага причини
	За елементами	За станами		
C_4	Редуктор	S_1– S_4	0.041530	46.55 %
C_1	Гідравлічний насос — ручний привод	S_7	0.019563	21.93 %
C_3	Гідравлічний двигун — ручний привод	S_5	0.015435	17.30 %
C_2	Гідравлічний розподільник — ручний привод	S_6	0.012684	14.22 %

Висновки. У статті розроблено математичну модель надійності системи повороту платформи пожежного автопідйомника, призначену для кількісного аналізу причин її непрацездатності. Надійність системи математично описано динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови зміни навантаження елементів системи залежно від стану гідравлічного приводу. Ймовірнісні характеристики системи визначено за марковською моделлю, в якій на основі тензорних виразів розщеплення простору станів враховано зміну навантаження між елементами системи, тривалість напрацювання до відмови яких розподілена за законом Вейбулла. Показано, що найімовірнішою причиною непрацездатності системи є відмова редуктора.

Подальші дослідження скеровані на розроблення удосконаленої моделі надійності системи повороту платформи, в якій буде враховано такі елементи, як резервний ручний насос та обладнання, яке приводить у рух гідравлічний насос.

Список літератури: 1. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT): ДСТУ EN 14043:2008. — [Чинний від 2008-12-26]. — К., Держспоживстандарт України, 2008. — 176 с. **2.** *Chiacchio F.* Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches [Text] / *F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, et al.* // Reliability Engineering & System Safety. — 2011. — Vol. 96, No. 11. — P. 1515–1526. **3.** *Vega M.* Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets [Text] / *M. Vega, H. G. Sarmiento* // Industry Applications, IEEE Transactions on. — 2008. — Vol. 44, No. 6. — P. 1851–1858. **4.** *Wei-Chang Yeh.* A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks [Text] / *Wei-Chang Yeh* // Reliability Engineering & System Safety. — 2006. — Vol. 91, No 1. — P. 36–43. **5.** *Khanh Nguyen T. P.* Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a Satellite-based railway system [Text] / *T. P. Khanh Nguyen, Julie Beugina, Juliette Marais* // Reliability Engineering & System Safety. — 2015. — Vol. 133. — P. 300–313. **6.** *Manno G.* Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism [Text] / *G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, N. Trapani* // Reliability Engineering &System Safety. — 2014. — Vol. 121, No 1. — P.250–262. **7.** *Daniele Codetta-Raiteri.* Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power [Text] / *Daniele Codetta-Raiteri* // Reliability Engineering & System Safety. — 2011. — Vol. 96, No. 5. — P. 534–544. **8.** *Shcherbovskykh S.* Failure intensity determination for system with standby doubling [Text] / *S. Shcherbovskykh, O. Lozynsky, Ya. Marushchak* // Przeglad Elektrotechniczny. — 2011. — Vol. 87, No 5. — P. 160–162. **9.** *Mandziy B.* Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component [Text] / *B. Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskykh* // Przeglad Elektrotechniczny. — 2013. — Vol. 89, No 11. — P. 244–247. **10.** *Щербовських С. В.* Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: монографія [Текст] / С. В. Щербовських. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. — 296 с.

Bibliography (transliterated): 1. Fire Alarm Systems and notification. Part 14. Guidelines for building, designing, installing, commissioning, operating manual and maintenance (CEN/TS 54-14: 2004, IDT). DSTU-H CEN/TS 54-14: 2009 (2004) Kyiv: Derzspozuvstandart of Ukraine, 2004. **2.** *Chiacchio, F., Compagno, L., D'Urso, D. et al.* (2011). Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches, Reliability Engineering & System Safety, 96, 11, 1515–1526. **3.** *Vega, M., Sarmiento, H. G.* (2008). Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets, Industry Applications, IEEE Transactions on, 44, 6, 1851–1858. **4.** *Wei-Chang Yeh.* (2006). A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks, Reliability Engineering & System Safety, 91, 1, 36–43. **5.** *Khanh Nguyen, T. P., Julie Beugina, Juliette Marais.* (2015) Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a satellite-based railway system, Reliability Engineering & System Safety, 133, 300–313. **6.** *Manno, G., Chiacchio, F., Compagno, L., D'Urso, D.,Trapani, N.* (2014). Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism. Reliability Engineering &System Safety, 121, 1, 250–262. **7.** *Daniele Codetta-Raiteri.* (2011). Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power. Reliability Engineering & System Safety, 96, 5, 534–544. **8.** *Shcherbovskykh, S., Lozynsky, O., Marushchak, Ya.* (2011). Failure intensity determination for system with standby doubling. Przeglad Elektrotechniczny, 87, 5, 160–162. **9.** *Mandziy, B., Lozynsky, O., Shcherbovskykh, S.* (2013). Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component. Przeglad Elektrotechniczny, 89, 11, 244–247. **10.** *Shcherbovskykh, S.* (2012). Matematichni modeli ta metodi dlya viznachennya harakteristik nadiynosti bahatoterminalnih system iz urahuvannyam pererozpodilu navantazhennya: monohrafiya, *Lviv, Vidavnitstvo Lvivska Politehnika*, 296.

Надійшла (received) 30.06.2015

УДК 621.311

В. Г. ЯГУП, д-р техн. наук, проф. ХНУГХ имени А.Н.Бекетова
Е. В. ЯГУП, канд. техн. наук, доц. УкрГУЖТ

ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ С СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ, УПРАВЛЯЕМЫМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ

Введение. Электроснабжение реальных потребителей сопровождается рядом нежелательных явлений, ухудшающих условия работы питающей сети и всей системы электроснабжения в целом. Такими факторами, обусловливающими ухудшение технико-экономических показателей системы электроснабжения, являются возникновение несимметрии, генерация высших гармоник, а также реактивный характер самой нагрузки. Асинхронные двигатели являются одними из наиболее распространенных, массовых электропотребителей, генерирующих реактивную мощность. На их долю относят до 65% всей реактивной энергии, потребляемой в системе электроснабжения. По этой причине весьма актуальным является вопрос компенсации реактивной мощности, обусловленной работой асинхронного двигателя. Конденсаторная компенсация реактивной мощности представляет собой наиболее простой метод борьбы с нежелательными неактивными составляющими мощности. Достаточно подробно вопрос выбора параметров компенсирующих устройств рассмотрен в фундаментальных трудах киевских ученых [1,2]. В работах [3-6] предложены и успешно реализованы алгоритмы решения этой задачи на основе оптимизационных алгоритмов. В то же время в последнее десятилетие проводятся интенсивные исследования по разработке и внедрению силовых активных фильтров [7-9]. Эти устройства реализованы на силовых полупроводниковых приборах и оснащены интеллектуальной системой управления, обеспечивающей компенсацию реактивной мощности, мощности несимметрии и паразитных высших гармонических составляющих токов и напряжений в системе электроснабжения. Алгоритмы работы систем управления достаточно сложны и основаны на измерениях токов и напряжений в системе с последующими математическими преобразованиями для получения необходимой информации, на основе которой формируются токи, инжектируемые силовым активным фильтром в собственно систему электроснабжения.

Постановка задачи. В настоящей работе поставлена задача применить алгоритмы поисковой оптимизации для обеспечения работы силового активного фильтра, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронного двигателя, а также реализовать предложенные методы на компьютерной модели и проверить работоспособность такой системы в целом.

Материалы исследования. Модель системы электроснабжения асинхронного двигателя в укрупненном структурном виде представлена на рис.1. Здесь элементы системы представлены блоками, соединенными друг с другом через внешние выводы. Блок SES представляет собой собственно систему электроснабжения, блок SAF – силовая часть активного фильтра, блок CJNTROL system – система управления активным фильтром.

На рис.2 приведена модель собственно системы электроснабжения асинхронного двигателя SES. В качестве модели двигателя используется библиотечная модель SimPowerSystem типа 10HP 460 V 60 Hz 1760 RPM. В качестве входа по механическому воздействию выбран из раскрывающегося списка вариант “Torque”, и в качестве нагружающего момента подан постоянный момент величиной 20 Нм. Тип ротора задан Squirrel-cage, что соответствует варианту короткозамкнутого ротора. Номинальная мощность составляет 7460 ВА, линейное питающее напряжение задано 460 В, частота питающей сети – 60 Гц. Активное сопротивление статорной обмотки – 0.6837 Ом, её индуктивность – 0.004162 Гн. Для ротора соответствующие величины составляют 0.451 Ом и 0.004152 Гн. Взаимная индуктивность между статорном и ротором задана величиной 0.1486 Гн. Момент инерции двигателя принят 0.05 кгм^2, коэффициент вязкого трения – 0.008141 Нмс, число пар полюсов p= 2. Асинхронный двигатель зашунтирован резистивной звездой с большими значениями сопротивлений резисторов (10^5 Ом) для того, чтобы произвести развязывание некорректных топологических ситуаций. Они обусловлены наличием индуктивных сечений, образуемых катушками индуктивностей линий электропередачи, силового активного фильтра и статорными индуктивностями асинхронного двигателя. Подмодель подачи внешнего механического момента позволяет производить его наброс на 20 Нм в момент 0.7 с при помощи единичной ступеньки и блока умножения, а также подсоединять начальный момент 10 Нм при пуске двигателя.

Для получения информации о мощностях на двигателе и источнике питания применяются виртуальные измерители мощности, на вход каждого из которых подаются соответствующие напряжения и токи. Измерения мощности на асинхронном двигателе осуществляется по схеме двух пар приборов (линейные вольтметры и фазные амперметры), а аналогичные измерения на стороне источников электрической энергии производятся по схеме трех пар приборов (фазные напряжения и фазные токи). На регистрирующие приборы выводятся суммарные активные мощности для сопоставления потребляемой и отдаваемой энергии. Блок измерения электрических и механических величин асинхронного двигателя выводит на виртуальные осциллографы токи статора по фазам А, В и С, а также угловую скорость и развиваемый двигателем электромагнитный момент.

©В.Г.Ягуп, Е.В.Ягуп, 2015

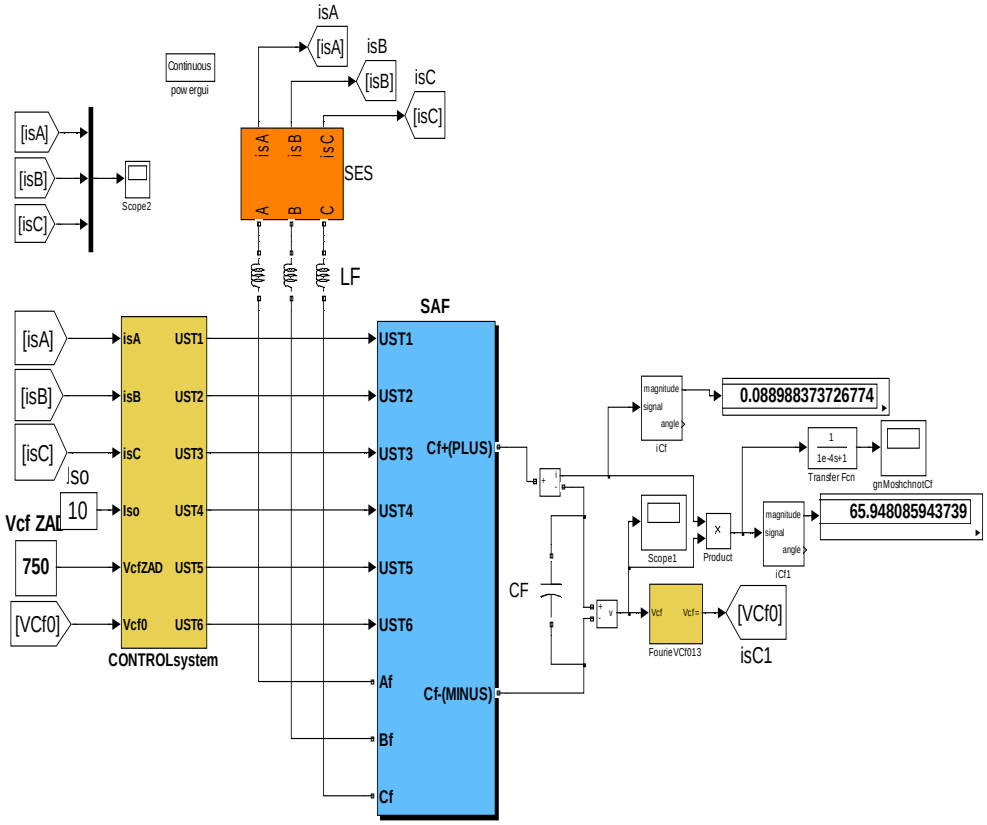


Рис.1. Структурная схема исследуемой системы электроснабжения асинхронного двигателя с силовым активным фильтром

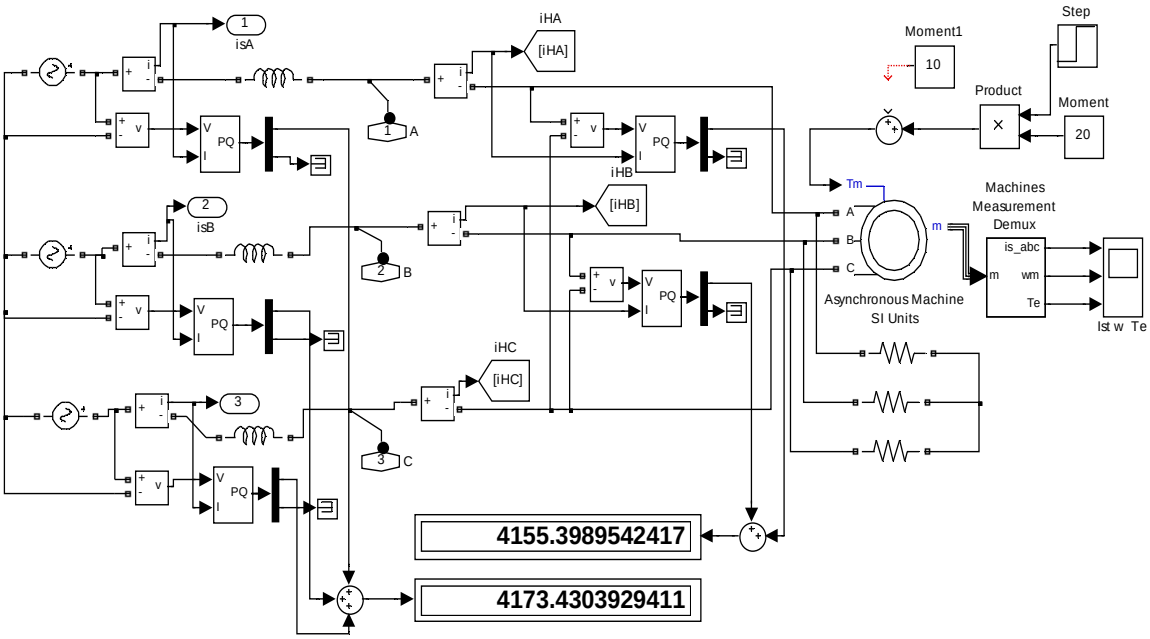


Рис 2. Система собственно электроснабжения асинхронного двигателя

Полупроводниковая силовая схема активного фильтра собрана по схеме трехфазного инвертора (рис.3).

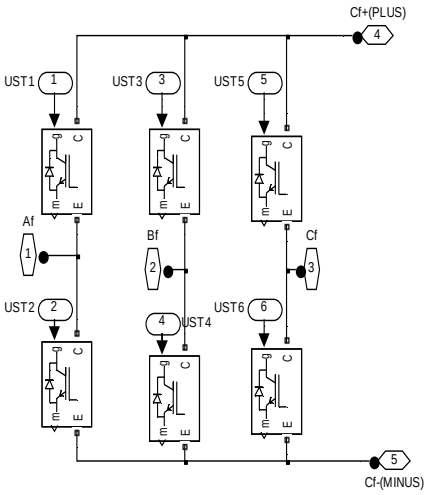


Рис.3. Силовая схема активного фильтра

В качестве силовых полупроводниковых приборов использованы IGBT-транзисторы, шунтированные обратными диодами. Параметры эквивалентных резисторов, отображающих сопротивления полупроводниковых пар в состояниях прямой и обратной проводимости, соответственно равны 10^{-3} и 10^{+5} Ом. Снабберные цепи исключены из моделей. Управляющие сигналы на каждый IGBT-транзистор формируются в системе управления отдельным каналом и подаются на управляющие зажимы транзисторов через входные клеммы подмодели силовой схемы активного фильтра.

С диагоналей фильтра снимаются силовые сигналы, которые через буферные индуктивности фильтра подаются в силовую схему питания двигателя. К общей диагонали подсоединен накопительный конденсатор емкостью 50 мкФ.

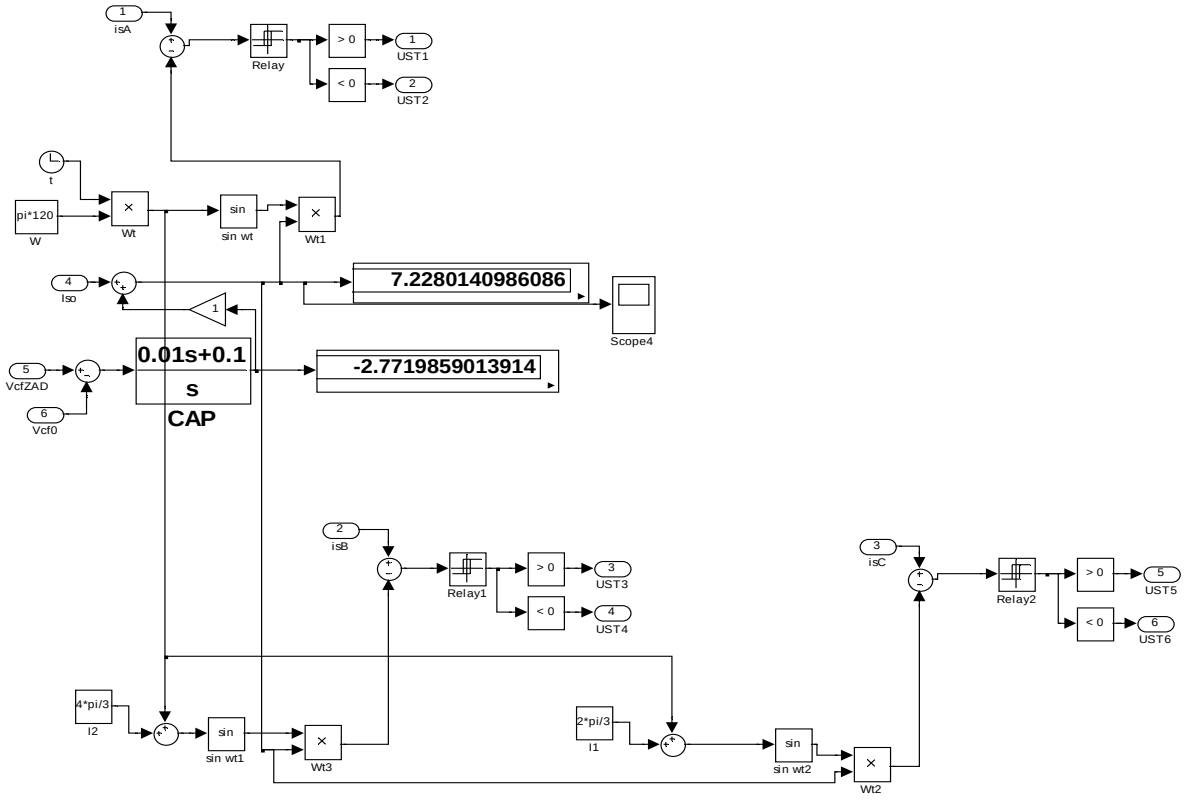


Рис.4 Модель системы управления силовым активным фильтром

Модель системы управления силовым активным фильтром (рис.4) содержит три канала управления – по одному на каждое плечо инвертора. Широтно-импульсная модуляция обеспечивается релейными элементами с достаточно малой величиной гистерезисной зоны (0,25 А). Для каждого канала отслеживается токи фаз источников электрической энергии, которые сравниваются с задающими токами, причем каждый из задающих токов совпадает по фазе с напряжением соответствующего источника напряжения, отображающего источник питания в этой фазе. Поскольку амплитуды всех фазных токов должны быть равными, задачей оптимизации является определение оптимального значения этой амплитуды. Ранее используемый в [4] алгоритм построения процесса оптимизации с нахождением значения целевой функции путем прогона модели системы электроснабжения в данном случае нерационален, хотя и принципиально возможен. Для достижения установившегося режима в данной системе требуется расчет большого количества периодов питающего напряжения. С одной стороны,

моделі нужно пройти интервал времени, необходимый для установления механического режима. Это связано с инерционными механизмами, и время затухания механических процессов на один-два порядка превышает время установления электромагнитных процессов. С другой стороны, наличие полупроводниковых приборов, управляемых релейно-гистерезисной системой управления, принуждает модель двигаться в процессе моделирования достаточно медленно из-за необходимости отрабатывать переключения полупроводниковых приборов в пределах узкой зоны гистерезиса. С учетом этих обстоятельств в систему управления добавлены элементы автоматического управления, которые, в сущности, и берут на себя функцию оптимизации режима. Ключевым свойством является то обстоятельство, что при минимизации разностей активных мощностей, потребляемых системой, и отдаваемых источниками, напряжение на накопительном конденсаторе стабилизируется на постоянном уровне. При отклонении от оптимального режима напряжение конденсатора будет либо нарастать (накачка конденсатора при завышенной мощности, отбираемой от источников), либо убывать (истощение заряда конденсатора при недостатке мощности, отбираемой от источников). В данной системе управление напряжение задания (750 В) сравнивается с постоянной составляющей напряжения на конденсаторе, определяемо в процессе движения модели с помощью виртуального прибора разложения в ряд Фурье напряжения на конденсаторе. Разность подается на пропорционально-интегральный регулятор, и получаемы сигнал управления добавляется к амплитудам всех задающих токов силового фильтра.

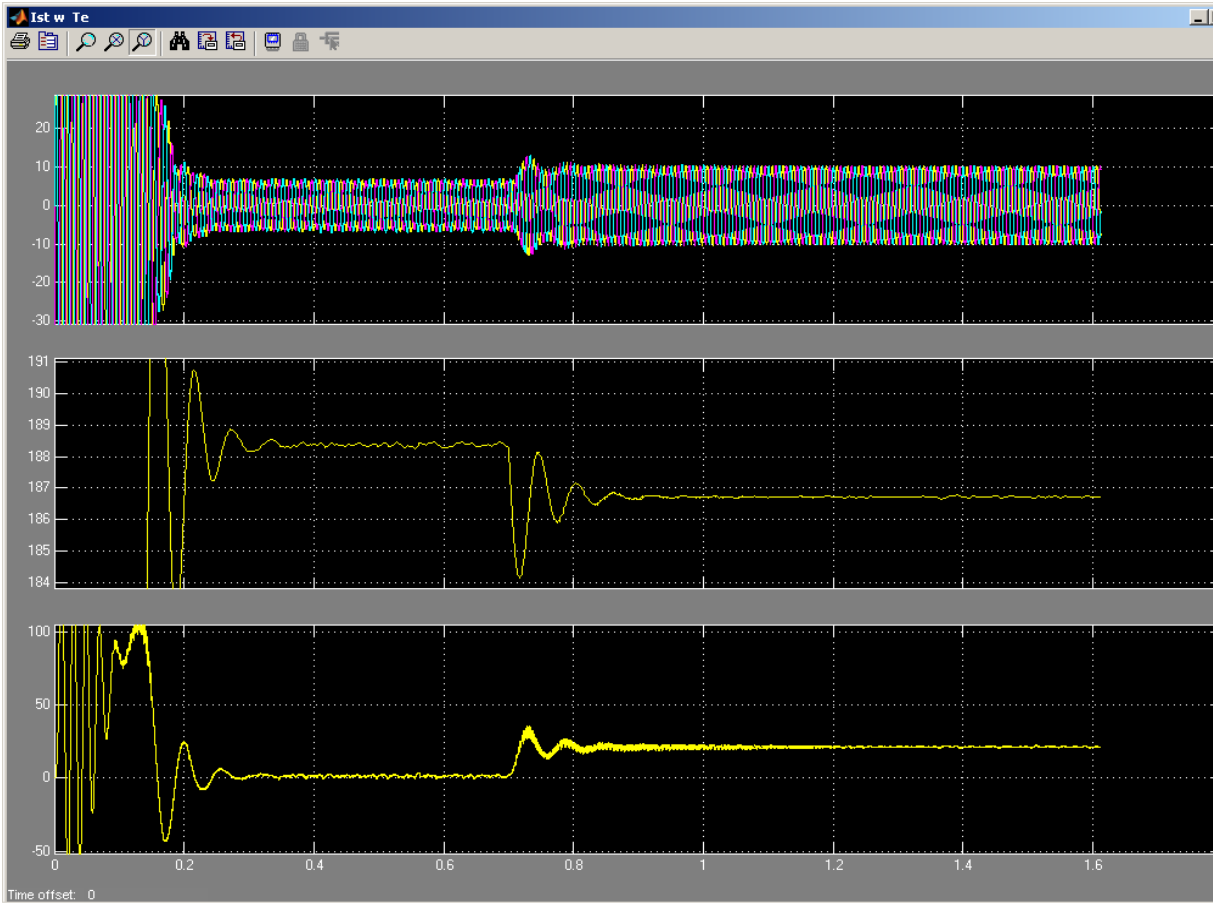


Рис. 5.Временные диаграммы токов статора, скорости вращения и электромагнитного момента асинхронного двигателя

Результаты моделирования системы с фильтром подтверждают ее работоспособность. Н рис.5 приведены диаграммы выходных величин модели асинхронно двигателя. До момента времени 0,2 с протекает характерный процесс прямого пуска асинхронного двигателя на холостом ходе. При установлении холостого хода развиваемый электромагнитный момент преодолевает момент вязкого трения (около 1,5 Нм). При набросе момента в запрограммированный момент времени 0,7 с переходный процесс приводит к увеличению электромагнитного момента двигателя до 21,5 Нм. При этом скорость вращения несколько снижается, а фазные токи увеличиваются. При этом двигатель работает с недогрузом и потребляет существенную реактивную мощность, соизмеримую с активной мощностью, идущей на выполнение полезной работы. Амплитуды токов в статорных обмотках

двигателя несколько превышает 10 А. В то же время благодаря компенсирующему действию активного фильтра, амплитуды фазных токов в источниках и линиях электропередачи составляют величину 7,23 А (это видно и из временных диаграмм, и из показаний приборов в системе управления), что существенно меньше в сравнении с токами в статорных обмотках асинхронного двигателя. Ток уставки принимался равным 10 А по амплитуде, во всех случаях постоянная составляющая напряжения на накопительном конденсаторе в установившемся режиме при любой механической нагрузке весьма близка к напряжению задания 750 В. Это свидетельствует о правильной работе оптимизирующего узла системы управления силовым активным фильтром.

Список литературы: **1**. *Шидловский А.К* Анализ и синтез фазопреобразовательных цепей / *А.К.Шидловский, И.В.Мостовяк, В.Г. Кузнецов* - Киев: Наукова думка, 1979. – 299 с. **2.** *Шидловский А.К.* Уравновешивание режима многофазных цепей / *А.К.Шидловский, И.В. Мостовяк, Г.А. Москаленко* - Киев: Наукова думка, 1990. - 272 с. **3.** *Ягуп В.Г.* Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации / *В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. -.Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 11 (186). – Донецьк, 2011. – С. 449-454. **4.** *Ягуп В.Г.* Синтез электрической системы во временной области методом поисковой оптимизации / *В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп* // Технічна електродинаміка. – 2015. - №2. – С. 24-29. **5.** . *Ягуп В.Г.* Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронного двигателя / *В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп* // Вісник нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу – 2013. – №36(1009). – С. 378-379. **6.** *Ягуп В.Г.* Оптимізація режиму живлення асинхронного двигуна в умовах несиметрії системи електропостачання / *В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №1(112). –. С. 74-77. **7.** *Akagi H* Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / *Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M.* – IEEE Press. – 2007. – 379 p. **8.** *Strzelecki R* Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks / *Strzelecki R., Benysek G.* – Springer-Verlag London Limited. – 2008. – 414 p. **9.** *Benysek G.* Power Theories for Improved Power quality / *Benysek G., Pasko M.* – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.

Bibliography (transliterated): 1. Shydlovskyi A.K., Mostoviak I.V., Kuznetsov V.G. *Analiz i sintez fazopreobrazovatel'nyh cepej*. - Kiev: Naukova Dumka, 1979. - 299 p. (Rus). **2.** Shydlovskyi A.K., Mostoviak I.V., Moskalenko G.A.*Uravnoveshivanie rezhima mnogofaznyh cepej* - Kiev: Naukova Dumka, 1990. - 272 p. (Rus). **3.** Yagup V.G., Yagup E.V. "Raschet rezhima kompensacii reaktivnoj moshnosti v nesimmetritshnoj sisteme jelekrtosnabzhenija metodom poiskovoj optimizacii" // *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnichnogo universitetu - Serija "Elektrotehnika i Jenergetika". - Vol. 11 (186). - Donetsk, 2011. - Pp. 449-454. (Rus).* **4.** Yagup V.G., Yagup E.V. "Sintez jelektricheskoj sistemy metodom poiskovoj optimizacii" // *Tehnichna Jelektrodynamika. – 2015. - №2. – Pp.24-29.* (Rus). **5.** Yagup V.G., Yagup E.V. "Modelirovanie processov kompensacii reaktivnoj moshnosti v sisteme jelektrosnabzhenija asinhronnogo dvigatelja". *Visnyk nacional'nogo tehnichnogo universitetu "Harkivs'kyj politehnichnyj instytut". Serija: Problemy avtomatyzovanogo jelectropryvodu. – 2013, №36 (109). Pp.378-379.*. 6. Yagup V.G., Yagup E.V. "Optymizacija rezhymu zhyvlennja asynhronnogo dvyguna v umovah nesymetrii systemy jelektropostachannja" // *Visnyk Vinnyc'kogo politehnichnogo instytutu. – 2014, №1 (112). – Pp. 74-77*. **7.** Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. –IEEE Press. – 2007. 379 p. **8.** Strzelecki R., Benysek G. *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*. – Springer - Verlag London Limited. – 2008. – 414 p. **9.** Benysek G., Pasko M. *Power Theories for Improved Power quality*. – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.

Поступила(received) 27.08.2015

УДК 621.3.011:621.372

Н. И. СУПРУНОВСКАЯ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
А. А. ЩЕРБА, чл.-корр. НАН Украины, зав. отд., Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
Д. С. ИВАЩЕНКО, инженер по разработке ПО, Amazon. com, Inc., Seattle, Washington, United States;
О. А. БЕЛЕЦКИЙ, аспирант, НТУУ «Киевский политехнический институт»

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕПЕЙ РАЗРЯДА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА ЛИНЕЙНУЮ АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ ОТ УСЛОВИЙ ПРЕРЫВАНИЯ РАЗРЯДНЫХ ТОКОВ

Введение. В последние годы большое внимание ученых в области импульсной электротехники направлено на повышение энергетических и динамических параметров емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) для передачи ими в нагрузку больших импульсных мощностей, недоступных для других накопителей электроэнергии [1, 5, 6–8, 11]. Длительное время при разработке электроимпульсных технологий применялись ЕНЭ на основе обычных линейных конденсаторов (ЛК), заряд которых прямо пропорционально (линейно) зависит от напряжения на их клеммах, а постоянным коэффициентом указанной пропорциональной зависимости является их электрическая емкость. В работе [5] исследовались такие энергетические характеристики ЕНЭ, как энергия, передаваемая в линейное активное сопротивление, энергия, накопленная в реактивных элементах и рассеянная на активных сопротивлениях разрядного контура и т.д. В работе [3] анализировались диапазоны изменения коэффициентов полезного действия (КПД) зарядной и разрядной цепей ЛК при изменении активного сопротивления нагрузки, а в [4] – закономерности обмена энергией между нелинейными и линейными конденсаторами. В то же время до настоящего времени не уделялось внимание возможному влиянию условий прерывания разрядных токов суперконденсаторов (СК) на их энергетические характеристики, с учетом того, что емкость СК является линейной, а заряд – нелинейной функциями от напряжения на их клеммах [2, 6, 7–14].

Поэтому **целью работы** было определение закономерностей изменения потерь электроэнергии и коэффициента ее передачи в линейную активную нагрузку при разряде на нее суперконденсатора при различных условиях прерывания разрядных токов.

Результаты исследований. На рис. 1 показана эквивалентная схема замещения цепи разряда суперконденсатора на нагрузку, представляемую активным сопротивлением $R_н$. Индуктивность L отражает индуктивность элементов разрядной цепи СК, а его внутреннее сопротивление представляется активным сопротивлением R. Электрическая схема замещения быстрой емкостной цепочки СК, как и в работах [2, 6–14], представлена двумя параллельно соединенными емкостями: линейной – C_0 и нелинейной динамической – $C_{дин}$, величина которой зависит от напряжения конденсатора U_C и определяется как $C_{дин} = k_0 \cdot U_C$ (где k_0 –постоянный коэффициент, имеющий размерность [Ф/В], а U_C – напряжение на C_0 и $C_{дин}$). Таким образом емкость СК представляется функцией:

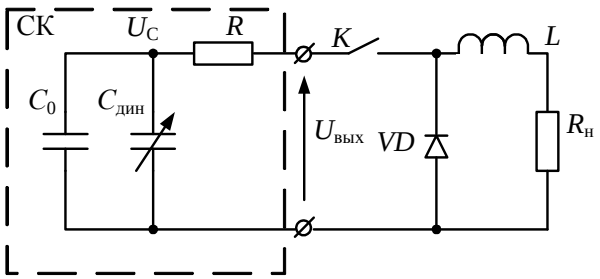


Рис. 1 Эквивалентная схема замещения цепи разряда СК на нагрузку

$$C(U_C) = C_0 + k_0 \cdot U_C. \quad (1)$$

Конструкция и технология изготовления суперконденсаторов позволяют изменять полярность напряжения U_C на его клеммах. Поэтому в данной статье проводилось исследование режимов разряда СК при таких значениях емкости $C(U_C)$, индуктивности L и сопротивления $R_н$, при которых возможен и апериодический, и колебательный разряд СК с изменением полярности напряжения на его клеммах. Такой подход вызвал необходимость вместо формулы (1) для определения значения емкости $C(U_C)$ применитьвыражение:

$$C(U_C) = C_0 + k_0 \cdot \left| U_C \right|, \quad (2)$$

в котором динамическая емкость $C_{дин} = k_0 \left| U_C \right|$ увеличивается с ростом напряжения U_C любой полярности.

Для определения закономерностей изменения потерь электроэнергии и коэффициента ее передачи в нагрузку были рассмотрены режимы разряда СК, как с нерегулируемой, так и с регулируемой длительностью. Регулирование длительности разряда осуществляется путем принудительного его прерывания (размыканием ключа K). При размыкании ключа K накопленная в индуктивности энергия рассеивается в сопротивлении нагрузки $R_н$ через обратный диод VD.

Ввиду сложности получаемых аналитических выражений для исследования энергетических процессов в нелинейной электрической цепи, содержащей СК, в работе [4] была построена ее математическая модель в пакете программ Matlab/Simulink. В ней СК моделируется управляемым источником напряжения, величина напряжения на котором в произвольный момент времени $t_{пр}$ задается математическим уравнением, отражающим зависимость напряжения на СК $U_C(t_{пр})$ от тока i, протекающего через СК:

© Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, 2015

$$U_C(t_{\text{пр}}) = -C_0 + \sqrt{C_0^2 + 4k_0\left(C_0U_0 + k_0U_0^2 + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt\right)} \Big/ 2k_0\,, \tag{3}$$

где U_0 – начальное напряжение на СК C.

Однако эта математическая модель была разработана при допущении, что напряжение на СК U_C всегда больше или равно нулю, поскольку в разрядной цепи не учитывалась индуктивность (которая может в некоторых случаях быть достаточно большой), а, следовательно, разряд не мог иметь колебательный характер и напряжение на СК не могло изменять свою полярность. Поэтому для электрических цепей разряда СК, которые могут содержать большую индуктивность, была разработана математическая модель, учитывающая, что разрядный процесс может носить как апериодический, так и колебательный характер.

С учетом выражения (2) для определения величины заряда q СК можно записать уравнение:

$$q = C(U_C)\cdot U_C = (C_0 + k_0 \left| U_C \right|)\cdot U_C. \tag{4}$$

Тогда значение тока в разрядной цепи СК можно определять из выражения:

$$i(t) = dq/dt = d\,(C_0U_C + k_0 \left| U_C \right| U_C)/dt\,. \tag{5}$$

Проинтегрировав (5) по времени на интервале от $t = 0$ до произвольного момента времени $t = t_{\text{пр}}$, получим выражение:

$$\int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt = \int_{U_C(0)}^{U_C(t_{\text{пр}})} d\left(C_0U_C(t) + k_0\left|U_C(t)\right|U_C(t)\right), \tag{6}$$

из которого следует, что

$$\int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt = \left(C_0U_C(t) + k_0\left|U_C(t)\right|U_C(t)\right)\Big|_{U_C(0)}^{U_C(t_{\text{пр}})} = C_0U_C(t_{\text{пр}}) + k_0\left|U_C(t_{\text{пр}})\right|U_C(t_{\text{пр}}) - C_0U_C(0) - k_0\left|U_C(0)\right|U_C(0)\,. \tag{7}$$

Рассмотрим следующие варианты полярности напряжений $U_C(0)$ и $U_C(t_{\text{пр}})$:

1. $U_C(0) > 0$, $U_C(t_{\text{пр}}) \geq 0$.

В этом случае $\left|U_C(t_{\text{пр}})\right|$ и $\left|U_C(0)\right|$ в уравнении (7) можно заменить соответственно на $U_C(t_{\text{пр}})$ и $U_C(0)$:

$$k_0U_C^2(t_{\text{пр}}) + C_0U_C(t_{\text{пр}}) - C_0U_C(0) - k_0U_C^2(0) - \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt = 0\,, \tag{8}$$

т.е. получим квадратное уравнение относительно напряжения $U_C(t_{\text{пр}})$:

$$a\cdot(U_C(t_{\text{пр}}))^2 + b\cdot U_C(t_{\text{пр}}) + c = 0, \tag{9}$$

где $a = k_0$, $b = C_0$, $c = -C_0U_C(0) - k_0U_C^2(0) - \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt$.

С учетом принятого допущения, что $U_C(0) > 0$ и при условии положительного дискриминанта квадратного уравнения (т.е. $b^2 - 4ac > 0$), решением уравнения (9) будет уравнение (3), реализованное в модели [4].

2. $U_C(0) > 0$, $U_C(t_{\text{пр}}) < 0$.

В таком случае знак модуля $\left|U_C(t_{\text{пр}})\right|$ в уравнении (7) можно опустить, но одновременно с этим нужно изменить знак напряжения $U_C(t_{\text{пр}})$, стоящего под модулем (т.е. $\left|U_C(t_{\text{пр}})\right|$ заменить на $-U_C(t_{\text{пр}})$). При этом $\left|U_C(0)\right|$ можно заменить на $U_C(0)$. Тогда уравнение (7) преобразуется к виду:

$$k_0U_C^2(t_{\text{пр}}) - C_0U_C(t_{\text{пр}}) + C_0U_C(0) + k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt = 0 \tag{10}$$

В этом случае квадратное уравнение относительно напряжения $U_C(t_{\text{пр}})$ имеет такие коэффициенты a, b, c:

$$a = k_0,\ b = -C_0,\ c = C_0U_C(0) + k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt\,.$$

При условии положительного дискриминанта квадратного уравнения (т.е. $b^2 - 4ac > 0$) уравнение (10) имеет два решения:

$$U_C(t_{\text{пр}})_1 = C_0 + \sqrt{C_0^2 - 4k_0\left(C_0U_C(0) + k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt\right)} \Big/ 2k_0\,, \tag{11}$$

$$U_C(t_{\text{пр}})_2 = C_0 - \sqrt{C_0^2 - 4k_0\left(C_0U_C(0) + k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt\right)} \Big/ 2k_0\,. \tag{12}$$

Поскольку $U_C(t_{\text{пр}})$ согласно (11) (в отличие от (12)) всегда будет иметь положительное значение, что не соответствует рассматриваемому варианту, то в усовершенствованной математической модели будем реализовывать выражение (12).

3. $U_C(0) < 0$, $U_C(t_{\text{пр}}) \geq 0$.

В этом случае в выражении (7) $\left|U_C(0)\right|$ нужно заменить на $-U_C(0)$, а $\left|U_C(t_{\text{пр}})\right|$ – на $U_C(t_{\text{пр}})$:

$$k_0U_C^2(t_{\text{пр}}) + C_0U_C(t_{\text{пр}}) - C_0U_C(0) + k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt = 0\,. \tag{13}$$

Коэффициенты квадратного уравнения (13): $a = k_0$, $b = C_0$, $c = -C_0U_C(0) + k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt$.

Решением (13) является следующее уравнение:

$$U_C(t_{\text{пр}}) = -C_0 + \sqrt{C_0^2 + 4k_0\left(C_0U_0 - k_0U_0^2 + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt\right)} \Big/ 2k_0\,, \tag{14}$$

(т. к. второй корень уравнения (13) всегда отрицателен, и поэтому не удовлетворяет исходным условиям).

4. $U_C(0) < 0$, $U_C(t_{\text{пр}}) < 0$.

В таком случае в (7) можно опустить обозначения модуля, но одновременно нужно изменить знаки напряжений, стоящих под знаком модуля (т.е. заменить $\left|U_C(t_{\text{пр}})\right|$ и $\left|U_C(0)\right|$ соответственно на $-U_C(t_{\text{пр}})$ и $-U_C(0)$):

$$k_0U_C^2(t_{\text{пр}}) - C_0U_C(t_{\text{пр}}) + C_0U_C(0) - k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt = 0 \tag{15}$$

Коэффициенты уравнения (15): $a = k_0$, $b = -C_0$, $c = C_0U_C(0) - k_0U_C^2(0) + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt$.

При условии $b^2 - 4ac > 0$ уравнение (15) имеет два решения. Но только одно из них может принимать отрицательные значения (т.е. удовлетворяет исходным условиям):

$$U_C(t_{\text{пр}}) = C_0 - \sqrt{C_0^2 - 4k_0\left(C_0U_0 - k_0U_0^2 + \int_0^{t_{\text{пр}}} i(t)dt\right)} \Big/ 2k_0\,. \tag{16}$$

Таким образом новая математическая модель будет учитывать все возможные варианты полярности напряжения на СК, используя для расчета текущего значения $U_C(t_{\text{пр}})$ одно из уравнений (3), (12), (14), (16) в зависимости от сочетания полярностей напряжений $U_C(0)$ и $U_C(t_{\text{пр}})$.

Определим КПД передачи энергии в нагрузку η как отношение дозы энергии, переданной в нагрузку $\Delta W_{R\text{н}}$, к дозе энергии, отобранной от конденсатора ΔW_{C} (т.е. $\eta = \Delta W_{R\text{н}} / \Delta W_{\text{C}}$).

При этом энергию потерь при разряде $W_{\text{потерь}}$ можно рассчитать как разность доз энергии, отобранной от конденсатора ΔW_{C}, и энергии, переданной в нагрузку $\Delta W_{R\text{н}}$ (т.е. $W_{\text{потерь}} = \Delta W_{\text{C}} - \Delta W_{R\text{н}}$).

При моделировании разряда СК на линейную нагрузку с активным сопротивлением $R_{\text{н}}$ использовались следующие параметры цепи: $R_{\text{н}} = 0{,}12$ Ом = const, $R = 0{,}01$ Ом, $U_0 = 200$ В, $C_0 = 10^{-4}$ Ф, $k_0 = 3 \cdot 10^{-7}$ Ф/В, $L = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн. Начальная добротность цепи при таких ее параметрах равна $Q_0 = \dfrac{\sqrt{L}}{\left(\sqrt{(C_0 + k_0U_0)}(R + R_{\text{н}})\right)} \approx 1{,}36$.

Для сравнения энергетических характеристик при разряде нелинейного и линейного конденсаторов на одну и ту же линейную нагрузку $R_{\text{н}}$ промоделируем разряд не нее суперконденсатора емкостью $C = C_0 + k_0 \cdot U_C$, и разряд ЛК емкостью $C_{\text{ЛК}} = C_0$ (при одном и том же начальном напряжении на конденсаторах $U(0) > 0$).

В табл. 1 представлены результаты расчета потерь электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ и КПД ее передачи в нагрузку η, а на рис. 2 представлено изменение напряжений на конденсаторе (U_C) и нагрузке ($U_{R\text{н}}$) при разряде СК и ЛК на линейную нагрузку при разрядном переходном процессе с нерегулируемой длительностью.

Таблица 1 – Энергетические характеристики цепей разряда СК и ЛК на активную нагрузку

Энергетические характеристики	Разряд ЛК на нагрузку $R_{\text{н}}$	Разряд СК на нагрузку $R_{\text{н}}$
W_C, Дж	2,0	3,6
$W_{R\text{н}}$, Дж	1,85	3,34
$W_{\text{потерь}}$, Дж	0,15	0,26
КПД η	0,92	0,93

Из табл. 1 видно, что КПД передачи энергии в нагрузку η при нерегулируемой длительности разрядного переходного процесса имеет практически одинаковое значение, как при разряде СК, так и при разряде ЛК.

При этом энергия, отобранная от конденсатора, и энергия, поступившая в нагрузку, при разряде СК в 1,8 раза больше, чем при разряде ЛК на ту же нагрузку.

Также были исследованы энергетические характеристики разряда СК при регулировании длительности переходного процесса.

Регулирование осуществлялось принудительным прерыванием разряда с помощью GTO-коммутатора при достижении тока в нагрузке величин, равных $I_{max}/4$, $I_{max}/3$, $I_{max}/2$ и I_{max}. Также анализировался режим, когда GTO-коммутатор закрывался при прохождении напряжения на нем через ноль. При этом ток в нагрузке достигал значения $I_{\text{Rн откл}} \approx 530$ А.

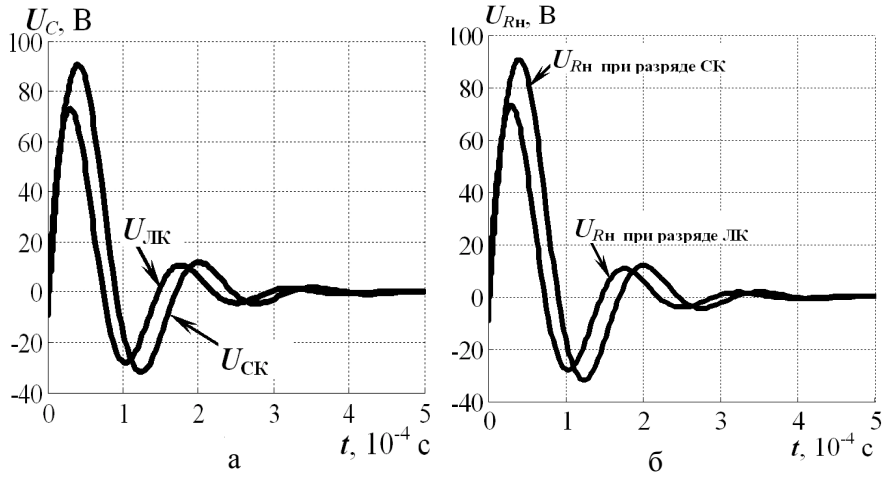


Рис. 2 Изменение напряжений на конденсаторе (U_C) и нагрузке ($U_{R\text{н}}$) при разряде СК и ЛК на линейную нагрузку

Таблица 2 – Энергетические характеристики цепей регулируемого разряда СК и ЛК на активную нагрузку

Величина тока в нагрузке $I_{\text{Rн СК}}$ / $I_{\text{Rн ЛК}}$, А	$I_{max}/4$ 181 / 147	$I_{max}/3$ 241 / 196	$I_{max}/2$ 362 / 294	I_{max} 724 / 587	$I_{\text{Rн откл}}$ 530 / 498
$W_{\text{потерь СК}}$, Дж	1,22	1,66	2,46	2,72	0,39
$W_{\text{потерь ЛК}}$, Дж	0,12	0,2	0,36	1,0	0,75
КПД $\eta_{\text{СК}}$	0,06	0,08	0,13	0,48	0,89
КПД $\eta_{\text{ЛК}}$	0,07	0,1	0,15	0,44	0,62

В табл. 2 приведены результаты расчетов потерь электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ и КПД ее передачи в нагрузку η при разрядах нелинейного и линейного конденсаторов и регулировании длительности разрядов посредством полностью управляемого ключа (GTO-коммутатора).

Как следует из табл. 2 при принудительном прерывании разряда как линейного, так и нелинейного конденсатора до момента, когда ток в цепи достигнет своего максимального значения потери электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ увеличиваются, достигая своего максимального значения при I_{max}, после чего начинают уменьшаться. При этом КПД передачи энергии в нагрузку η (и ЛК, и СК) увеличивается во всем рассматриваемом диапазоне. Отметим, что КПД СК превышают соответствующие КПД ЛК.

Сравнивая КПД η СК и ЛК при нерегулируемом (табл. 1) и регулируемом разряде (табл. 2) можно сделать вывод, что принудительное прерывание разрядного процесса понижает величину η. Однако во многих высокочастотных технологических процессах требуется уменьшение длительности разряда (в частности для искроэрозионной обработки материалов), что вызывает необходимость использования управляемых полупроводниковых коммутаторов. При использовании полупроводникового ключа (GTO) и прерывании разряда при прохождении напряжения на ключе через ноль, КПД СК достаточно высок ($\eta_{\text{СК}} = 0,89$, табл. 2) и сравним с КПД СК нерегулируемого разряда ($\eta_{\text{СК}} = 0,92$, табл. 1), тогда как для ЛК соответствующие КПД значительно отличаются ($\eta_{\text{ЛК}} = 0,89$ с GTO и $\eta_{\text{ЛК}} = 0,62$ без GTO).

Выводы. 1. Определены закономерности изменения потерь электроэнергии и коэффициента ее передачи в нагрузку при разряде (как с нерегулируемой, так и с регулируемой длительностью) суперконденсатора, являющегося нелинейным элементом электрической цепи.

Установлено, что КПД передачи электроэнергии в линейную активную нагрузку от суперконденсатора и линейного конденсатора увеличиваются во всем рассмотренном временном диапазоне прерывания разрядного тока конденсаторов, причем КПД СК во все моменты времени разряда остается большим, чем КПД ЛК.

2. Показано, что энергия, поступившая в нагрузку, при разряде суперконденсатора в 1,8 раза больше, чем при разряде обычного линейного конденсатора, заряженного до такого же напряжения. Причем при прерывании тока разряда как линейного, так и нелинейного конденсаторов во временном диапазоне до момента достижения разрядным током максимального значения потери электроэнергии $W_{\text{потерь}}$ увеличиваются, достигая максимального значения при $I=I_{max}$, после чего начинают уменьшаться.

Установлено, что при нерегулируемом и регулируемом разряде обычного и нелинейного конденсаторов на линейную активную нагрузку принудительное прерывание разрядного тока снижает величину КПД передачи энергии от конденсаторов в нагрузку, что необходимо учитывать при оптимизации законов регулирования длительности импульсных токов в нагрузке.

Список литературы: 1. *Вінниченко Д.В.* Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю / *Вінниченко Д.В.* // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 129–131. **2.** *Изотов В.Ю.* Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора / *В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин* // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2008. – № 6. – С. 114–118. **3.** *Супруновская Н.И.* Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / *Н.И. Супруновская, А.А. Щерба* // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3–12. **4.** *Супруновская Н.И.* Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов / *Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, D.S. Ivashchenko, О.А. Белецкий* // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 3–11. **5.** *Шидловский А.К.* Энергетические процессы в электрических цепях разрядноимпульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда / *А.К. Шидловский, Н.И. Супруновская* // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 42–48. **6.** *Щерба А.А.* Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку / *А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, О.А. Белецкий* // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. –К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 65–74. **7.** *Beguin F.* Supercapacitors: Materials, Systems and Applications / *Beguin F., Frackowiak E.* / First Edition, 2013. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 527 p. **8.** *Burke A.* Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / *Burke A.* // Proc. of the IEEE. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. **9.** *Burke A.* The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / *Burke A., Miller M.* // Journ. of the Power Sources. Iss. 1. V. 196. Jan. 2011. 514–522**. 10.** *Burke A.* Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / *Burke A., Miller M., Zhao H.* // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. **11.** *Maletin Y.* New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles / *Maletin Y., Stryzhakova N., Zelinskyi S., Chernukhin S., Tretyakov D., Mosqueda H., Davydenko N., and Drobnyi D.* // Journ. of Energy and Power Engineering. No. 9. 2015. 585–591. **12.** *Mihailescu B.* Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications / *Mihailescu B., Svasta P.,Varzaru G* // U.P.B. Scientific Bulletin, Series C. Iss. 2. V. 75. 2013. P. 277–290. **13.** *Rafik F.* Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / *Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A.* // Journ. of Power Sources. No. 2. V. 165. 2007. P. 928–934. **14.** *Zubieta L.* Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / *Zubieta L., Bonert R.* // IEEE Trans. On Industry Applications. No. 1. V. 36. January-February 2000. 199–205.

Bibliography (transliterated): 1. Vinnychenko, D.V. «Vyznachennya optymal'nyh harakterystyk vysokovol'tnoyi elektrorozryadnoyi systemy dlya realizatsiyi tehnologiyi elektroimpul'snogo syntezu nanovugletsyu.» *Theknichna. elektrodynamika.* No. 4. 2014. 129–131. Print. **2.** Izotov, V.Yu., D.G. Gromadsky and Yu.A. Maletin «Simulation and calculation of the operating parameters of the supercapacitor.» *Naukovi visti NTUU «KPI»*. No. 6. 2008. 114–118. Print. **3.** Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A «Protsessy pereraspredeleniya jelektricheskoy jenergii mezhdu parallel'no soedinyonnymi kondensatorami.» // *Theknichna. elektrodynamika*. No. 4. 2015. 3–12. Print. **4.** Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A., Ivashchenko, D.S. and Beletsky, O.A. «Protsessy obmena jenergiey mezhdu nelineynymi i lineynymi zven'yami jelektricheskoy shemy zameshcheniya superkondensatorov.» *Theknichna elektrodynamika.* No. 5. 2015. 3–11. Print. **5.** Shydlovsky, A.K., Suprunovskaya, N.I. «Jenergeticheskie protsessy v jelektricheskih tsepyah razryadnoimpul'snyh ustanovok s emkostnymi nakopitelyami jenergii pri ogranichenii dlitel'nosti ego razryada na jelektroiskrovuyunagruzku i nenulevyh usloviyah ego zaryada.» *Theknichna elektrodinamika.* No. 1. 2010. 42–48. Print. **6.** Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I., Beletsky, O.A. «Jenergeticheskie harakteristiki superkondensatorov pri ih zaryade otistochnika napryazheniya i razryade na rezistivnuyu nagruzku.» *Pratsi Insitutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*: Zbirnyk nauk. prats. Kiev: IED NANU. No. 39. 2014. 65 – 74. Print. **7.** Beguin, F., Frackowiak, E. *Supercapacitors: Materials, Systems and Applications*. First Edition, 2013. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 527 p. Print. **8.** Burke, A. «Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles.» *Proc. of the IEEE*. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. Print. **9.** Burke, A., Miller, M. «The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications.» *Journ. of the Power Sources*. 1. 196. (Jan. 2011). 514–522**.** Print. **10.** Burke, A.., Miller, M., Zhao, H. «Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density.» Research Report UCD-ITS-RR-12-06. Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. Print. **11.** Maletin, Y., Stryzhakova, N., Zelinskyi, S., Chernukhin, S., Tretyakov, D., Mosqueda, H., Davydenko, N., and Drobnyi, D. «New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles.» *Journ. of Energy and Power Engineering.* No. 9. 2015. 585–591. Print. **12.** Mihailescu, B., Svasta, P.,Varzaru, G. «Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications.» *U.P.B. Scientific Bulletin*, Series C. 2.75. 2013. 277–290. Print. **13.** Rafik, F., Gualous, H., Gallay, R., Crausaz, A., and Berthon, A. «Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling.» *Journ. of Power Sources*. No. 2. 165. 2007. 928–934. Print. **14.** Zubieta, L., Bonert, R. «Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications.» *IEEE Trans. On Industry Applications.* No. 1. 36. January-February 2000. 199–205. Print.

Поступила (received) 31.08.2015

УДК.62-83:612.313

Г. С. БЕЛОХА, ст. препод., ДонГТУ, Лисичанск
Ю. П. САМЧЕЛЕЕВ, канд. техн. наук, доцент, ДонГТУ, Лисичанск
В. Г. ДРЮЧИН, канд. техн. наук, доцент ДонГТУ, Лисичанск

ВЛИЯНИЕ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С РЕЛЕЙНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Введение. Современные преобразовательные системы находятся в условиях постоянно действующих на них различного рода возмущений, которые делятся на внешние и внутренние (параметрические). Характерным примером внешних возмущений являются возмущения со стороны первичного источника питания (например, колебания напряжения сети, частоты, амплитудная и фазовая асимметрия напряжений) и нагрузки. Параметрические возмущения вызваны изменением параметров объекта регулирования или звеньев САР.

Естественно, что качество работы потребителя будет определяться качеством работы вторичного источника питания (ИП), обеспечивающего необходимые параметры электроэнергии, передаваемой потребителю, т.е. малой чувствительностью к действию возмущений.

Наиболее часто встречающиеся виды искажений напряжения питающей сети, нарушающие работу вторичных ИП [1-3]:

- отклонение напряжения. ГОСТом нормируются отклонения напряжения в пределах ±10% от номинального значения;
- отклонение частоты от номинального значения. Предельно допустимые значения отклонения частоты ±0,4 Гц;
- несимметрия напряжения – характеризуется коэффициентами нулевой и обратной последовательности. ГОСТ устанавливает предельно допустимое значение в 4%;
- несинусоидальное напряжение – отклонение формы напряжения от идеальной синусоидальной вследствие наличия гармоник сетевого напряжения;
- провал напряжения – внезапное уменьшение напряжения с последующим восстановлением. Длительность провала напряжения от 10 мс до нескольких десятков секунд. Напряжение начала провала принимается равным 0,9 от номинального значения напряжения;
- перенапряжения – повышение напряжения выше 1,1 от номинального;
- прерывание напряжения – отсутствие напряжения в одной или нескольких фазах в течении более чем полупериод.

Работа, характеристики и функциональные возможности ИП с релейным управлением рассмотрены в работах [4-5]. Показано, что такие ИП решают проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) при предельном быстродействии отработки задающих сигналов и высокой точности поддержания выходного тока .

Целью настоящей работы является исследование реакции ИП на действие внешних и параметрических возмущений.

Материал и результаты исследований. Схемотехника силовой части исследуемых ИП представлена на рис.1.

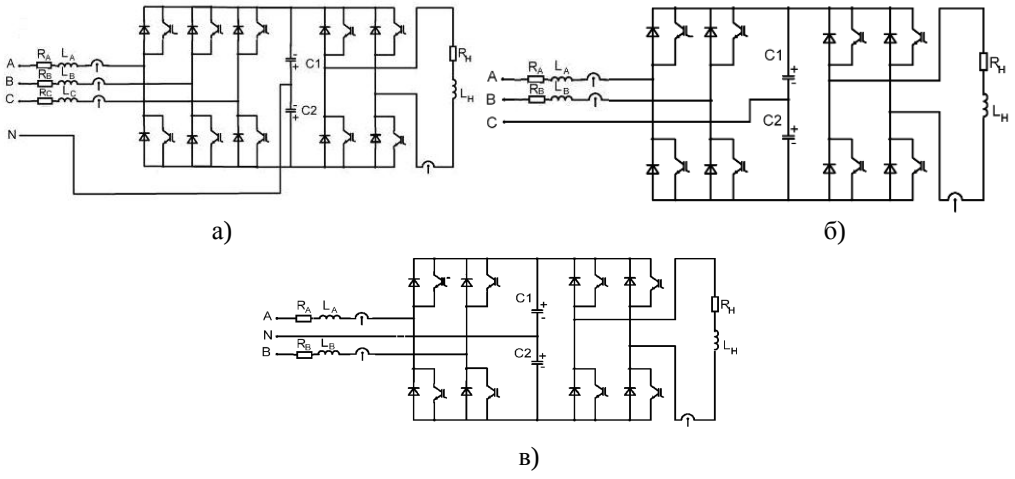
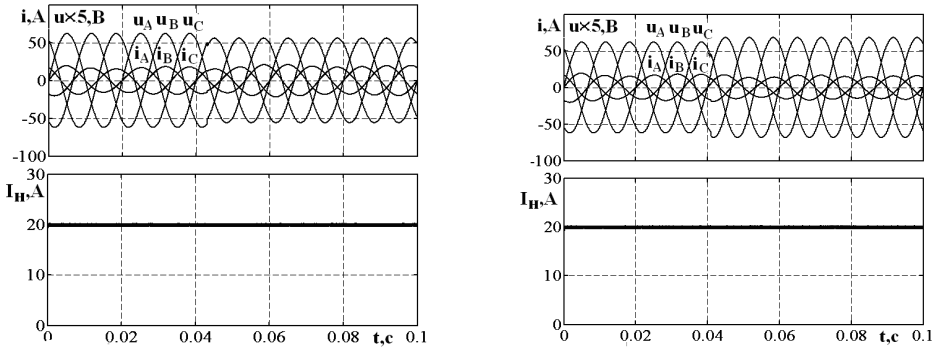


Рис.1 Схемотехника трехфазных ИП: а) ИП1, б) ИП2, в) ИП3

© Г. С. Белоха, Ю. П. Самчелеев, В. Г. Дрючин, 2015

Реакция ИП1 на отклонения величины питающего напряжения показана на рисунке 2. В момент времени t=0.043с (рис.2 а) произошло уменьшение напряжения на 10% от номинального значения, а в момент времени t=0.041с напряжение сети увеличилось на 10% относительно номинального (рис. 2 б). В обоих случаях ток нагрузки остался неизменным, потребляемые токи сохранили синусоидальную форму и cosφ=1. Амплитуда входных токов изменилась для сохранения баланса мощностей.

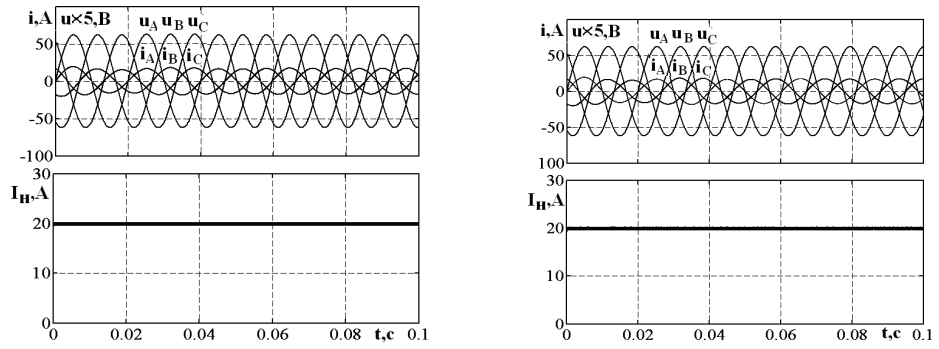


а) б)

Рис.2 Реакция на уменьшение (а) и увеличение (б) напряжения сети

На рисунке 3 показана реакция на отклонения частоты питающего напряжения.

На рисунке 3 а в момент времени t=0.052с изменилась частота питающего напряжения с 50 до 48 Гц, а на рисунке 3 б в момент времени t=0.052с – с 50 до 52 Гц. В обоих случаях процесс стабилизации тока нагрузки не нарушен, входные токи синусоидальны и синфазны с напряжением сети.

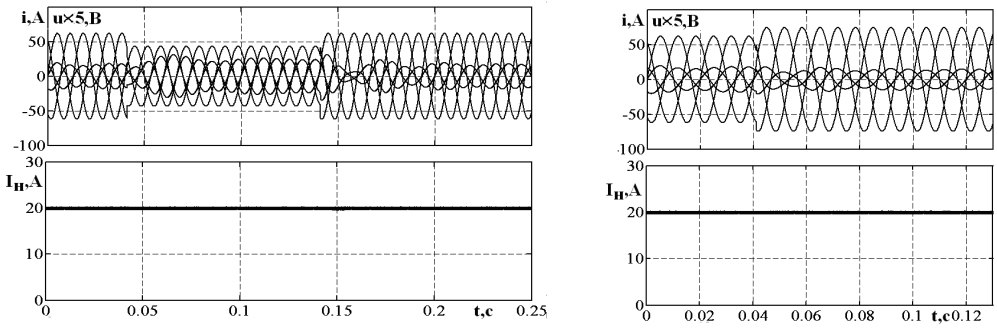


а) б)

Рис. 3 Реакция на уменьшение (а) и увеличение (б) частоты напряжения сети

Перенапряжения и провалы напряжения являются случайными помехами. Для них допустимые численные значения ГОСТ не устанавливает.

На рисунке 4 а показана реакция ИП1 на провал напряжения, в момент времени t=0.041с напряжение сети уменьшилось относительно номинального на 30%. После уменьшения напряжения начался переходный процесс, после окончания которого установилось новое значение амплитуды фазного тока, ток увеличился для сохранения баланса мощностей. На процесс стабилизации тока нагрузки провал напряжения не повлиял. В момент времени t=0.14 с произошло восстановление напряжения до номинального значения. После окончания переходного процесса, установилось новое значение амплитуды фазного тока.



а) б)

Рис. 4 Реакция на провал напряжения (а) и перенапряжение (б)

На рисунке 4 б показано влияние перенапряжения на работу ИП1, в момент времени t=0.042 с напряжение сети увеличилось на 20%. Для сохранения баланса мощности амплитуда потребляемых токов уменьшилась. Стабилизация тока нагрузки не нарушилась, ЭМС сохранилась.

На рисунке 5 представлена работа ИП при несимметрии напряжения сети (коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжения сети 4%). В отличие от симметричной сети, где общее напряжение на конденсаторах не имеет пульсаций, несимметрия приводит к появлению пульсаций напряжения конденсаторов с частотой 100 Гц. Стабилизация тока нагрузки не нарушилась.

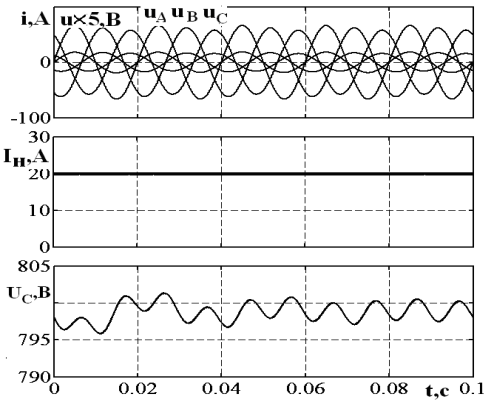
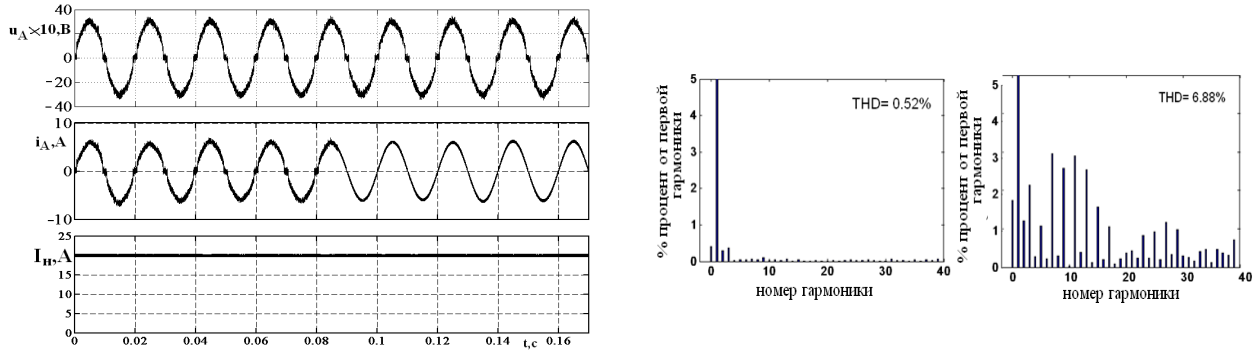


Рис.5 Работа ИП при несимметрии напряжения

Одним из нежелательных видов искажений кривой напряжения является искажение в момент перехода кривой через ноль. Для системы управления это чревато нарушением ее синхронизации с напряжением сети (система не «чувствует» истинный момент перехода кривой напряжения через ноль). На рисунке 6 приведены кривые напряжения, тока фазы А (ИП1) (рис.6а) и спектр потребляемого тока (рис. 6б). Из кривых следует, что с учетом быстродействия ИП, кривая тока полностью повторяет искаженную кривую напряжения (коэффициент гармонических составляющих тока THD=6,88 %). Улучшить кривую тока возможно посредством применения устройства фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В момент времени t=0,087 с ФАПЧ подключен к системе, что привело к значительному улучшению кривой тока, THD уменьшился в 13 раз и равно 0,52 %.

Аналогичные результаты получены и для ИП2 и ИП3.

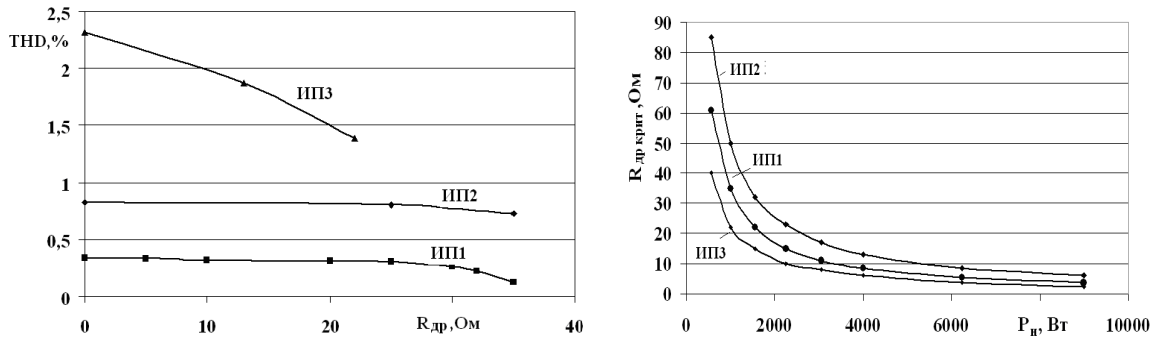


а) б)

Рис. 6 Влияние ФАПЧ на работу ИП

Влияние активного сопротивления фазного дросселя на THD (фаза А) приведены на рис. 7 а для вех представленных ИП (активное сопротивление изменялось от 0 до критического значения сопротивления $R_{дркрит}$, т.е. до значения при котором прекращается релейный режим). С ростом активного сопротивления гармонический состав улучшается, но при этом растут потери мощности, снижается КПД.

На рисунке 7 б представлены графики зависимостей $R_{дркрит} = f(P_н)$. Из графиков следует, что с увеличением мощности критическое значение активного сопротивления уменьшается.

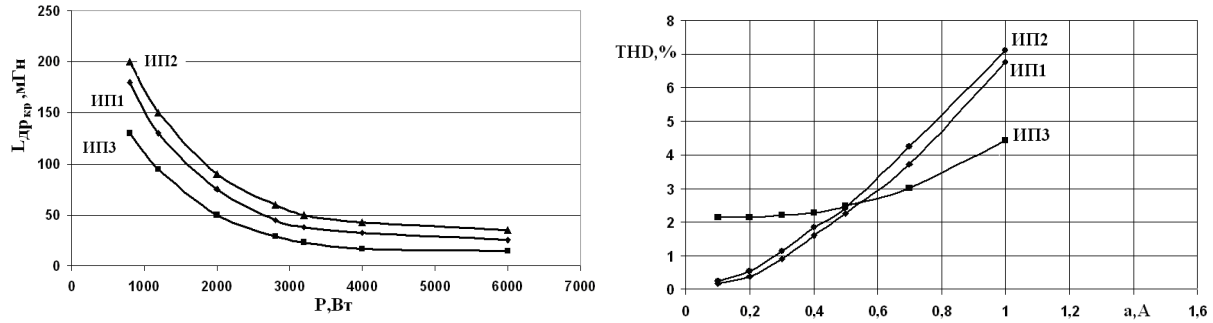


а) б)

Рис.7 Графики зависимостей $THD = f(R_{др})$ (а) и $R_{дркрит} = f(P_н)$ (б)

На рисунке 8 а представлены зависимости критической индуктивности от мощности нагрузки для всех схемотехнических решений ИП. С увеличением мощности во всех случаях величина критической индуктивности уменьшается (значение критической индуктивности фиксировалось при значении THD 5%).

На рисунке 8 б показаны графики зависимости THD сетевого тока (на примере фазы А) от ширины петли гистерезиса релейного элемента. С увеличением ширины петли увеличивается THD для всех представленных схемотехнических решений.



а) б)

Рис. 8 Графики зависимостей $L_{др.крит} = f(P_н)$ (а) и $THD = f(a)$ (б)

Несимметрия индуктивностей фазных дросселей исследовалась при симметрии активных сопротивлений. Разброс значений параметров дросселей (L_A=10мГн, L_B=1мГн, L_C=5мГн) не оказывает влияния на работу потребителя для всех представленных схемотехнический решений., при этом ИП остаются электромагнитно совместимыми с сетью.

Несимметрия активных сопротивлений фазных дросселей ведет к увеличению потребляемого из сети тока (ток увеличился на 2% при значениях сопротивления R_A=0,1Ом, R_B =1Ом и R_C=2 Ома, по сравнению с R_A=R_B=R_C=0,1 Ом во всех фазах). Потребляемые из сети токи симметричны.

Выводы

Выполненные исследования показали:

1. Разработанные авторами источники питания не чувствительны к указанным выше искажениям напряжения питающей сети.

2. Во всех режимах сохраняется электромагнитная совместимость источника питания с сетью

3. Показано, что при некоторых критических значениях активных сопротивлений и индуктивностей дросселей нарушается работоспособность источника питания (прекращается релейный режим).

Список литературы: 1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электричкой энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97: – [Действительный 21.11.1997]. – Минск, 1997. – 35с. **2.** *Куско А.* Качество энергии в электрических сетях / *А. Куско, М. Томпсон*: пер. с англ. Роводзея А.Н. М.: Додэка-XX1, 2008. - 336 с. **3.** Электромагнитная совместимость потребителей моногр. / *И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк* и др. ─ М.:Машиностроение, 2012. ─ 351 с. **4.** *Бекбаев А.Б.* Система стабилизации тока, электромагнитно совместимая с сетью. / *А.Б. Бекбаев, Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин,Г.С. Белоха, Е.А. Серсанбаев* // Вестник КазНТУ, Алматы. – 2014. - №1(101). – с. 93-100. **5.** *Самчелеев Ю.П.* Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока. / *Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха* // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. - №36(1009). – С.317-321.

Bibliography (transliterated): 1. GOST 13109-97 Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnicheskih sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektrichkoj jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija,Minsk, 1997 Print. **2.** Kusko A. and M. Tompson Kachestvo jenergii v jelektricheskih setjah Moscow: Dodjeka-XX1, 2008 Print. **3**.Zhezhelenko I.V. , A.K. Shidlovskij, G.G. Pivnjak et al. Jelektromagnitnaja sovmestimost' potrebitelej monogr. Moscow:Mashinostroenie, 2012.Print. **4.** Bekbaev A.B., Ju.P. Samcheleev, V.G. Drjuchin, G.S. Beloha and E.A. Sersanbaev “Sistema stabilizacii toka, jelektromagnitno sovmestimaja s set'ju”. Vestnik KazNTU,1(101), 2014. 93-100 Print. **5.** Samcheleev Ju.P., V.G. Drjuchin and G.S. Beloha. “Universal'nyj vysokojeffektivnyj istochnik pitanija dlja jelektroprivodov postojannogo i peremennogo toka” Visnik nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teorija i praktika. No 36(1009), 2013.317-321. Print.

Поступила (received) 22.08.2015

УДК 62-83-52:621.311.24

О. О. ПАНКОВА, студент, «ЗГИА», Запорожье

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ВЕТРОВОГО ПОТОКА

Введение. Эффективность работы электромеханической системы ВЭУ зависит от величины и характера изменения ветрового потока. Действительно, максимальная выработка энергии достигается только при стабильной скорости ветра. Но при порывистом характере скорости ветра и, как следствие, при наличии электромеханических переходных процессов, выработка электроэнергии снижается.

Существуют различные алгоритмы управления ветроэнергетической установкой во время переходного процесса. Например, в алгоритме управления, рассмотренном в работе [1], разгон электромеханической системы (ЭМС) ВЭУ осуществляется при заданном динамическом моменте. В работе [1] рассмотрена только фаза разгона. Однако на суммарную выработку влияет как фаза разгона, так и фаза торможения. Поэтому определенный интерес вызывает анализ работы ЭМС ВЭУ в обеих фазах.

Кроме того, обеспечение разгона при фиксированном динамическом моменте возможно осуществлять двумя способами. Первый способ предусматривает разгон только моментом ветротурбины, второй способ — как моментом ветротурбины так и моментом генератора, переведенного в двигательный режим (использование «подкрутки»). Однако возникает вопрос, об эффективности первого и второго способа управления и, как следствие, целесообразности использование второго.

Постановка задачи. Таким образом, задачей работы было проведение анализа влияния характера ветровой нагрузи на выработку ВЭУ при различных динамических моментах и проведения сравнительного анализа двух способов управления (с «подкруткой» и без нее). Решение этих задач, предполагает использование математической модели ЭМС ВЭУ.

Материалы и результаты исследования. Создание модели для описания и проведение анализа эффективности работы электромеханической системы ВЭУ, проводилось с использованием обобщенного подхода [1]. Применение данного способа анализа позволяет получить результаты для широкого класса ВЭС.

Обобщенная структурная схема модели представлена на рисунке 1.

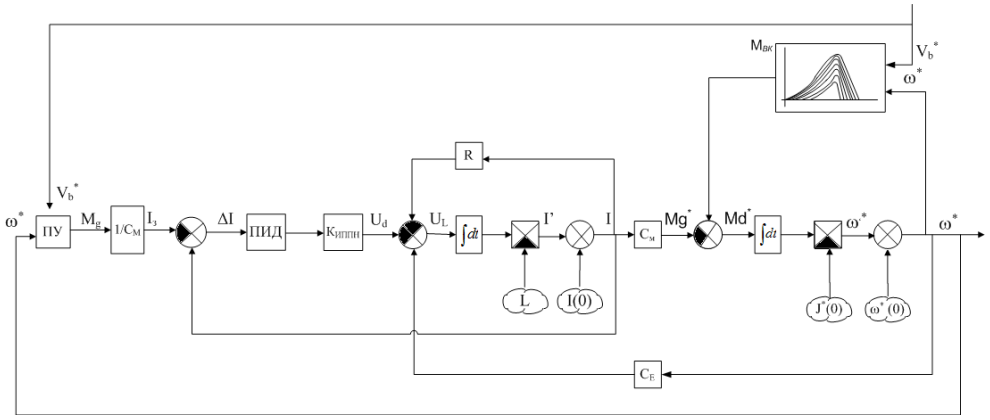


Рис.1 – Обобщенная структурная схема ЭМС ВЭУ.

Уравнение движения электромеханической системы ВЭУ:

$$\frac{d\omega^*}{dt^*} = M^*_{BK}\left(V^*_b,\ \omega^*\right) - M^*_G. \qquad (1)$$

где: M^*_G – момент генератора;

M^*_{BK} – момент ветротурбины;

$\frac{d\omega^*}{dt^*} = M^*_d$ – динамический момент, действующий в системе.

Исходя из данного выражения блок, отображающий уравнения движения, изображен на рисунке 2.

© О.О. Панкова, 2015

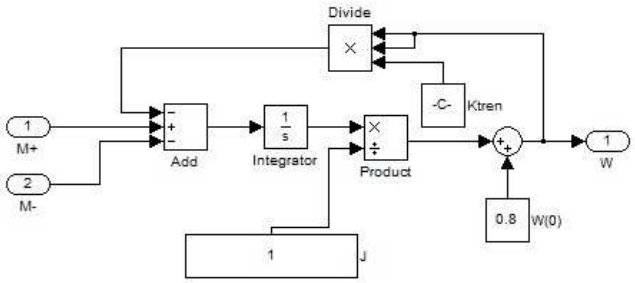


Рис. 2 – Модель главного уравнения движения ЭМС ВЭУ.

Модель блока, отображающего работу генератора электромеханической системы ВЭУ, представлена на рисунке 3.

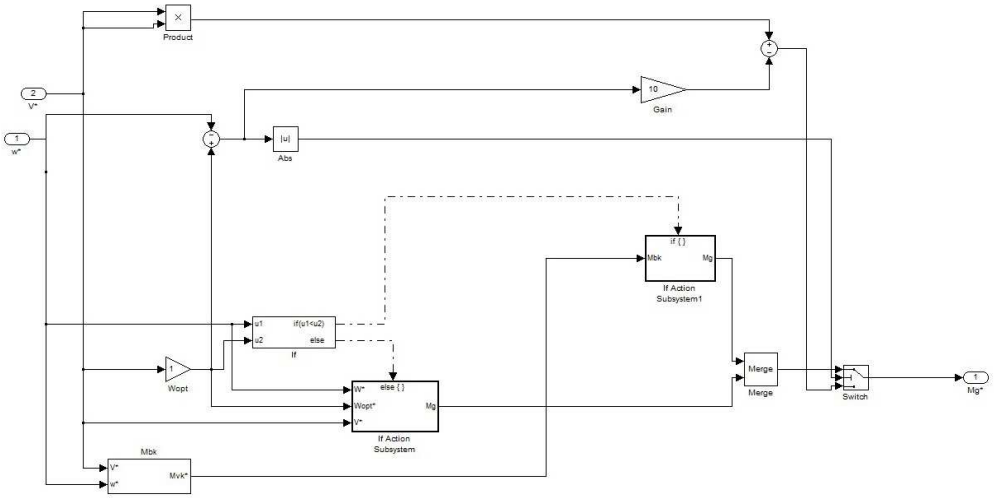


Рис.3 – Модель блока, отображающего работу генератора ЭМС ВЭУ.

В относительных единицах выражение для момента генератора имеет вид:

$$M_G^* = \frac{M_G}{M_{BK}^{\text{ном}}}. \qquad (2)$$

Модель блока механических характеристик ветротурбины реализована на основе выражения:

$$M_{BK}^* = \frac{V_b^{*3} \cdot C_P^*(Z^*)}{\omega^*} \qquad (3)$$

и представлена на рисунке 4.

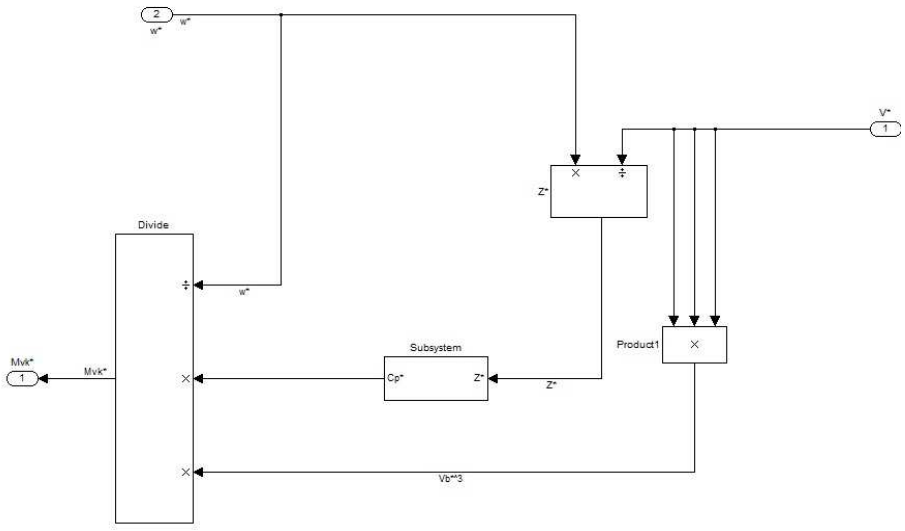


Рис.4 – Модель блока механических характеристик ветротурбины.

Модель блока ветротурбины, реализовано путем объедения блоков модели механических характеристик ветротурбины и уравнения движения (рис. 5).

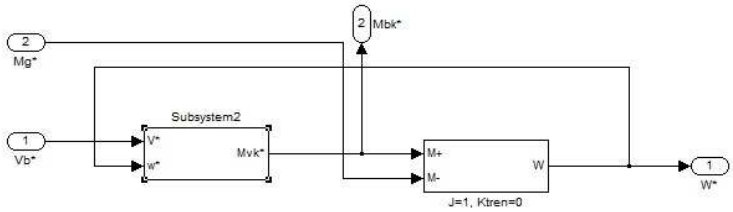


Рис.5 – Модель ветротурбины.

Результирующая модель, включающая рассмотренные выше блоки, представлена на рисунке 6.

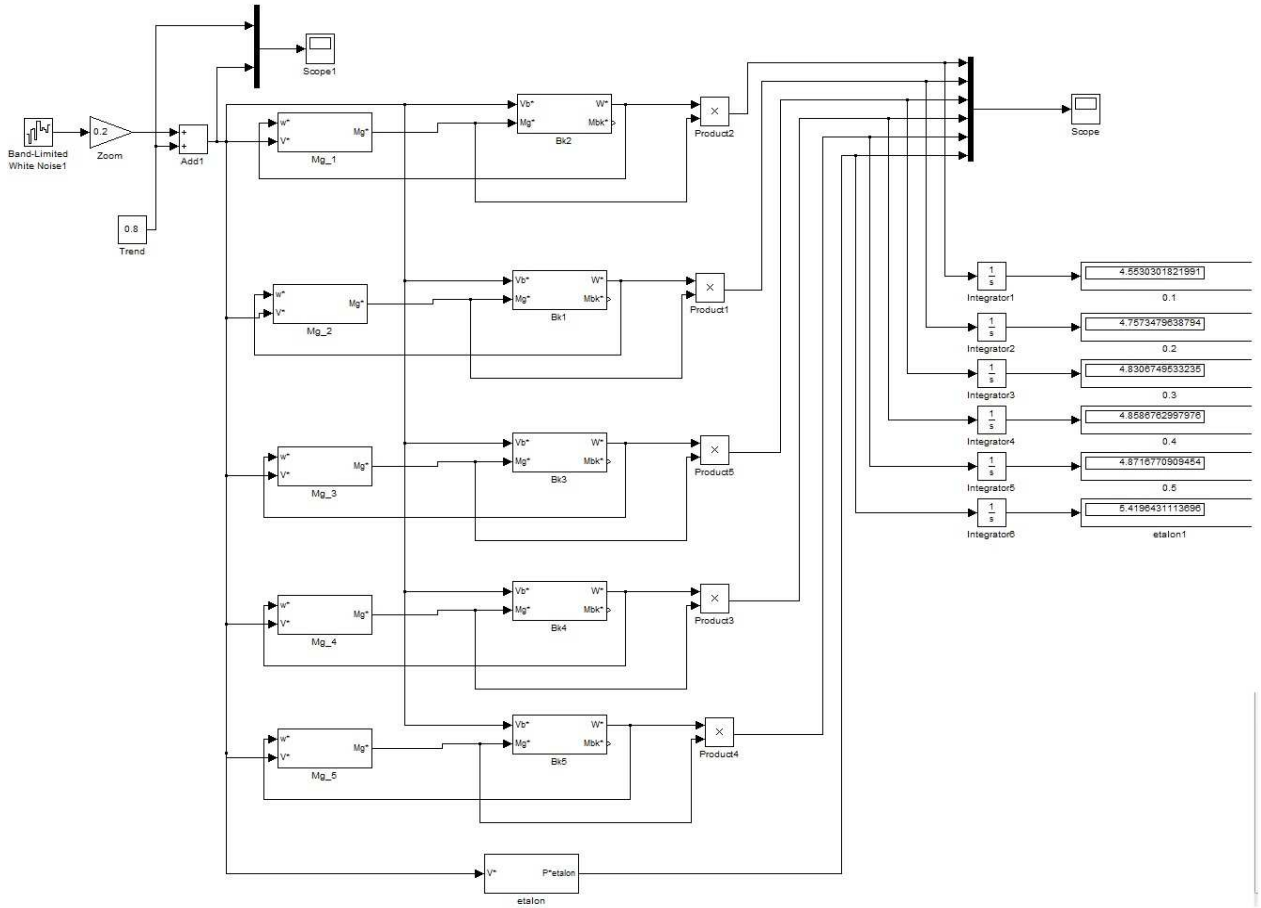


Рис.6 – Обобщенная математическая модель ЭМС ВЭУ.

Анализ эффективности работы электромеханической системы ВЭУ проводился для различных динамических моментов. Рассмотренные варианты соответствуют величинам динамического момента M_d^* = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5. Для каждого значения динамического момента получены результаты при работе ветроустановки на различной порывистости ветра. Результаты анализа эффективности работы электромеханической системы в режиме генератора, изображены на рисунке 7, в виде графика зависимости выработки от динамического момента при разной длительности порыва ветра.

Из рисунка 7 видно, что графики имеют максимумы, что говорит о наличии оптимальных значений динамического момента. Следует обратить внимание на то, что оптимальные значения динамического момента имеют разные значения при различных длительностях порыва ветрового потока.

Результаты сравнительного анализа двух способов управления ВЭУ представлены на рисунке 8.

Из графика (рис.8) видно, что использование «подкрутки» приводит к снижению суммарной выработки, на всем рабочем диапазоне значений динамического момента, что свидетельствуются о не целесообразности применения способа с «подкруткой».

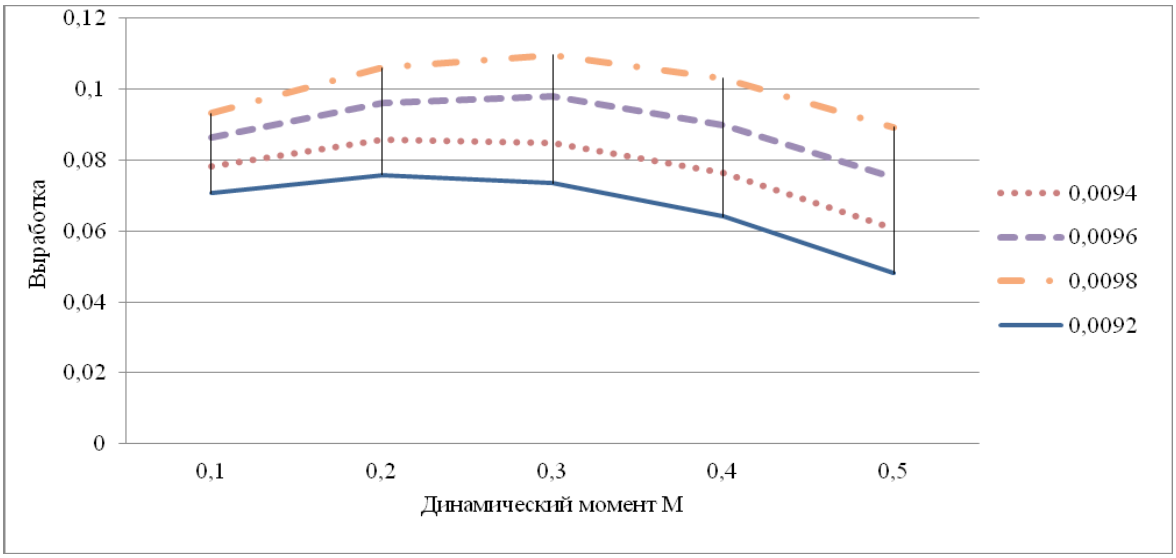


Рис. 7 – График зависимости выработки от динамического момента при разной длительности порыва ветра без «подкрутки».

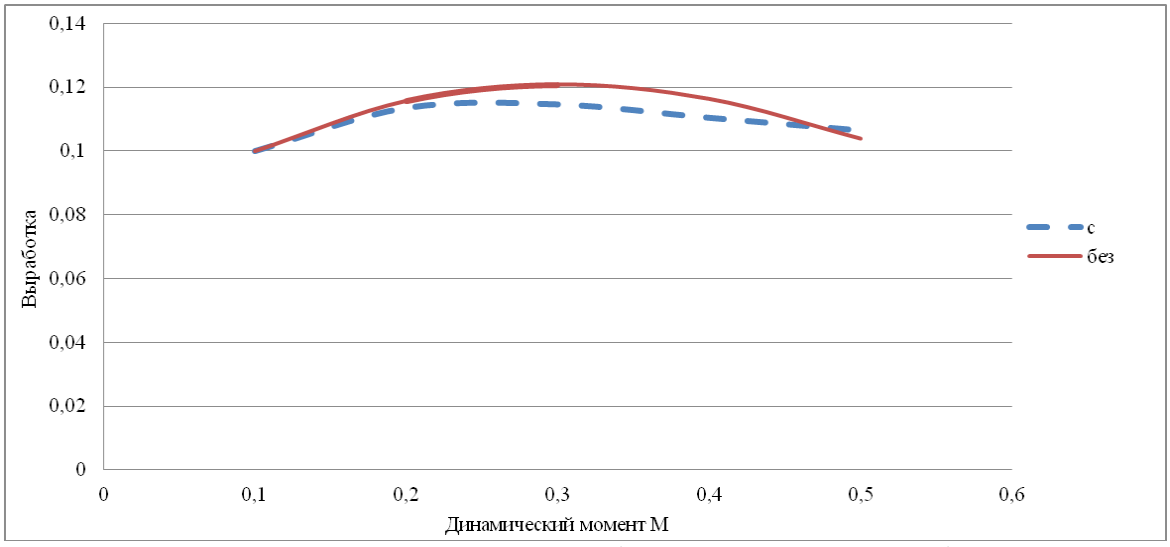


Рис.8 – График сравнения алгоритмов работы ВЭУ с «подкруткой» и без нее.

Выводы.

В результате работы были получены зависимости выработки от динамического момента при различной длительности порыва ветра.

Полученный результат показал существование оптимального динамического момента для определенной длительности порыва ветра.

Оптимальные значения динамического момента имеют разные значения при различных длительностях порыва ветрового потока.

В результате сравнительного анализа двух способов управления ЭМС ВЭУ выявлено не целесообразность использование «подкрутки».

Список литературы: 1. Алексеевский Д.Г., Анализ эффективности моментного управления электромеханической системой ВЭУ // Вестник Черниговского государственного технологического университета. Серия «Технические науки»: научный сборник ЧГТУ. – Чернигов: ЧГТУ, 2013. - №2(65). – с. 17-24.

Bibliography (transliterated): 1. Alekseyevsky D.G., Analiz effektivnosti momentnogo upravleniya elektromekhanicheskoy sistemoy VEU // Vestnik Chernigovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»: nauchny cbornik ChGTU. – Chernigov: ChGT., №2(65). 2013. 17-24.Print.

Поступила (received) 26.08.2015

УДК 621.314

Р. Н. САРАТОВСКИЙ, канд. техн. наук, ст.научн. сотр, НИПКИ «Параметр» ДонГТУ, Лисичанск;
В. И. УШАКОВ, канд. техн. наук, вед. научн. сотр., НИПКИ «Параметр» ДонГТУ, Лисичанск;
Д. В. УШАКОВ, асп., ДонГТУ, Лисичанск

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГОЯЧЕЙКОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Введение. В промышленных технологиях электротермической обработки металлов и металлопродукции все шире используются электротехнологические системы высокочастотной индукционной термообработки металлов на основе транзисторных источников питания (ИП), из-за их существенных энергетических и технологических преимуществ. Транзисторные источники обеспечивают электропитание индукционных установок токами частотой десятки – сотни кГц и комплексов мощностью десятки - сотни киловатт, реализуя при этом быстродействующее регулирование режимов электротермической обработки. В последние годы активно разрабатываются специализированные индукционные технологии для реализации процессов, в которых необходимо регулирование питающего тока и его стабильность при изменении параметров нагрузки в широких пределах.

Для решения задач, связанных с построением ИП индукционных установок, всё чаще находят применение схемы со структурой построения в виде неуправляемого выпрямителя и инвертора напряжения с эффективным алгоритмом регулирования, для которых постоянная нагрузка встречается очень редко [1]. Инвертор обычно собран на транзисторах типа IGBT или MOSFET и нагружен через согласующий трансформатор на последовательно соединенные конденсатор и индуктор. Данная структура построения ИП отличается простотой силовой части, но в тоже время сложной системой управления, которая обеспечивает необходимый технологический процесс и нормальную работу преобразователя. А нормальная работа, связанная с проведением процесса нагрева, состоящего из несколько этапов технологического процесса, обеспечивается при условии, что выходной ток и мощность потерь силовых элементов не превышают допустимого значения. Необходимый технологический процесс зависит от требуемой мощности и режима работы преобразователя, который осложняется еще и тем, что стабилизацию или регулировку выходных параметров необходимо осуществлять в широком диапазоне в условиях неоднозначных внешних воздействий.

При потребности в ИП с большой мощностью всё чаще применяют ИП выполненные на базе высокочастотных преобразователях (резонансных инверторов напряжения) построенных по многоячейковой структуре формирования выходного напряжения. Такие структуры, состоят из нескольких инверторных ячеек (ИЯ), объединенных по выходу в последовательный или параллельный контур суммирования мощности. Структура параллельно-последовательного типа, получила большое распространение, так как здесь не возникает трудностей с симметрированием токов и напряжений между ячейками [2]. Каждая ячейка питается от одного выпрямителя (В) и содержит свой ВЧ трансформатор (TV), вторичные обмотки которых соединены в последовательный контур суммирования мощности. Одним из перспективных способов регулирования выходного напряжения для такого ИП относится принцип многозонной импульсной модуляции. Для этого применяется кодовая модуляции, при которой выходные напряжения ячеек пропорциональны весовым коэффициентам двоичного кода, исходя из того, что ИЯ может находиться в двух состояниях: вольтодобавочном и закороченном. Однако такой принцип регулирования обеспечивает дискретную регулировку напряжения, которая зависит от количества ИЯ. Для устранения этого недостатка в структуру многоячейкового ИП вводится дополнительная непрерывно регулируемая ИЯ (НРЯ) (рис 1), переходящая из одной зоны в другую путём изменения комбинации включённых дискретно регулируемых ИЯ (ДРЯ). График формирования выходного напряжения представлен на рисунке 2. Точность регулирования в этом случае определяется точностью НРЯ.

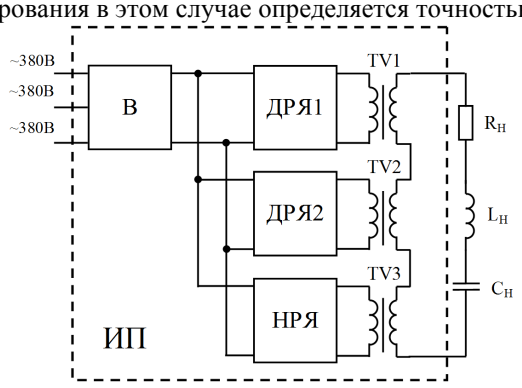


Рис. 1 Структура ИП с последовательным контуром суммирования мощности

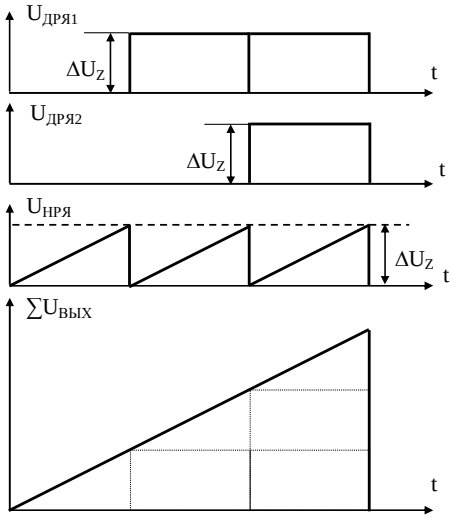


Рис. 2 График формирования выходного напряжения ИП

© Р.Н. Саратовский, В.И. Ушаков, Д.В. Ушаков, 2015

Для НРЯ возможно применять различные способы регулирования выходного тока преобразователя на базе мостового инвертора напряжения, работающего в частотном диапазоне десятки – сотни кГц [3 - 6]. Одним из таких способов регулирования выходного тока (мощности) является частотное регулирование, которое основано на изменении частоты управления [3]. Другим способом является широтно-частотный способ регулирования, основанный на совмещении широтно-импульсной модуляции и частотного регулирования [4]. Ещё одним способом регулирования является способ, основанный на низкочастотном способе модуляции при синхронизации частоты модуляции с частотой работы инвертора [5] и требующий достаточной сложной программируемой системы управления. На практике же всё чаще применяется комбинированный способ регулирования. Он заключается в одновременном регулировании значения напряжения питания инвертора и автоматической подстройкой частоты управления на резонансную частоту колебательного контура [6]. Этот способ регулирования требует наличие регулятора напряжения, которым и осуществляется регулировка напряжения питания инвертора в зависимости от задания и при изменении параметров нагрузки и своего рода быстрая защита от отклонения сетевого питающего напряжения от нормы. Это в свою очередь требует наличие двухканальной системы управления. По первому каналу осуществляется регулировка питающего напряжения инвертора, а по второму автоподстройка частоты управления на резонансную частоту контура с обеспечением оптимизирующих процессов переключения транзисторов для снижения коммутационных потерь.

Для анализа работы преобразователей частоты в современной теории и практике их проектирования важнейшее положение занимает исследование электромагнитных процессов при помощи математических моделей различного уровня детализации. Существует несколько принципиальных подходов к построению математических моделей преобразователей и соответственно вариантов используемого математического и программного обеспечения. Классическим подходом является моделирование в пространстве состояния, с использованием линейных аппроксимаций пассивных и полупроводниковых элементов силовой схемы. Уровень детализации моделей полупроводниковых элементов при этом ограничен основной характеристикой – «открыт» или «закрыт». Массовое внедрение в практику современных САПР электротехнических устройств позволил существенно расширить возможности математических моделей полупроводниковых элементов. Среди широко известных САПР можно назвать такие как OrCAD, Micro-CAP, Multisim и другие, ориентированные на PSpice моделирование программные продукты. Степень детализации моделей полупроводниковых элементов в этом случае весьма высокая, позволяющая изучать электрические свойства близкие к реальным.

Целью данной работы является анализ результатов исследования на имитационной модели динамических режимов работы многоячейкового ИП для индукционного нагрева при стабилизации выходного напряжения.

Материалы и результаты исследований. Для достижения поставленной цели с помощью программы OrCAD9.2 была разработана имитационная модель ИП, модель силовой части которого приведена на рисунке 3.

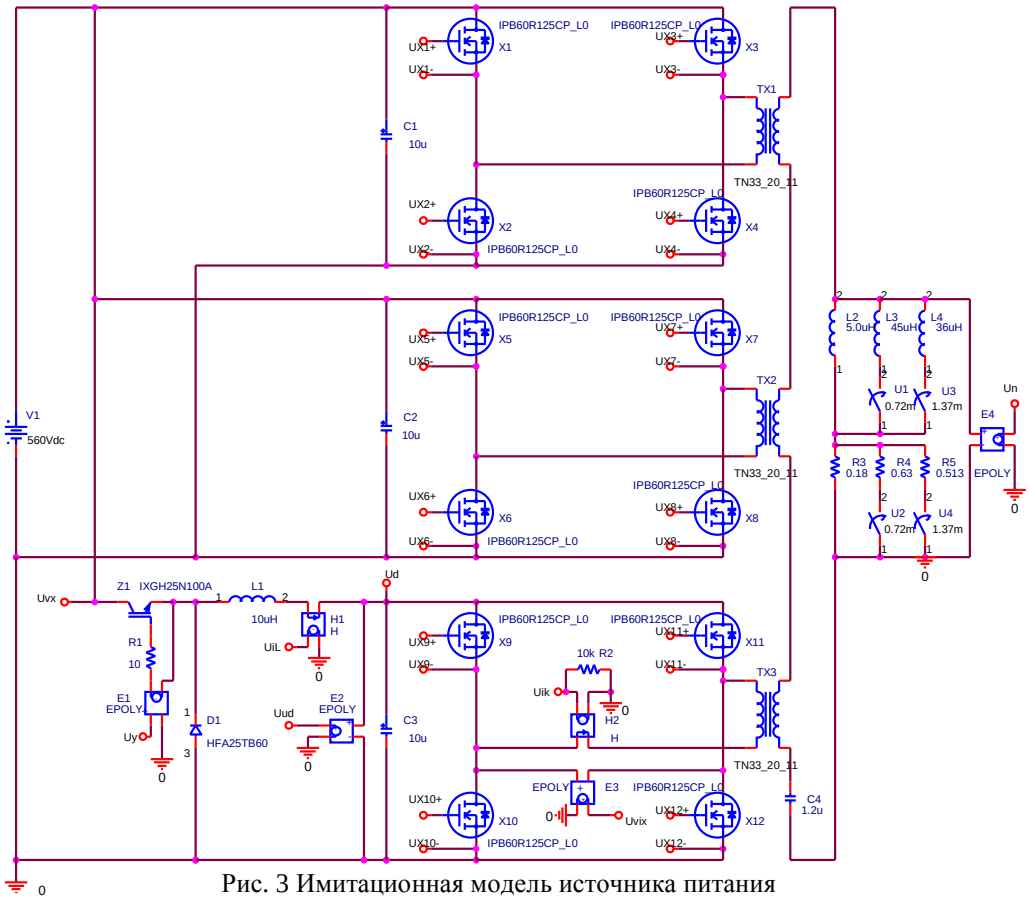


Рис. 3 Имитационная модель источника питания

ИП построен по многоячейковой структуре формирования выходного напряжения. Его силовая часть состоит из неуправляемого выпрямителя и трёх ИЯ, две из которых ДРЯ1, ДРЯ2, а третья НРЯ. В качестве ДРЯ используются мостовые резонансные инверторы напряжения, получающие питание от выпрямителя. В качестве НРЯ используется также резонансный инвертор, получающий питание от импульсного регулятора напряжения понижающего типа (РН), который также питается от выпрямителя. Согласование ИЯ с индукционной нагрузкой, как правило, осуществляется с помощью компенсирующего конденсатора и согласующих трансформаторов. Поэтому каждая ДРЯ и НРЯ нагружены на свой согласующий трансформатор, вторичные обмотки которого соединены последовательно с резонансным контуром, состоящего из индукционной нагрузки и компенсирующей емкости.

Для анализа работы ИП были исследованы динамические режимы его работы при стабилизации напряжения на нагрузке в различных типовых условиях. В качестве типовых условий были выбраны следующие режимы: стабилизация при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения; стабилизация на заданном уровне при резком изменении значения напряжения задания и стабилизация при резком изменении параметров индукционной нагрузки. Для анализа работы в режиме стабилизации напряжения при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения была исследована отдельно работа НРЯ, а именно работа РН и его системы управления, имитационная модель которой представлена на рисунке 4.

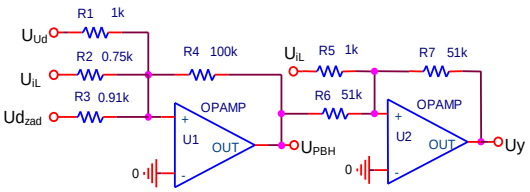


Рис. 4 Модель системы управления РН

Система управления РН построена по принципу подчиненного регулирования координат и является асинхронной релейной системой, которая служит для ограничения отдельных фазовых координат на заданном уровне. В первую очередь ограничению подвергается отклонение (перерегулирование) выходного напряжения U_d, исходя из требований к качеству переходного процесса. Кроме выходного напряжения ограничению подвергается ток дросселя I_L. Такое ограничение позволяет обезопасить силовой транзистор от перегрузок и дает возможность обеспечить нормальное функционирование схемы при коротком замыкании в нагрузке. Кроме того, введение обратной связи по току дросселя позволяет повысить устойчивость переходных процессов. В качестве регуляторов используются асинхронные релейные регуляторы, работающие в скользящем режиме, а именно внутренний регулятор тока дросселя, который подчинен внешнему регулятору выходного напряжения (РВН). Такое управление обеспечивает высокие динамические и статические показатели, а также позволяет получить достаточно высокое качество выходного напряжения РН и предельное быстродействие при минимальном количестве элементов схемы и более простой системе управления.

Временные диаграммы работы РН и его системы управления, а также диаграммы выходного тока $I_{ВЫХ}$ и напряжения инвертора $U_{ИНВ}$ в режиме стабилизации напряжения на нагрузке при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения представлены на рис.5.

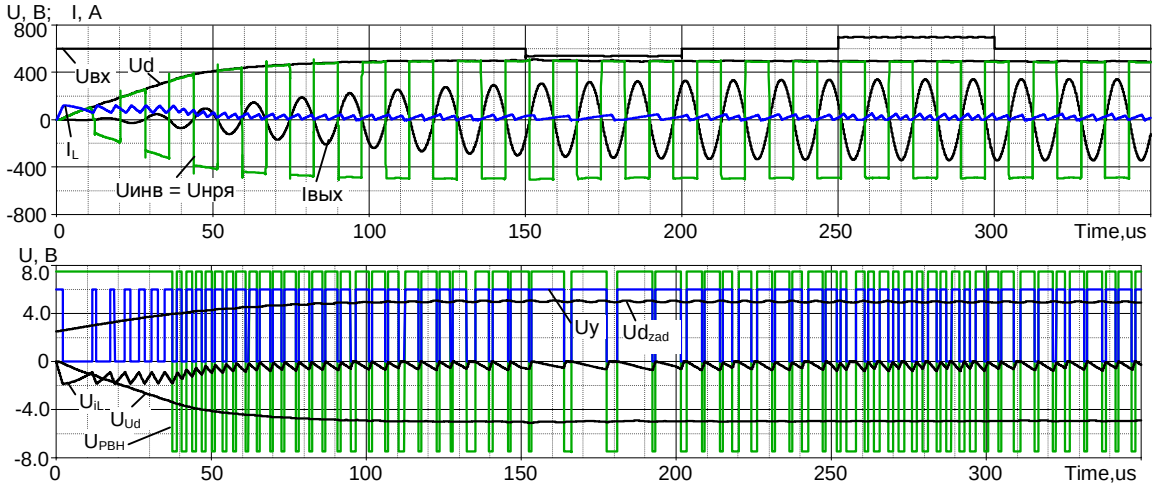


Рис.5 Временные диаграммы работы ИП при изменении входного питающего напряжения

Из представленных временных диаграмм видно, что переходной процесс заряда фильтровой ёмкости, а, следовательно, и изменение напряжения питания инвертора U_d проходит без перерегулирования с высоким быстродействием. Ток дросселя I_L не превышает максимального значения и ограничивается на установленном уровне. Здесь же показано реакцию ИП на резкое уменьшение за время 150 - 200 мкс и увеличение за время 250 - 300 мкс входного питающего напряжения $U_{ВХ}$. Из диаграмм работы системы управления видно, что она отрабатывает это изменение и обеспечивает безопасную работу силового ключа во время пуска и стабилизацию выходного напряжения на уровне, соответствующем заданному значению напряжения на нагрузке, что свидетельствует неизменному значению выходного тока инвертора $I_{ВЫХ}$.

Для анализа работы преобразователя в режиме стабилизации напряжения на нагрузке при резком изменении значения напряжения задания и резком изменении параметров индукционной нагрузки была исследована работа системы управления РН и узла стабилизации, имитационная модель которой представлена на рисунке 6.

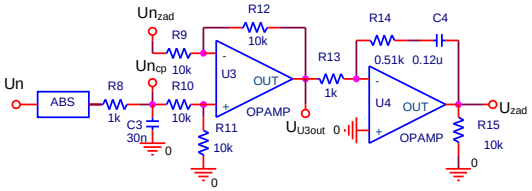


Рис. 6 Модель узла стабилизации

Для стабилизации напряжения на нагрузке во время процесса нагрева в силовую схему установлен датчик напряжения, через который осуществляется обратная связь с технологическим процессом. По величине напряжения на нагрузке u_H контролируется пропорциональный ему выходной ток и ток через ключевые элементы (транзисторы и диоды). Выходной сигнал с датчика Un поступает в узел стабилизации, в основе которого лежит разностный усилитель с ПИ-регулятором. Сформированный сигнал Un поступает на выпрямитель, представленный на модели элементом ABS, и далее на интегрирующую цепочку для формирования среднего значения напряжения на нагрузке Un_{cp}. Далее этот сигнал сравнивается разностным усилителем с заданным значением Un_{zad}. В результате на его выходе формируется результирующий сигнал рассогласования U_{U3out}. Этот сигнал поступает на ПИ-регулятор, выходной сигнал которого является сигналом задания для системы управления РН. Таким образом, на выходе ПИ-регулятора формируется сигнал задания U_{zad}. Поскольку формирование напряжения на нагрузке осуществляется поэтапно тремя ИЯ, то управляющий сигнал Ud_{zad} для РН формируется согласно графика (рис.2). Если выходное напряжение ИП формируется только НРЯ (первый этап формирования), то значение сигнала задания $Ud_{zad} = U_{zad}$ и соответствует заданному значению напряжения на нагрузке. В случае формирования выходного напряжения на втором этапе, когда работает ДРЯ1 и НРЯ, сигнал задания Ud_{zad} преобразуется в пропорциональный $Ud_{zad} = U_{zad} - Ud_{zad\,max}$, а если на третьем этапе, когда работают ДРЯ1, ДРЯ2 и НРЯ то $Ud_{zad} = U_{zad} - 2Ud_{zad\,max}$. Таким образом сумма выходных напряжений ИЯ обеспечивает заданное значение на нагрузке.

На рисунке 7 представлены временные диаграммы работы узла стабилизации, системы управления РН и диаграммы напряжения Un и выходного напряжения ИП $U_{ИНВ}$ в режиме стабилизации напряжения на нагрузке сначала при резком увеличении значения сигнала задания Un_{zad} в моменты времени 0,5 мс и 1 мс, а затем его уменьшении в моменты времени 1,5 мс и 2 мс.

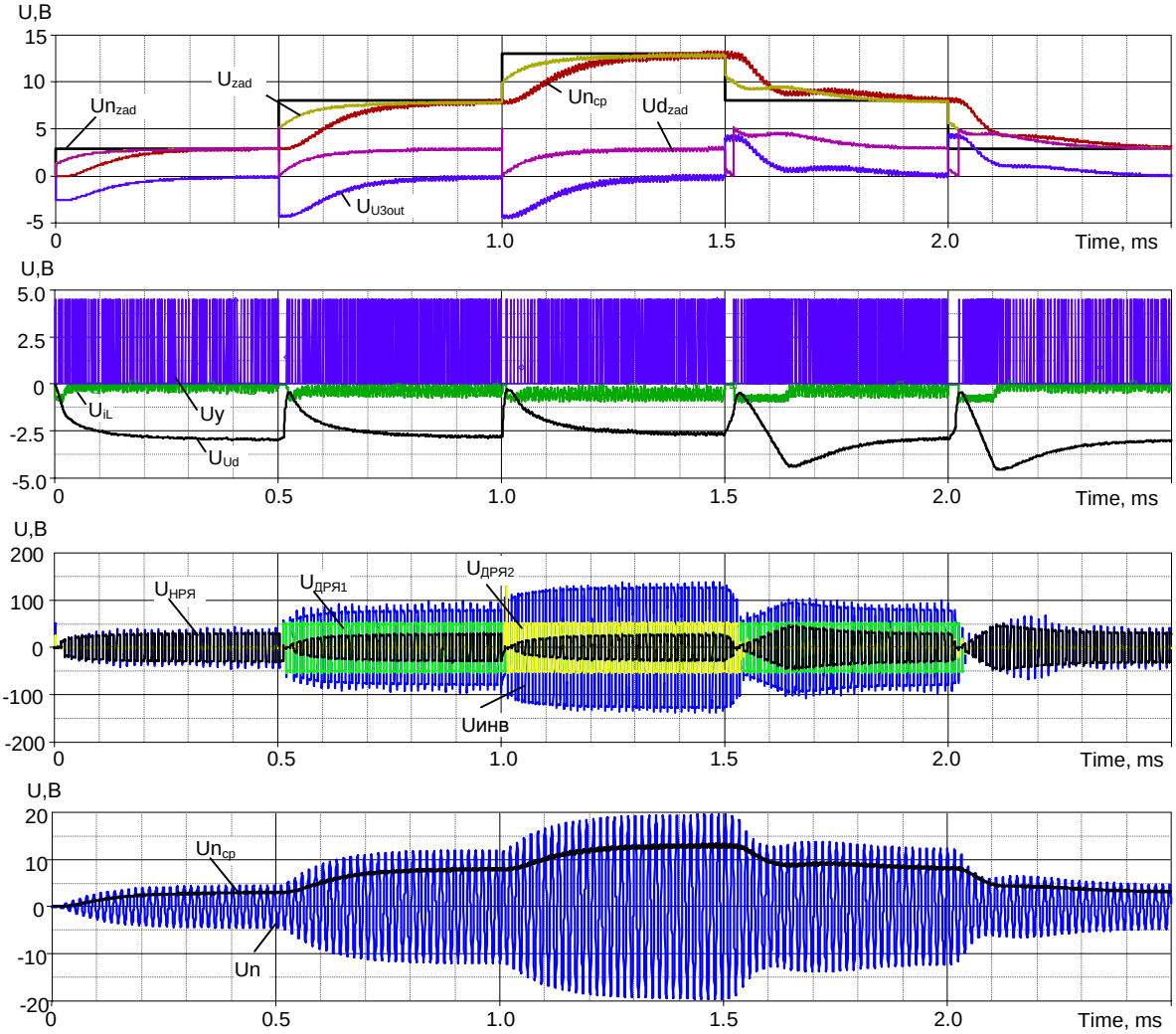


Рис.7 Временные диаграммы работы ИП при изменении сигнала задания

Из представленных временных диаграмм на рисунке 7 видно, что при неизменных параметрах нагрузки резкое изменение сигнала задания Un_{zad} приводит к изменению режима работы многоячейкового преобразователя. Разностный усилитель в узле стабилизации реагирует на это изменение и ПИ-регулятор осуществляет корректировку сигнала U_{zad}, а следовательно и Ud_{zad}. Система управления РН также реагирует и на его выходе формируется необходимое напряжение питания инвертора, в результате суммарное выходное напряжение ИП $U_{ИНВ}$.обеспечивает заданное напряжение на нагрузке. На диаграммах видно, что в момент пуска установлена Un_{zad} = 3В и по истечении 0.4 мс обеспечивается выход на заданный режим без перерегулирования и далее его стабилизация. Эта временная задержка в 0,4 мс связана с инерционностью самого инвертора и постоянной времени ПИ-регулятора. В течении этого времени напряжение на нагрузке формируется только выходным напряжением НРЯ $U_{НРЯ}$, что подтверждается диаграммами изменения напряжения Un и выходным напряжением ИП $U_{ИНВ} = U_{НРЯ}$. В момент времени 0,5 мс и 1мс значение Un_{zad} выросло соответственно до 8В и до 13 В и по истечении 0.4 мс в каждом случае также обеспечивается выход на заданный режим без перерегулирования. Напряжение на нагрузке сформировано уже работой НРЯ и ДРЯ1 ($U_{ИНВ} = U_{НРЯ} + U_{ДРЯ1}$) и соответственно НРЯ, ДРЯ1 и ДРЯ2 ($U_{ИНВ} = U_{НРЯ} + U_{ДРЯ1} + U_{ДРЯ2}$). Далее в момент времени 1,5 мс и 2 мс значение Un_{zad} уже снизилось сначала до 8В, а потом до 3 В и по истечении уже 0.5 мс обеспечивается выход на заданный режим без перерегулирования. Напряжение на нагрузке сформировано уже работой НРЯ и ДРЯ1 и соответственно только работой НРЯ.

На рисунке 8 представлены временные диаграммы работы узла стабилизации, системы управления РН и диаграммы напряжения Un и выходного напряжения ИП $U_{ИНВ}$ в режиме стабилизации напряжения на нагрузке при изменении параметров индукционной нагрузки, эквивалентных для режимов работы начиняя с холодного металла до горячего в моменты времени 0.72 мс и 1.37 мс.

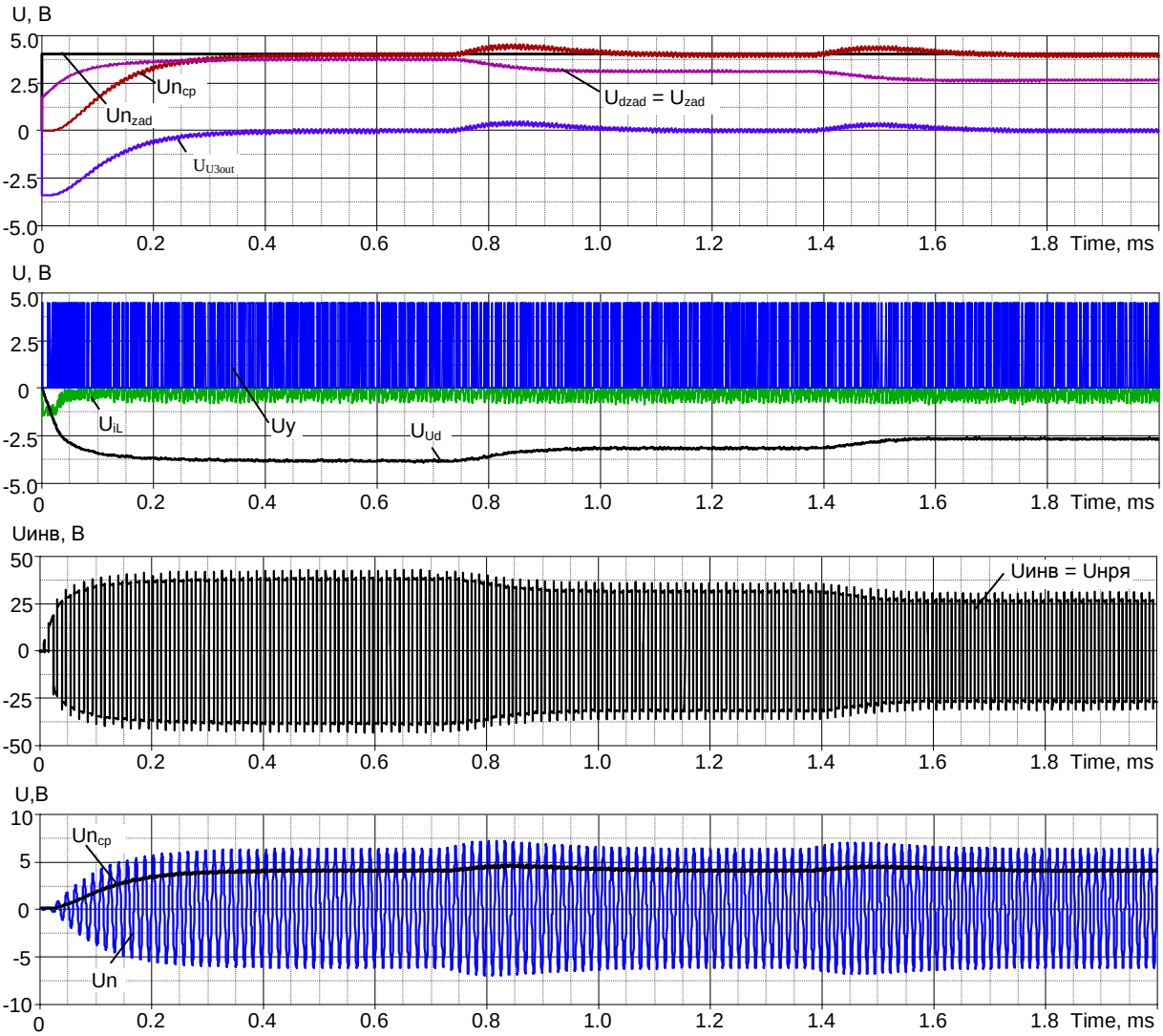


Рис.8 Временные диаграммы работы ИП при изменении параметров индукционной нагрузки

Из представленных временных диаграмм на рисунке 8 видно, что при неизменном напряжении задания Un_{zad}=4В резкое изменение параметров нагрузки приводит к изменению режима работы ИП, а именно изменяется резонансная частота контура и значение напряжения на нагрузке. Разностный усилитель реагирует на эти

изменения и ПИ-регулятор осуществляет корректировку сигнала U_{zad}, а следовательно и Ud_{zad}., что приводит к изменению напряжения на выходе РН и тем самым к сохранению заданного значения напряжения на нагрузке. Также на диаграммах видно, что резкое изменение параметров нагрузки в моменты времени 0.72 мс и 1.37 мс приводит на время 0.25 мс к незначительному перерегулированию напряжения. Это связано с инерционностью самого инвертора и постоянной времени ПИ-регулятора. В реальных условиях нагрузка меняется значительно медленнее, поэтому узел стабилизации успеет среагировать на это изменение и позволит обеспечить напряжение на нагрузке на заданном уровне в течение всего технологического процесса нагрева. В течение всего этого времени напряжение задания Un_{zad} = 4В, поэтому напряжение на нагрузке формируется только работой НРЯ, что подтверждается диаграммами напряжения Un и выходным напряжением инвертора $U_{ИНВ}$. При увеличении Un_{zad} выше 5В или 10В в работу вступают соответственно ДРЯ1 или ДРЯ1 и ДРЯ2, а процессы стабилизации происходят аналогично как при работе с НРЯ.

Следует отметить, что для обеспечения оптимального режима работы многоячейкового ИП с минимальными коммутационными потерями в транзисторах во время стабилизации или регулирования напряжения на нагрузке в имитационной модели системы управления ИП применен принцип самовозбуждения с адаптивным алгоритмом управления и синхронной работой всех ИЯ. Принцип самовозбуждения основан на том, что по выходным сигналам датчика коммутирующего тока U_{iK} и датчика выходного напряжения U_{vix}, установленных в НРЯ, отслеживается изменение собственной частоты нагрузочного контура, связанное с изменением параметров индукционной нагрузки в ходе технологического процесса и постоянно подстраивается частота работы ИП, обеспечивая оптимальное согласование с минимальной индуктивной расстройкой. При этом частота работы ИП полностью определяется собственной частотой нагрузочного контура. Этот принцип управления позволяет обеспечить устойчивую работу ИП в различных динамических режимах, характерных для питания установок индукционного нагрева. К таким режимам относятся скачки сетевого напряжения, вызванные, например, включением мощных электроустановок или авариями в сетях электроснабжения, изменения частоты колебательного контура и его активного сопротивления, обусловленные температурной зависимостью электрических параметров индукционной нагрузки, межвитковые замыкания в индукторе, кратковременные короткие замыкания индуктора характерные, например, для технологии сварки труб, извлечение детали из индуктора и т.д.

Выводы. В результате работы предложена имитационная модель многоячейкового источника питания, которая позволяет анализировать как электромагнитные процессы в силовой части, так и регулировочные свойства преобразователя с индукционной нагрузкой.

Анализ результатов моделирования показал достаточно хорошие результаты, по которым видно что предложенная имитационная модель системы управления РН и узла стабилизации позволяет с достаточной точностью обеспечить режим стабилизации напряжения на нагрузке при различных условиях, а также оценить поведение ИП при различных динамических режимах.

Предложенный принцип стабилизации напряжения по аналогии можно также распространить на стабилизацию мощности или выходного тока преобразователя.

Список литературы: 1. *Васильев А.С.* Источники питания электротермических установок / *А.С. Васильев, С.Г. Гуревич, Ю.С. Иоффе* - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 248с. **2.** Паралельно-послідовне з'єднання високочастотних інверторів з резонансним контуром на виході / *М.М. Юрченко, В.Я. Гуцалюк, П.М. Шевченко* [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2005. – Ч.3. – С. 16 – 19. **3.** Способы регулирования тока транзисторного инвертора напряжения с последовательным резонансным контуром на выходе / *Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко, В.Я. Гуцалюк* [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2002. – Ч.1. – С. 79 – 81. **4.** Частотный и широтно-частотный способы регулирования транзисторным инвертором напряжения с последовательным резонансным контуром на выходе. / *В.Я. Гуцалюк, П.Н. Шевченко, И.О. Слесаревский, П.Ю. Герасименко* // Технічна електродинаміка. – 2006. – №6. – С. 25 – 29. **5.** Низькочастотні способи регулювання струму транзисторних інверторів напруги установок індукційного нагрівання / М.М. Юрченко, В.Я.Гуцалюк, П.М. Шевченко [та ін.] // Праці Інституту електродинаміки НАН України (Зб. наук. праць). – 2007. – Вып. 18. – С. 108 – 112. **6.** Источник высокочастотного тока для установок индукционных технологий / *Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко, В.Я. Гуцалюк, И.О. Слесаревский* // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2000. – Ч.2. – С. 22 – 23.

Bibliography (transliterated): 1. Vasil'ev, A.S., S.G. Gurevich and Yu.S. Ioffe. *Istochniki pitaniya elektrotermicheskikh ustanovok*. Moscow: Energoatomizdat, 1985. Print. **2.** Jurchenko, M.M., V.Ja. Gucaljuk and P.M. Shevchenko. "Paralel'no-poslidovne z'jednannja vysokochastotnyh invertoriv z rezonansnym konturom na vyhodi." *Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta energoefektyvnist'"* No.3. (2005): 16 - 19. Print. **3.** Yurchenko, N.N., P.N. Shevchenko and V.Ya. Gutsalyuk. "Sposoby regulirovaniya toka tranzistornogo invertora napryazheniya s posledovatel'nym rezonansnym konturom na vykhode." *Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta energoefektyvnist'"* No.1. (2002): 79 - 81. Print. **4.** Gutsalyuk, V.Ya., P.N. Shevchenko and I.O. Slesarevskiy. "Chastotnyy i shirotno-chastotnyy sposoby regulirovaniya tranzistornym invertorom napryazheniya s posledovatel'nym rezonansnym konturom na vykhode." *Tehnichna elektrodynamika*. No.6. (2006): 25 - 29. Print. **5.** Jurchenko, M.M., V.Ja. Gucaljuk and P.M. Shevchenko. "Nyz'kochastotni sposoby reguljuvannja strumu tranzystornyh invertoriv naprugy ustanovok indukcijnogo nagrivannja." *Praci Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrai'ny (Zb. nauk. prac')*. No.18. (2007): 108 - 112. Print. **6.** Yurchenko, N.N., P.N. Shevchenko and V.Ya. Gutsalyuk. "Istochnik vysokochastotnogo toka dlya ustanovok induktsionnykh tekhnologiy." *Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta energoefektyvnist'"* No.2. (2000): 22 - 23. Print.

Поступила (received) 27.08.2015

УДК 62-523.3:66-933.6

В. О. ДІДЕНКО, аспірант НТУУ «КПІ», Київ;
О. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, докторант НТУУ «КПІ», Київ

ЯКІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГІДРОПРИВОДОМ МЕХАНІЗМУ ХИТАННЯ КРИСТАЛІЗАТОРА МБЛЗ

Вступ. Точна підтримка закону переміщення кристалізатора машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) має значний вплив на якість безперервно литих заготовок. Застосування механізмів хитання кристалізатора МБЛЗ із гідравлічним приводом відкриває більш широкі можливості керування параметрами процесу на відміну від електромеханічного приводу і, відповідно, дозволяє отримувати більш високу якість кінцевої продукції [1]. Відомо, що гідравлічний привод механізму хитання кристалізатору МБЛЗ є нелінійною системою [2, 3]. У зв'язку з цим заслуговують уваги питання оцінки якості функціонування таких систем при зміні параметрів режиму хитання, обумовлених технологією безперервного розливання сталі [4], та формування вимог щодо точності підтримки технологічних режимів хитання.

Постановка задачі. Метою роботи є оцінка якості функціонування системи гідравлічного приводу механізму хитання кристалізатора МБЛЗ за допомогою його математичної моделі, розробленої в [3], а також формування вимог до точності підтримки параметрів режиму хитання в таких системах.

Результати дослідження. Функціональна схема системи керування механізмом хитання слябової МБЛЗ представлена на рис. 1 [5]. Авторами [3] розроблена математична модель цієї структури, яку представлено на рис. 2. Модель гідроприводу виокремлено в блок 2. Сервоклапан, згідно його перехідної характеристики [6], представляється аперіодичною ланкою – блок 1 – з наступними параметрами: постійна часу $T_1 = 0{,}01$ с, коефіцієнт передачі $K_1 = 0{,}1$. Блоки 1 і 2 є об'єктом керування. Функцію стабілізації положення штока гідроциліндра виконує регулятор 3 на основі негативного зворотного зв'язку за положенням. Замкнена структура на рис. 2 представляє систему автоматичного керування (САК) гідроприводом механізму хитання кристалізатора МБЛЗ.

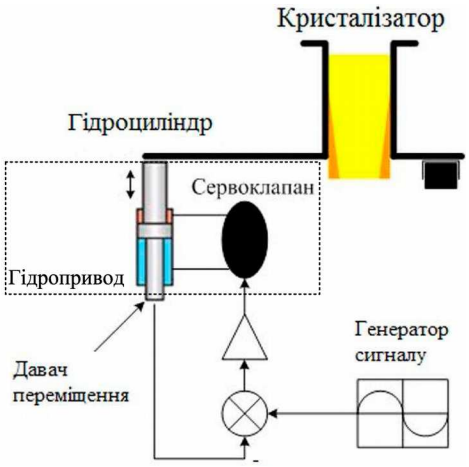


Рис. 1 – Функціональна схема системи керування механізмом хитання слябової МБЛЗ [5]

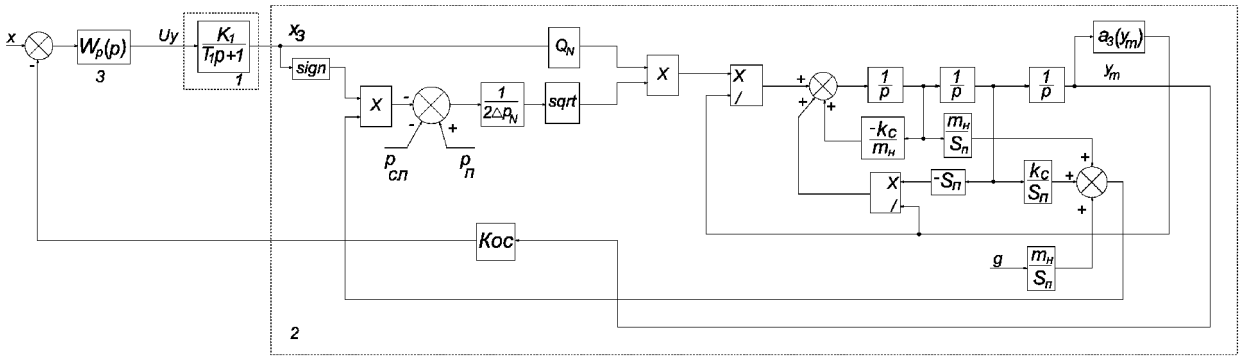


Рис. 2 – Структура САК гідроприводом механізму хитання кристалізатора МБЛЗ

© В. О. Діденко, О. Ф. Бондаренко, 2015

Засобами Simulink була виконана лінеаризація блока 2 послідовно з'єднаними інтегруючою ланкою та ланкою другого порядку. Це дозволило представити об'єкт керування як лінійну систему і попередньо обрати коефіцієнт підсилення П-регулятора (блок 3) за умови забезпечення стійкості замкненого контуру стабілізації переміщення. Необхідно відзначити, що також можливе застосування методів структурно-параметричної оптимізації, але, зважаючи на наявність в об'єкті змінних параметрів, неможливо гарантувати якісного функціонування замкненої системи.

Результати моделювання під час відтворення сигналу переміщення нелінійною системою показані на рис. 3. При цьому параметри сигналу завдання є такими: амплітуда – 3 мм; частота – 2 Гц; коефіцієнт несинусоїдальності – 0,7.

Для оцінки якості функціонування системи автоматичного керування гідроприводом було використано наступний інтегральний показник якості:

$$I=\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_1+T}|x(t)-y_m(t)|dt\ , \tag{1}$$

де T – період сигналу хитання; t_1 – момент часу, при якому вільна складова перехідного процесу в замкненій системі наближається до нуля (на рис. 3 – 1,5 с). Цей показник характеризує якість функціонування системи як за лінійного, так і за коливального перехідного процесу. Для подібних задач також широко використовується квадратичний критерій, однак через піднесення до квадрату сигналу похибки великі відхилення набувають у кінцевому значенні інтегралу істотно більшу вагу, ніж малі [7].

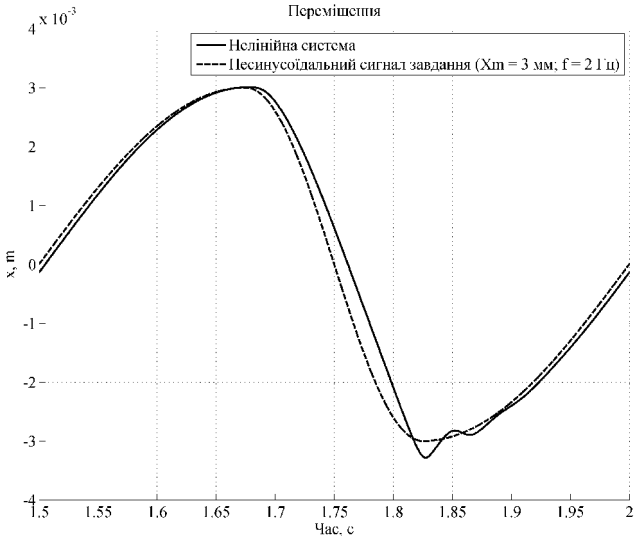


Рис. 3 – Формування закону хитання нелінійною системою гідроприводу

Авторами [9] пропонується методика визначення оптимальних параметрів гармонічного режиму хитання кристалізатора, що враховує величину максимальної деформації заготовки Δu_m. Математично ці умови записуються у вигляді:

$$\frac{\Delta u_m}{A}\geq\frac{4(m-1)\arccos(\frac{1}{m})}{3m}\ , \tag{2}$$

$$\frac{\Delta u_m}{A}\geq\frac{\pi}{m}-2\ . \tag{3}$$

де m – індекс випередження, що дорівнює співвідношенню максимальної швидкості гармонічного закону до швидкості розливання V_p; A – амплітуда гармонічного закону руху кристалізатора. Для пошуку оптимальних параметрів проводилось спільне рішення нерівностей (2) і (3) графічним методом (рис. 4). В результаті встановлено, що максимальному «часу заліковування» (τ_N = 0,24T) відповідає режим хитання кристалізатора з амплітудою A = 3,6Δu_m і періодом T = 4,55(A/V_p) [9]. Для визначення оптимальних параметрів закону хитання кристалізатора авторами роботи було прийнято раніше розраховані значення максимальних деформацій «скоринки» заготовки. Для сталі 20 (Δu_m = 0,62 мм) зі швидкістю розливання V_p = 0,9 м/хв оптимальною є амплітуда хитання A = 2,2 мм і період T = 0,67 с. Автори відзначають, що в реальних умовах на МБЛЗ Донецького металургійного заводу був встановлений режим хитання кристалізатора близький до розрахункового, при цьому отримано дуже високу якість поверхні заготовки зі сталі ШХ15 [9]. Автором [10] встановлено, що відхилення швидкості розливання від заданого значення може становити ±0,083 м/хв.

Візьмемо за базові значення технологічні параметри, які визначені авторами [9] для сталі 20, та визначимо зміну індексу випередження при зміні швидкості розливання. Отримаємо вираз:

$$\Delta m = \frac{-\omega A \Delta}{V_p (V_p + \Delta)} . \quad (4)$$

де Δm – зміна індексу випередження; Δ – зміна швидкості розливання, що становить ±0,083 м/хв; ω – кутова частота гармонічного закону хитання.

Зміна індексу випередження потребуватиме у відповідності з умовами (2) і (3) перерахувати параметри гармонічного закону хитання. За базовий приймаємо індекс випередження, визначений авторами [9] як оптимальний (m = 1,38) – точка перетину кривих 1 і 2 на рис. 4.

Збільшення швидкості розливання на величину Δ призводить до зменшення індексу випередження на величину 0,116 відносно базового. Амплітуду гармонічного закону знаходимо за виразом (3) прирівнявши праву та ліву частину, яка дорівнює 1,27 мм. При зменшенні швидкості розливання амплітуду визначаємо аналогічно, але використовуємо вираз (2) тому що індекс випередження збільшується. Вона становитиме 1,597 мм.

Зміну амплітуди визначаємо, знайшовши різницю між базовою та новими значеннями, які становлять 0,93 та 0,63 мм. В результаті отримуємо, що точність підтримки амплітуди закону хитання системою гідравлічного приводу повинна становити менш ніж 0,63 мм. Даний результат справедливий і для несинусоїдального закону руху [4], оскільки крива переміщення складається з відрізків синусоїд на інтервалі періоду коливань.

Згідно з технологічними вимогами безперервного лиття [4] межі зміни параметрів хитання кристалізатора такі: амплітуда 0…7 мм; частота 1,67…3,3 Гц; коефіцієнт несинусоїдальності 0,55…0,8. Тому для визначення інтегральних показників якості функціонування нелінійної системи виконувалася варіація параметрів відносно базового значення в цих зазначених межах. У результаті встановлено, що найбільший вплив на них має амплітуда сигналу завдання. Залежність показника якості, розрахованого за виразом (1), від амплітуди хитання кристалізатора показана на рис. 5. Характер цієї залежності можна пояснити наявністю в структурі системи елемента типу насичення – гідророзподільника. У межах працездатного стану цей елемент працює на лінійній ділянці. Однак при виході за їх межі – настає його насичення, що призводить до різкого погіршення показників якості регулювання.

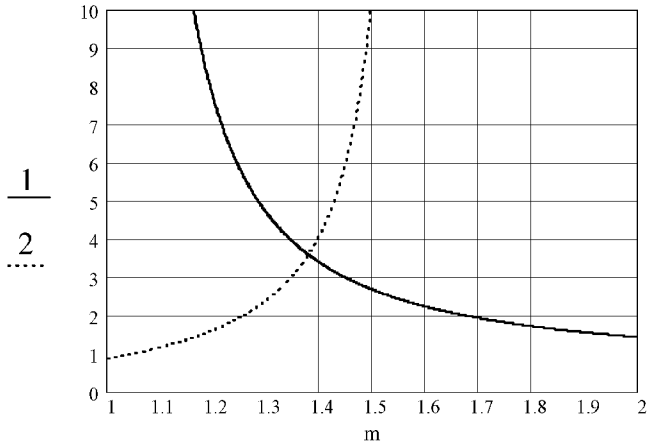


Рис. 4 – Графічне рішення системи нерівностей (3) і (4) через обернені вирази – крива 1 і 2 відповідно.

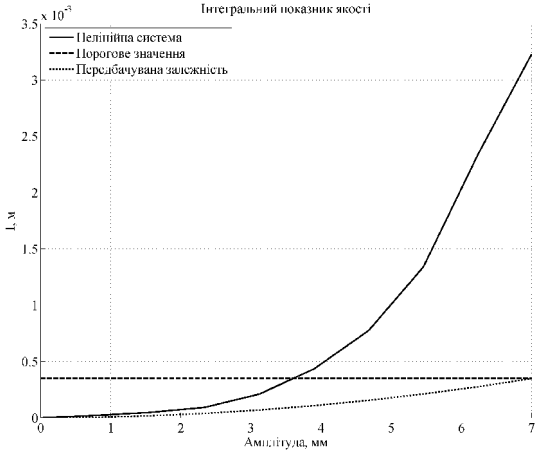


Рис. 5 – Інтегральний показник якості при частоті 2 Гц та коефіцієнті несинусоїдальності 0,7

Було проведено оцінку інтегральних показників якості на основі результатів вимірювань на ПАТ «АМК» розробленою системою моніторингу параметрів хитання кристалізатора МБЛЗ [8]. Це дозволило встановити його порогове значення на рівні $3{,}5\times10^{-4}$ м, при перевищенні якого система вважається непрацездатною. Така точність підтримки амплітуди хитання повністю задовольняє вимоги (2) і (3) тому що менша ніж 0,63 мм.

Наведені вище приклади дають підставу стверджувати, що для систем гідроприводу з П-регулятором, існує свій поріг працездатності. При його перевищенні спостерігається різке погіршення якості функціонування. Для даного випадку, згідно з результатами моделювання, він склав 3,7 мм при допуску 0,35 мм та 4,2 мм при допуску 0,63 мм. Але згідно з технологією безперервного розливання сталі верхній поріг підтримуваної амплітуди складає 7 мм – тому система в цьому випадку буде непрацездатною. Для розширення меж її працездатності потрібно розробити такий алгоритм керування перетворювачем гідроприводу, що зробить замкнену систему інваріантну до нелінійностей в робочому діапазоні. Передбачуваний графік залежності на рис. 5 такої системи наступний: приблизно до 4 мм інтегральний показник якості значно менше порогового значення, далі він зростає і після 7 мм наближається до значення 0,63 мм (у кращому випадку 0,35 мм).

Висновки. Встановлено, що показники якості функціонування САК гідроприводом механізму хитання суттєво залежать від амплітуди хитання, при цьому за умови відтворення несинусоїдального закону зі збільшенням амплітуди хитання точність відтворення заданого закону хитання погіршується випереджаючими темпами. Проектування подібних систем вимагає встановлення порогового значення амплітуди хитання, при перевищенні якого система буде вважатися непрацездатною. В подальшому перспективним вбачається розробка керування перетворювачем гідроприводу за критерієм мінімуму інтегрального показника якості з урахуванням у моделі нелінійних властивостей сервоклапану і за умови забезпечення працездатності системи в широкому діапазоні зміни параметрів технологічного режиму хитання кристалізатора МБЛЗ.

Список літератури: 1. Особенности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом / *А. Н. Смирнов, О. В. Антыкуз, А. Ю. Цупрун, В. М. Пильгаев*. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – 2010. – №1. – С. 290–294. **2.** *Zhou S.* Modeling and Control of Electro-Hydraulic-Controlled Stepping Cylinder for Mold Oscillation / *S. Zhou, M. Xiao, J. Song.* // Jinchun. – 2011. – №99. – С. 183–189. **3.** *Діденко В. О.* Математичне моделювання механізму хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок з гідравлічним приводом / *В. О. Діденко, О. Ф. Бондаренко, О. М. Полєно.* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №4. **4**. Some Approaches to Choosing Rational Mold Oscillation Parameters / *A. N. Smirnov, O. V. Antykuz, A. Y. Tsuprun, V. M. Pilgaev.* // Russian Metallurgy (Metally). – 2008. – №8. – С. 700–705. **5.** Системы управления процессами и механизмами машин непрерывного литья заготовок [Електронний ресурс] / [*А. Ю. Цупрун, А. Г. Редько, А. В. Колоколов и др.*] – Режим доступу: http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php. **6.** Direct drive servovalves D633/D634 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-Valves-D633_D634-Catalog-en.pdf **7.** *Лукас В. А.* Теория автоматического управления / *В. А. Лукас*. – М. : Недра, 1990. – 416 с. **8.** *Бондаренко О. Ф.* Математична модель обробки даних в системі моніторингу параметрів хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок / *О. Ф. Бондаренко, О. М. Полєно, В. О. Діденко* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 18. – С. 70–76. **9.** Определение параметров качания кристаллизатора МНЛЗ с учетом деформации отливаемой заготовки / *В. И. Мачикин, С. П. Ефименко, П. А. Левин, А. М. Кондратюк* // Сталь. – 1985. – №4. – С. 22–24. **10.** *Огурцов А. П.* Производство стали от старта до финиша. Т. 4. Непрерывная разливка стали: монография в 10 т. / *А. П. Огурцов*. – Днепродзержинск : ДГТУ, 2011. – 440 с.

Bibliography (transliterated): 1. Smirnov, A. N. et al. *Osobennosti mekhanizmov kachaniya kristallizatora s gidravlicheskim privodom*. Visnik Donbas'koї derzhavnoї mashinobudivnoї akademiї: tematichnij zbirnik naukovih prac' 1(2010): 290-294. Print. **2.** Shou, S., M. Xiao and J. Song. *Modeling and Control of Electro-Hydraulic-Controlled Stepping Cylinder for Mold Oscillation*. Jinchun 99(2011): 183-189. Print. **3.** Didenko, V. O., O. F. Bondarenko and O. M. Polieno. *Matematychne modeliuvannia mekhanizmu khytannia krystalizatora mashyny bezperervnoho lyttia zahotovok z elektrohidravlichnym pryvodom*. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu 4(2015). Print. **4.** Smirnov, A. N. et al. *Some Approaches to Choosing Rational Mold Oscillation Parameters*. Russian Metallurgy (Metally) 8(2008): 700-705. Print. **5.** Tsuprun, A. Yu et al. *Systemy upravlenyia protsessamy y mekhanyzmamy mashyn nepreruvnoho lytia zahotovok.* Web 19 August 2015 http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php. **6.** *Direct drive servovalves D633/D634.* Web 19 August 2015 http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-Valves-D633_D634-Catalog-en.pdf **7.** Lukas, V. A. *Teoryia avtomatycheskoho upravlenyia.* M.: Nedra, 1990. Print. **8.** Bondarenko, O. F., O. M. Polieno and V. O. Didenko. *Matematychna model obrobky danykh v systemi monitorynhu parametriv khytannia krystalizatora mashyny bezperervnoho lyttia zahotovok*. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» 18(2013) : 70-76. Print. **9.** Machykyn, V. Y et al. *Opredelenye parametrov kachanyia krystallyzatora MNLZ s uchetom deformatsyy otlyvaemoi zahotovky.* Stal' 4(1985) : 22-24. Print. **10.** Ohurtsov, A. P. *Nepreruvnaia razlyvka staly. Proyzvodstvo staly ot starta do fynysha: monohrafyia v 10 t.* Dneprodzerzhinsk : DSTU, 2011. Print.

Поступила (received) 28.08.2015

УДК 621.314.22.2

Ф. П. ГОВОРОВ, д-р техн. наук, проф. ХНУГХ им. А. Н. Бекетова;
В. Ф. ГОВОРОВ, научн. сотр. ХНУГХ им. А. Н. Бекетова;
О. В. КОРОЛЬ, научн. сотр. ХНУГХ им. А. Н. Бекетова

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В СОСТАВЕ ESS

Введение. Концепция так называемых, интеллектуальных энергетических систем (ESS) в Украине породила ряд вопросов. Один из них касается недостаточности технического обеспечения мероприятий. К сожалению, со времени последней кампании автоматизации распределительных сетей, проходившей около 50 лет назад, существенных изменений не произошло. Еще тогда была отмечена невозможность решения задачи, без применения технических средств автоматического управления и регулирования, которые выполняют функции активных элементов (АЭ) ESS. Однако, задача по их созданию до сих пор, не решена. Поэтому указанная проблема остается актуальной и по сей день. Поэтому, розработки посвященные созданию активных элементов ESS, актуальны и являются важным направлением повышения эффективности ESS.

Постановка задач. Как отмечено в [1] активные элементы являются важнейшими элементами интеллектуальных энергетических систем, определяющими возможность и условия их эффективного функционирования. Степень их совершенства в значительной степени определяет эффективность функционирования ESS, в целом. Поэтому, обеспечение условий надежной и экономической работы активных элементов, является важной задачей повышения эффективности работы ESS.

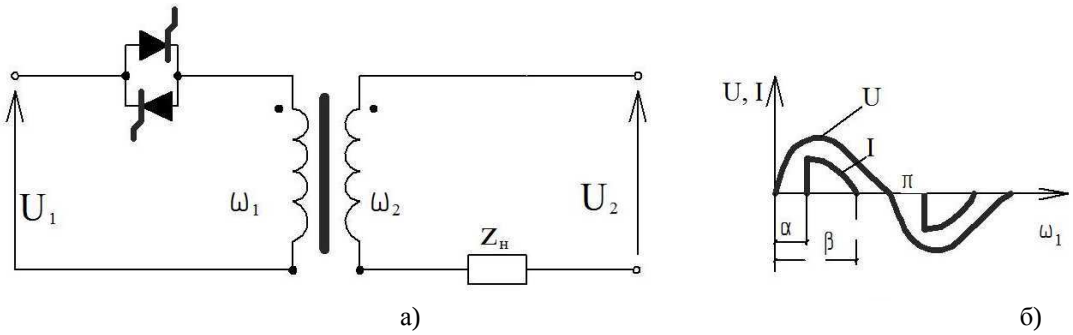
Важное место среди АЭ занимают устройства силовой электроники, выполненные на базе вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) с электронным управлением. Их применение в электрических сетях среднего и низкого напряжения в сочетании с применением плавного либо плавно-ступенчатого способа управления в состоянии значительно расширить функциональные возможности ESS, эффективность и качество функционирования электрических сетей и, подключенных к ним, потребителей. Однако, в силу особенностей схемы присоединения ВДТ к сети имеет место ряд особенностей его работы совместно с электронными управляющими элементами. Это относится к характеру изменения ЭДС и токов в его обмотках. Их наличие обуславливает снижение надежности и экономичности работы ВДТ и, подключенных к ним, потребителей. Изложенное делает необходимым исследование особенностей работы ВДТ с электронными управляющими элементами в составе ESS и определение условий их надежной и экономичной совместной работы.

Анализ публикаций. Исследованием работы ВДТ в той или иной постановке задачи в различные годы занимались Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Липковский К.А., Новский В.А. и др. [2-4]. Их работы посвящены, в большинстве своем, исследованиям статических режимов ВДТ. В это же время наличие особенностей квазиустановившихся режимов ВДТ и их существенное влияние на надежность и качество работы ESS требуют проведения дополнительных их исследований.

Расчетно - теоретическое исследование работы ВДТ с тиристорным ключом на первичной стороне. Работа ВДТ с тиристорным ключом в сочетании с наиболее распространенным время-импульсным способом управления и естественным гашением тиристоров, характеризуется наличием ряда особенностей, связанных с изменением величины и длительности протекания токов в обмотках в зависимости от режимов работы и параметров цепи первичной и вторичной обмоток. В рассматриваемых условиях, очевидным является тот факт, что если длительность протекания тока I_1 превышает угол π, то при углах регулирования вентилей $\alpha < \pi - \beta$, где β - угол включенного состояния тиристора, подача управляющего напряжения на включаемый тиристор произойдет в момент, когда напряжение на тиристоре равно нулю, либо имеет обратную полярность, последний отключится. В то же время, отсутствие тока в предшествующий полупериод, создает возможность для успешного включения другого из группы встречно-параллельно включенных тиристоров в последующий полупериод, независимо от соотношения между α и β. В результате трансформатор переходит в режим одностороннего подмагничивания, который характеризуется включением одного из группы встречно-параллельно включенных тиристоров и значительным увеличением первичного тока I_1. При этом, в следствии насыщения магнитной системы, увеличится длительность протекания тока I_1 в первичной обмотке и возврат трансформатора в нормальный режим станет возможным уже при другом угле $\alpha' > \alpha$.

Соответственно, при $\alpha > \pi - \beta$ на участке полупериода, равном $\pi - \beta$ тиристоры находятся в состоянии малой проводимости ($r_т = 1 \div 10$ кОм) и трансформатор работает в режиме холостого хода (ХХ) с питанием по вторичной цепи. Работа ВДТ этом режиме определяется величиной напряжения U_2, модулем и фазой сопротивления вторичной цепи $\square_{2П}$. Измерения ЭДС и токов в обмотках ВДТ при $\alpha < \pi - \beta$ и $\alpha > \pi - \beta$ свидетельствуют о значительном (до четырех крат) увеличения напряжения на тиристорах, при $\alpha > \pi - \beta$, и многократном (до ста крат) увеличении тока I_1, при $\alpha < \pi - \beta$. В связи со снижением технико-экономических показателей ВДТ, появлением в обмотках импульсов напряжения и тока большой величины, работа трансформатора в рассмотренных условиях является аварийной.

© Ф.П. Говоров, В.Ф. Говоров, О.В. Король, 2015



а) б)

Рис.1 Схема (а) и характер измерения тока I в цепи первичной обмотки (б) ВДТ с тиристорным управлением

В соответствия с изложенным, условие надежной работы ВДТ с тиристорами в цепи первичной обмотки может быть записано в виде: $\alpha \geq \pi - \beta + \gamma$, где: γ - угол удержания вентилей. При этом, угол включения вентилей $\alpha = \pi - \beta + \gamma$ является критическим ($\alpha_{кр}$). При уменьшении угла включения вентилей до величины $\alpha < \alpha_{кр}$ или увеличении длительности протекания тока β в цепи первичной обмотки до величины $\beta > \pi + \alpha - \gamma$ трансформатор переходит в один из аварийных режимов: дроссельный или одностороннего подмагничивания.

Основные количественные соотношения, характеризующие работу ВДТ в этих режимах получены использованием схемы замещения рис. 2 а. Процессы в схеме замещения описываются системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= i_1 r_{1П} + L_{\sigma 1П}\frac{di_1}{dt} + L_м \frac{di_0}{dt} \\ U_2' &= i_2' r_{2П}' + L_м \frac{di_0}{dt} \\ i_0 &= i_1 + i_2' \end{aligned} \qquad (1)$$

После эквивалентных преобразований схема рис. 2а преобразуется в более простой вид исходя из следующих допущений (рис. 2б),: $Z_н \approx r_н$; $R_н = (r_2' + r_н)\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$;

$$U_Э = \frac{U_2' x_m^2}{R_н'^2 + x_m^2}; \qquad Z_Э = \frac{R_н' x_m}{R_н' + x_m} = \frac{R_н' x_m^2 + R_н'^2 x_m}{R_н'^2 + x_m^2}.$$

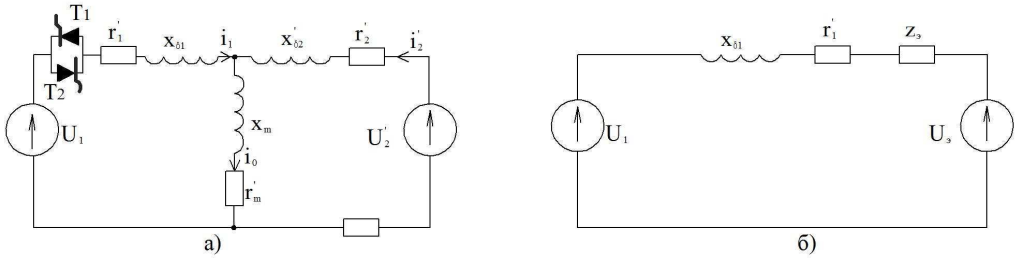


Рис. 2

Для оценки влияния режимов работы и параметров ВДТ на значение угла включения вентилей α в квазиустановившихся режимах достаточным является частное решение (1) в виде:

$$I_1 = \frac{\left[\pm U_1(R_н'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 + U_2' R_н' x_m\right]}{(R_н' x_m^2 - x_m^2 r_{1П} + R_н'^2 r_{1П}'^2) + (R_н'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_н'^2 x_{\sigma 1})} \qquad (2)$$

Откуда

$$\alpha_{кр} = arctg \frac{(R_н' x_m^2 - x_m^2 r_{1П} + R_н'^2 r_{1П}) - \left[\pm U_1(R_н'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2\right] \times (R_н'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_н'^2 x\sigma 1)}{\left[\pm U_1(R_н'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2\right] \times (R_н' x_m^2 - x_m^2 r_{1П} + R_н'^2 r_{1П}) + U_2' R_н' x_m (R_н'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_н'^2 x_{\sigma 1})} \qquad (3)$$

Как следует из (3) $\alpha_{кр}$ является знакопеременной функцией параметров U_1, U_2, $R_н$, x_m, $r_{1П}$, $x_{\sigma 1}$ и изменяется с изменением режимов работы ВДТ, величины нагрузки и состояния магнитной системы. При этом в режиме встречного включения при $U_1(R^2_н + x^2_m) \geq U'^2_2 x^2_m$ угол $\alpha_{кр} > 0$, что соответствует опережающему току I_1. В режиме малых нагрузок $(R'_н \to \infty)$ сопротивление нагрузки не влияет на характер тока I_1 и значение $\alpha_{кр}$ определяется значением x_m (состоянием магнитной системы)

$$\alpha_{кр} \approx arctg \frac{x_m}{r_{1П}} \tag{4}$$

При ненасыщенной магнитной системе $x_m > > r_{1п}$ и $\alpha_{кр} \approx 0$. С увеличением насыщения $\alpha_{кр} > > 0$. Соответственно, при больших нагрузках, когда $R'_н \to 0$, влияние намагничивающего контура на характер изменения тока I_1 уменьшается и $\alpha_{кр}$ определяется главным образом параметрами первичной цепи

$$\alpha_{кр} = arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1П}} \tag{5}$$

При номинальных нагрузках в зависимости от характера соотношения $R'_н \gtrless r_{1п}$ следует рассматривать работу ВДТ при насыщенной и ненасыщенной магнитной системе.

В первом случае сопротивление намагничивающего контура x_m значительно больше сопротивления нагрузки, его влиянием в первом приближении можно пренебречь и рассматривать схему в виде последовательно соединенных U_1, U_2, $R_н$, x_m, $r_{1П}$, $x_{\sigma 1}$ (см. рис. 2 б).

В этом случае

$$\alpha_{кр} \approx arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1п} + R'_н} \tag{6}$$

Во втором случае, сопротивление намагничивающего контура соизмеримо с сопротивлением нагрузки $R'_н$ и оказывает существенное влияние на характер тока I_1. Пренебрегая влиянием параметров первичной цепи ($r_{1п}$, $x_{\sigma 1}$),схему замещения можно рассматривать в виде параллельно соединенных сопротивлений x_m и $R_н$. Угол включения, при этом, определится, как

$$\alpha_{кр} \approx arctg \frac{R'_н}{x_m} \tag{7}$$

Таким образом, критический угол включения тиристоров $\alpha_{кр}$ не является постоянным, а изменяется с изменением режимов работы и параметров ВДТ. Значения $\alpha_{кр}$ при различном сочетании режимов работы и параметров ВДТ могут быть определены по (3). При этом, поскольку тиристор заперт, $r_{1п} \approx 0$ и значение критического угла возврата определяется, практически параметрами вторичной цепи

$$\alpha_{кр} \approx arctg \frac{R'_н}{x_m} \tag{8}$$

В соответствии с изложенным, в связи со значительным изменением сопротивления x_m намагничивающего контура при кратковременной потере импульсов либо увеличении длительности прохождения тока I_1 до $\beta_{кр} = \pi - \alpha + \gamma$, трансформатор переходит в режим одностороннего подмагничивания.

Графические зависимости $\alpha_{кр} = f(R'_н, x_m, r_{1П}, x_{\sigma 1})$, полученные в результате расчета по (3), приведены на рис. 2. Кривая $\alpha_{кр} = f(x_m)$ характеризует зависимость критического угла от состояния магнитной системы и может быть использована для определения значений критического угла возврата $\alpha'_{кр}$. Как следует из рис. 3, значение критического угла возврата увеличивается с увеличением насыщения магнитной системы и стремится в предельном случае к $+\pi$, при согласном включении ВДТ, и к $-\pi$ - при встречном. Различие в характере кривых $\alpha = f(x_m)$ для различных режимов можно объяснить различным характером взаимодействия токов I_1 и I_0. В режиме согласного включения ток I_0 сдвинут относительно тока I_1 на угол близкий к $+\pi/2$ обуславливает сдвиг последнего на угол φ_1, в сторону отставания. Соответственно, в режиме встречного включения сдвиг тока I_0 составляет угол, близкий к $-\pi/2$ и влияние сказывается на сдвиге тока I_1 в сторону опережения.

В режиме встречного включения, сопротивление $R_н$ включено последовательно с эквивалентным сопротивлением первичной цепи и его влияние выражается в уменьшении индуктивной составляющей результирующего тока, поскольку при последовательном соединении $\varphi = arctg \frac{\omega L}{R}$

Аналогично объясняется характер кривых $\alpha_{кр} = f(x_{\sigma 1})$ с той лишь разницей, что в режиме согласного включения $x_{\sigma 1}$ оказывается включенным последовательно с эквивалентным сопротивлением вторичной цепи, увеличивая реактивную составляющую тока I_1. По той же причине, в режиме встречного включения, сопротивление $x_{\sigma 1}$ вызывает уменьшение критического угла включения $\alpha_{кр}$ в связи с подключением его параллельно с сопротивлением намагничивающего контура $x_{\sigma 1}$. Наличие точки с $\alpha_{кр} = 0$ и изменение знака $\alpha_{кр}$ объясняется влиянием сопротивления $r_{1П}$. Точке $\alpha_{кр} = 0$ соответствует значение $x_{\sigma 1}$ равное

$$x_{\sigma 1} = \sqrt{\frac{x^2_m - r_{1П}}{\sin \varphi_1}}, \tag{9}$$

при котором ток I_1 находится в противофазе с током I_0. Дальнейшее увеличение $x_{\sigma 1}$ приводит к тому, что ток I_1 оказывается сдвинутым на угол, больший π по отношению к току I_0 и влияние I_0 можно рассматривать, как сдвиг тока I_1 в сторону отставания.

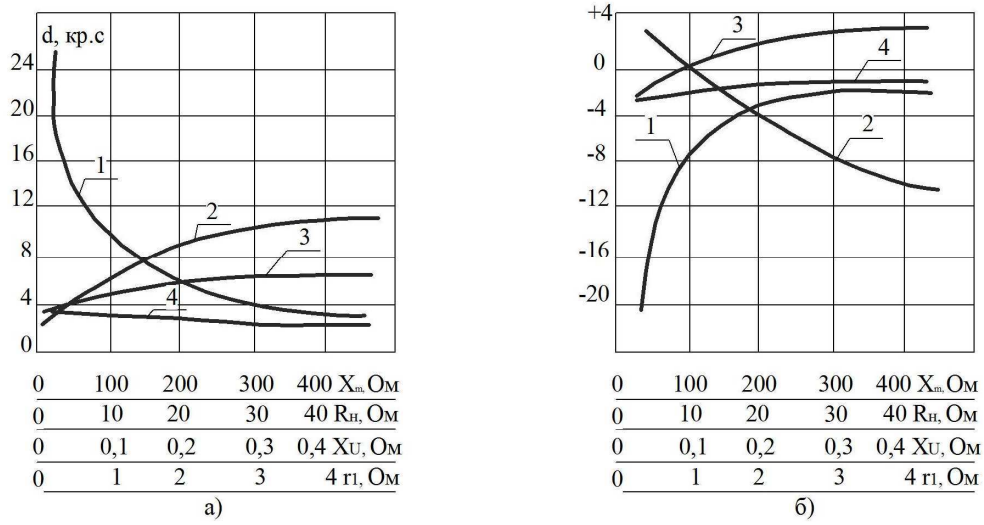


Рис. 3 Графические зависимости критического угла включения тиристоров dkp от сопротивленния намагничивающего контура xm (1), сопротивления нагрузки Rн (2), сопротивления рассеяния (3), активного сопротивления первичной обмотки rl (4) для режима согласного (а) и встречного (б) включения ВДТ

Выводы: Проведенные исследования свидетельствуют, что для обеспечения надежной и экономичной работы ВДТ в составе ESS в квазиустановившихся режимах необходим учет наличия и характера изменения критического угла отпирания тиристоров с изменением нагрузки, режимов работы и параметров ВДТ. Последнее требует применения специальных схем управления с синхронизацией управляющего напряжения от тока и напряжения тиристоров.

Список литературы: 1. *Назаров В.В.* Концепция Smart Grid и реальная энергетика // Энергетика и электрификация, 2013, №6, с. 12-15. **2.** *Шидловский А.К., Кузнецов В.Г.* Повышение качества энергии в электрических сетях // Наукова Думка, 1985, с. 268 с. **3.** *Новский В.А. Голубев В.В., Козлов А.В., Бойко П.С.* Быстродействующее уравновешивание трехфазной четырехпроводной системы с помощью трансформаторно-ключевых преобразователей // Техн. електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 7-12. **4**. *Липківський К.О.* Оптимізація розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. - №2(14). – С. 98-99.
Bibliography (transliterated): 1. Nazarov V.V. Kontseptsiya Smart Grid I real'naya energetika // Energetika I elektrofikatsiya. 2013, №6. 12-15. Print. **2**. Shidlovskiy A.K., Kuznetsov V. G. Povysheniye kachestva energii v elektricheskikh setyakh // Naukova Dumka, 1985. 268 p. Print. **3.** Novskiy V.A., Golubev V.V., Kozlov A.V., Boyko P.S. Bystrodeystvuyushcheye uravnoveshivaniye trekhfaznoy chetyrekhprovodnoy sistemy s pomoshch'yu transformatornoklyuchevykh preobrazovateley // Tekhn. yelektrodinamika. Tem. Vipusk «Silova yelektronika ta yenergoyefektivnist». – 2007. – Ch. 3. 7-12. Print. **4.** Lypkivsky K.O. Optymizatsia rozrakhunkovykh kharakterystyk vykonavchykh struktur dyskretnykh stabilizatoriv napruhy // Pratsi IED NANU. – 2006. – №2(14). 98-99. Print.

Поступила (received) 31.08.2015

УДК 621.3.011:621.372

М. А. ЩЕРБА, канд. техн. наук, Институт электродинамики НАН Украины, Киев.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В СПЭ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕКИЕ ПРОЦЕССЫ ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ

Введение. В связи с широким применением сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции электроэнергетического оборудования все на более высокие уровни рабочего напряжения усложняется задача обеспечения ее высокой надежности и длительного ресурса эксплуатации [1−7]. Например, увеличение толщины (т.е радиуса) СПЭ изоляции высоковольтных силовых кабелей цилиндрической конструкции пропорционально кратности K повышения уровня напряжения их эксплуатации не может быть технологическим решением из-за увеличения объема и массы изоляции в K^2 раз [5]. Кроме этого, увеличение толщины твердой полимерной изоляции при неизменности технологии изготовления повышает ее структурную неоднородность, что уменьшает ее удельную электрическую прочность, а соответственно надежность и ресурс эксплуатации [4, 5, 12].

Одной из основных причин, которые ограничивают электрическую прочность СПЭ изоляции, считается появление в ней дефектов структуры и сторонних микровключений, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации. В настоящее время при изготовлении и эксплуатации силовых кабелей со СПЭ изоляцией особое внимание уделяется появлению в ее локальных микрообъемах жидких (водяных) микровключений, которые могут иметь различные размеры, формы, ориентации, взаимные расположения и удельные плотности [2, 4−6, 8–10]. Водяные нано- и микровключения в локальные микрообъемы твердой СПЭ изоляции могут проникать извне – в результате нарушения продольной и/или поперечной герметичности конструкций кабелей, или возникать внутри изоляции – из-за разложения ее структуры и/или агентов ее сшивки. Удельная проводимость водяных включений на 14−16 порядков больше, чем СПЭ изоляции, поэтому они по сравнению с материалом изоляции могут считаться токопроводящими (т.е. обладающими электронной проводимостью).

В результате проявления диэлектрофореза в неоднородном электрическом поле (ЭП) внутри изоляции силового кабеля цилиндрической формы [5] проводящие водяные нано- и микровключения будут втягиваться в микрообласти повышенной напряженности поля, образуя там "облако" близко расположенных водяных нано- и микровключений, а затем более крупные водяные образования разных форм и размеров, но преимущественно втянутых вдоль силовых линий ЭП [8–10]. Со временем такие водяные микрообразования могут становиться центрами зарождения и дальнейшего развития водяных триингов с последующими частичными и полными разрядами СПЭ изоляции [5, 8].

Поскольку обеспечить абсолютное невозникновение проводящих жидких включений внутри твердой СПЭ изоляции высоковольтных кабелей при их изготовлении и эксплуатации практически невозможно, то актуальным является проведение исследований, направленных на выявление условий появления наиболее опасных образований проводящих жидких микровключений и разработка рекомендаций для повышения надежности эксплуатации такой изоляции. При этом важно учитывать, что наиболее интенсивная деградация СПЭ изоляции происходит при комплексном (совместном) воздействии электрических, термических и механических процессов, возникающих в ней при действии сильных неоднородных переменных ЭП. Важно также для всех возможных диапазонов изменения электрических, термических и механических условий эксплуатации СПЭ изоляции установить главные (приоритетные) механизмы ее обратимой и необратимой деградации, на что и направлены исследования данной статьи.

В работах [5, 8, 12] обосновано, что проводящие микровключения в диэлектрической среде существенно усиливают электрическое поле у своих полюсов, расположенных вдоль поля, и создают области напряженных объемов (объемов изоляции с напряженностью ЭП выше допустимого значения). Превышение напряженности поля E предельного значения пробоя изоляции $E_{\text{пр}}$ может возбудить электрический пробой ее локальной области. При росте размеров областей напряженного объема $V_{\text{н}}$ частота стохастических частичных электрических пробоев изоляции может увеличиваться и процессы деградации всей толщины изоляции ускоряться. С точки зрения возникновения электрофизических процессов старения твердого диэлектрика, наиболее опасными являются включения вытянутые вдоль силовых линий поля, а также группы близко расположенных включений и включения с водяными триингами на поверхности [5, 12].

В переменном ЭП на полюсе каждого жидкого проводящего микровключения из-за накопления поверхностного заряда возникают пульсирующие давления, которые с удвоенной частотой действуют на материал диэлектрика. Вблизи острых полюсов и остриев триингов наибольшие такие давления могут быть сопоставимы с механической прочностью СПЭ изоляции [8, 9].

В работах [8, 10] показано, что накопление влаги в СПЭ изоляции в виде множества близко расположенных микровключений малого размера − "облака" может быть опаснее, чем концентрация всей жидкости в одном включении большого размера, поскольку с ростом количества микровключений может увеличиваться как максимальная напряженность ЭП, так и количество локальных напряженных микрообластей, и общий напряженный объем в СПЭ изоляции вблизи полюсов проводящий микровключений.

© М.А. Щерба, 2015

В публикациях [15, 20] обосновано, что проводимость полиэтилена носит в основном ионный характер, который зависит от концентраций собственных диссоциированных ионов и примесей, а их перемещение можно представит, как перемещение заряженных частиц в периодических потенциальных ямах. В такой модели при возникновении внешнего ЭП высота потенциального барьера в направлении его силовых линий уменьшается, и вероятность прыжка носителя заряда в соседнюю яму, а также вероятность получения им достаточного количества энергии для перепрыгивания через несколько ям возрастают. Таким образом, нелинейное увеличение тока проводимости $\boldsymbol{J}_{\text{пр}}$ при линейном росте напряженности ЭП $\boldsymbol{E}$ можно описать увеличением удельной проводимости $\sigma(E)$ согласно закону Ома: $\boldsymbol{J}_{\text{пр}} = \sigma(E)\cdot\boldsymbol{E}$. Величина напряженности поля $\boldsymbol{E}$, необходимая для проявления таких нелинейных свойств, должна составлять от 20 кВ/мм и выше.

Подобные значения $\boldsymbol{E}$ могут достигаться у полюсов проводящих микровключений, сильно вытянутых вдоль ЭП, у остриев водяных триингов, а также между близко расположенными проводящими включениями. Кроме этого, в работе [15] показано, что вследствие миграционной поляризации, на границе раздела полиэтилен – вода может накапливаться объемный заряд, который может дополнительно усиливать напряженность ЭП в близлежащих областях диэлектрика.

Поскольку в работе [10] проведен анализ распределения ЭП в СПЭ изоляции вблизи совокупности водяных микровключений только в линейном допущении, то целесообразно провести исследования при учете ее нелинейных свойств в сильном ЭП.

Целью работы является расчет и анализ распределения электрического поля в сшитой полиэтиленовой изоляции возле "облака" близко расположенных водяных микровключений различной конфигурации с учетом ее нелинейных свойств.

Постановка задачи. Анализировалось распределение ЭП в слое СПЭ изоляции толщиной 0,5 мм вблизи токопроводящей жилы силового кабеля напряжением 330 кВ. Напряженность E_Δ на расстоянии Δ от поверхности полупроводящего слоя жилы кабеля определялась согласно уравнению $E_\Delta = \dfrac{U}{(R_1+\Delta)\ln(R_2/R_1)}$ [1, 16] и при Δ < 5 мм средняя напряженность поля $E_{\text{ср}}$ равнялась 10–13 кВ/мм. К рассматриваемому слою изоляции прикладывалось синусоидальное напряжение амплитудой $\Delta\varphi$ = 5–7,5 кВ и частотой 50 Гц. В этом характерном слое предполагалось наличие "облака" близко расположенных водяных микровключений сферической формы. Расчетная область изоляции имела кубическую форму со стороной 500 мкм (см. рис. 1), а радиус микровключений задавался в зависимости от их количества, так чтобы суммарный объем жидкости оставался неизменным и соответствовал одиночному сферическому микровключению радиусом 50 мкм.

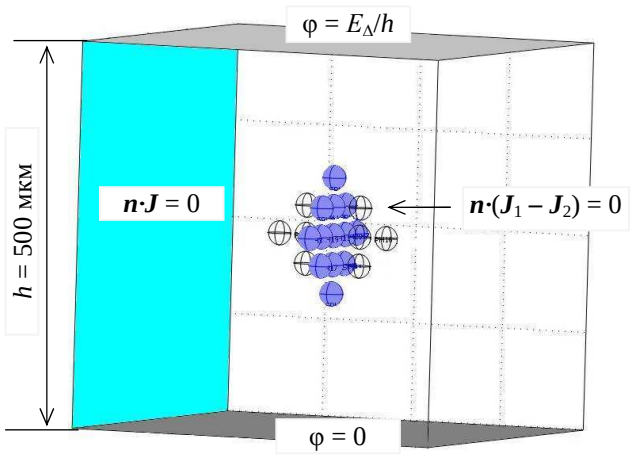


Рис. 1 Расчетная область изоляции с микровключениями

СПЭ изоляция внутри расчетной области считалась изотропной, кусочно-однородной и нелинейной. Нелинейность учитывалась тем, что при превышении в изоляции напряженности ЭП выше критических значений ее удельная проводимость $\sigma(E)$ уже была не постоянной, как ранее, а задавалась функцией напряженности электрического поля E.

Уравнение для $\sigma(E)$, как и в работе [20], имело вид:

$$\sigma(E) = \sigma_{const}\left(\frac{2kT}{aeE(t)}\right)\text{sh}\left(\frac{aeE(t)}{2kT}\right), \qquad (1)$$

где σ_{const} = 10^{-14} См/м – постоянная проводимость сшитого полиэтилена в слабом ЭП, e – заряд носителя, T – абсолютная температура, k = 1,38·10^{-23} Дж/К – постоянная Больцмана и a – расстояние между потенциальными энергетическими барьерами, которое для полиэтилена порядка 2 нм [20]. При этом во всем диапазоне исследуемых напряженностей ЭП диэлектрическая проницаемость СПЭ изоляции принималась неизменной, т.е. $\varepsilon \approx$ const.

Вектор плотности полного тока $\boldsymbol{J}_{\text{полн}}(t)$ в изоляции с водяными микровключениями состоит из сумы векторов тока проводимости $\boldsymbol{J}_{\text{пр}}(t)$ и тока смещения $\boldsymbol{J}_{\text{см}}(t)$:

$$\boldsymbol{J}_{\text{полн}}(t) = \boldsymbol{J}_{\text{пр}}(t) + \boldsymbol{J}_{\text{см}}(t) = \sigma(E)\boldsymbol{E}(t) + \varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial \boldsymbol{E}(t)}{\partial t}\ . \qquad (2)$$

Таким образом, при слабом ЭП основным током в локальной области изоляции является ток смещения $\boldsymbol{J}_{\text{см}}(t)$, а в микровключениях – ток проводимости. При сильных ЭП учитывалась нелинейная зависимость проводимости $\sigma(E)$ в изоляции, что может существенно увеличить токи проводимости.

Из допущения о безвихревом характере ЭП был введен скалярный электрический потенциал $\varphi(t)$, при этом $E(t)$ = - grad $\varphi(t)$.

Используя уравнение непрерывности полного тока (3):

$$\operatorname{div} \boldsymbol{J}_{\text{полн}}(t) = 0\,, \tag{3}$$

и уравнение (2) было получено дифференциальное уравнение для расчета распределения потенциала $\varphi(t)$ и соответственно напряженности ЭП:

$$\operatorname{div}\left[\sigma(E)\operatorname{grad}\varphi(t) - \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad}\varphi(t)}{\partial t}\right] = 0\ . \tag{4}$$

Уравнение (4) на верхней и нижней границах расчетной области (см. рис. 1) дополнялось условиями Дирихле (заданием значений потенциалов), а на боковых поверхностях – условиями Неймана (равенством нулю производных потенциалов по нормали к поверхности, соответствующим отсутствию нормальных токов). На границе СПЭ изоляция – водяное микровключение задавались условия равенства нормальной компоненты плотности полного тока и непрерывность потенциала.

Расчетный интервал времени Δt дискретизировался, а уравнение (4) с учетом нелинейной зависимости (1) решалось методом конечных элементов для каждого момента t_i. В каждой точке расчетного объема диэлектрика определялись величины $\varphi(t_i)$, $\boldsymbol{E}(t_i)$, $\boldsymbol{J}_{\text{пр}}(t_i)$, $\boldsymbol{J}_{\text{см}}(t_i)$ и $\boldsymbol{J}_{\text{полн}}(t_i)$. Расчет задачи начинался с нулевых начальных условий при $t = -0$. С момента времени $t = +0$ начинался переходный процесс до достижения установившегося режима при $U(t) = U_{\text{m}} \sin(314\,t)$ кВ. Анализировались амплитудные значения величин φ_{m}, $\boldsymbol{E}_{\text{m}}$, $\boldsymbol{J}_{\text{пр m}}$, $\boldsymbol{J}_{\text{см m}}$ и $\boldsymbol{J}_{\text{полн m}}$ в установившемся режиме. Для сокращения обозначений в дальнейшем индекс "m" будет опускаться.

Результаты исследований. Проведенные расчеты показали, что максимальная напряженность ЭП E наблюдается у полюсов микровключений вдоль поля. Наличие близко расположенных включений вдоль его силовых линий существенно увеличивает значение E (в 15 раз и более), в то время как включения близко расположенные поперек поля уменьшают значение E (на 20–30%). Таким образом, "облако" из множества включений можно рассматривать, как близко расположенные цепочки включений ориентированные вдоль ЭП. Основное влияние на характер возмущения поля оказывает конфигурация собственных включений в цепочке, в то время как другие цепочки оказывают незначительное влияние на данную.

На рис. 2 показаны результаты расчета изменения максимальной напряженности ЭП $E_{\max}$ в СПЭ изоляции в центральной цепочке включений "облака". $E_{\max}$ наблюдается у полюсов центрального включения цепочки при их нечетном количестве или у близко расположенных полюсов двух центральных включений при четном. Величина $E_{\max}$ приведена в относительных единицах, деленная на $E_{\text{ср}}$ – среднюю напряженность ЭП в расчетном объеме изоляции без включений. Расстояния между включениями также приведены в относительных единицах, деленные на радиус включений r. Количество включений могло увеличиваться при одновременном уменьшении их размеров (т.е. при дроблении включений в цепочке), также могли изменяться расстояния между ними.

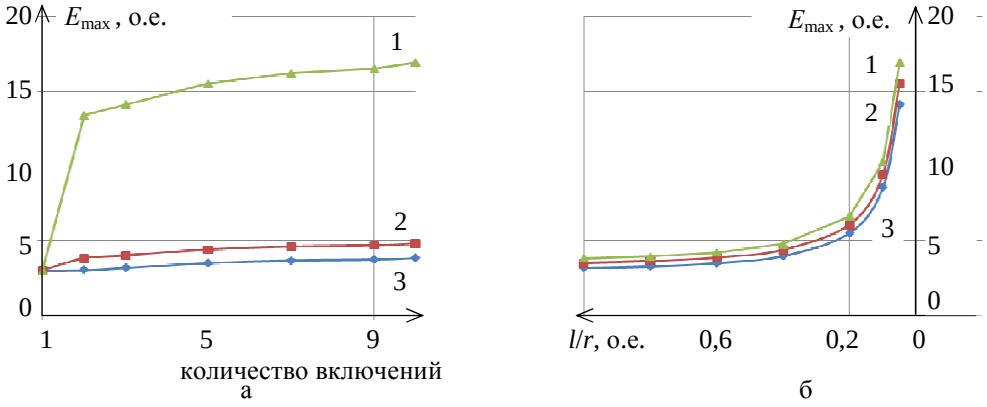


Рис. 2 Зависимости максимальной напряженности ЭП $E_{\max}$: а – от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними; б – от расстояния между включениями при неизменном их количестве.

На рис. 2, а показана зависимость максимальной напряженности ЭП $E_{\max}$ в изоляции от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними. Так при расстояниях 0,5 r при дроблении включений величина $E_{\max}$ растет на 20%. На рис. 2, б показано изменение максимальной напряженности ЭП $E_{\max}$ при сближении включений в цепочке от расстояния между ними при неизменном количестве включений. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют расчетам для цепочек из 3, 5 и 10 включений. Так величина $E_{\max}$ при сближении включений может возрастать в 15 раз и более.

Также в работе анализировалось изменение суммарного напряженного объема $V_{\text{н}}$ изоляции при дроблении и сближении включений в "облаке" (см. рис. 3).

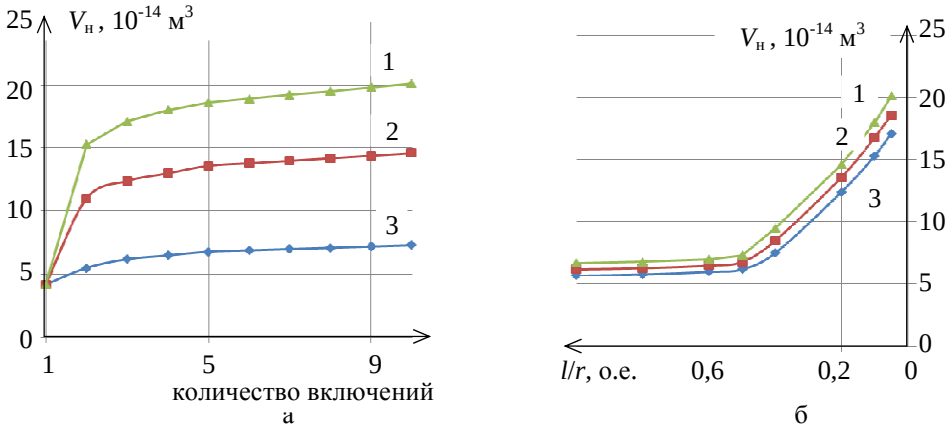


Рис. 3 Зависимости величины $V_н$ в изоляции : а – от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними; б – от расстояния между включениями при неизменном их количестве.

На рис. 3, а показана зависимость в изоляции от количества включений в цепочке при неизменном расстоянии между ними. Так при дроблении включений величины $V_н$ увеличивается в 2 раза и более при расстояниях между включениями более 0,1 их радиуса, и увеличивается в 3 раза и более при расстояниях менее 0,1 радиуса. На рис. 3, б показано изменение величины $V_н$ при сближении включений в цепочке от расстояния между ними при неизменном количестве включений. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют расчетам для цепочек из 3, 5 и 10 включений.

Описанные выше усиления ЭП можно объяснить тем, что при дроблении микровключений в "облаке" его протяженность вдоль поля увеличивается. Если предположить что между микровключениями сохраняются одинаковые расстояния, то размеры "облака" вдоль силовых линий поля увеличиваются в 5 раз и более при его конфигурации близкой к сферической и в 10 раз и более при расположении включений преимущественно вдоль электрического поля.

Расчет величин E_{max} и $V_н$ и $J_{пр}$ при учете нелинейных свойств СПЭ изоляции в сильных электрических полях показал что при росте проводимости $\sigma(E)$ в областях наибольшего усиления ЭП величины E_{max} и $V_н$ уменьшаются на 50% и менее. При этом плотности тока проводимости в некоторых локальных областях изоляции увеличиваются на 2−3 порядка, что способствует локальным перегревам, ухудшению электрической и механической прочности и вызывает ее ускоренное старение. Кроме того, в такие области за счет диэлектрофореза могут втягиваться микронные и субмикронные капли жидкости, которые, заполняя микропоры и микротрещины материала, способствуют возникновению водяных триингов. Прорастание водяных триингов между близко расположенными микровключениями может привести к их объединению в одну проводящую структуру, которая, как обсуждалось в работах [1,3], еще больше усиливает ЭП в объеме изоляции, интенсифицируя процессы ее старения.

Выводы. 1. Проведен расчет и анализ распределения электрического поля в локальном объеме сшитой полиэтиленовой изоляции при наличии в нем "облака" близко расположенных микровключений различной конфигурации. Анализ показал, что дробление микровключений (увеличение их количества и уменьшение размеров при неизменном суммарном объеме жидкости в изоляции) может вызывать увеличение суммарного напряженного объема изоляции в 2 раза и более при расстояниях между включениями более 5 мкм, и к увеличению в 3 раза и более при расстояниях менее 5 мкм. При этом величина напряженности электрического поля в диэлектрических промежутках между включениями возрастает в 15 раз и более.

2. Дробление водяных микровключений приводит к увеличению размеров "облака" вдоль силовых линий поля в 5 раз и более при его конфигурации близкой к сферической и в 10 раз и более при расположении включений преимущественно вдоль поля. Возле полюсов каждого из включений в изоляции создаются области повышенной напряженности поля, в которые со временем втягиваются микронные и субмикронные капли воды. В совокупности с пульсирующими давлениями на материал диэлектрика, создаются условия для возникновения и прорастания водяных триингов с поверхности включений в направлении объединения элементов "облака" в одну цельную проводящую структуру.

3. Учет нелинейных свойств СПЭ изоляции в сильных электрических полях, а именно зависимости ее удельной проводимости от напряженности электрического поля позволяет учесть рост плотности тока проводимости в изоляции на 2−3 порядка, что способствует локальным перегревам, ухудшению электрической и механической прочности и вызывает ее ускоренное старение уже преимущественно за счет механизмов термодеградации, а не электродеградации.

Список литературы: 1. *Золотарев В.М.* Решение проблемы создания отечественных электротехнологических комплексов производства кабелей энергетического назначения напряжением до 330 кВ // Вісн. НТУ "ХПІ". – 2009. – № 39. – С. 50–63. **2.** *Кри С.Х.* Новые материалы для производства кабелей высокого напряжения / *Кри С.Х., Гессенс Т., Кьелквист Е.Б., Мендельсон А., Гау И.* // Кабели и провода. – 2009. – № 1 (314). – С. 26–30. **3.** *Мещанов Г.И.* Кабели на напряжение 10–500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) / *Мещанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л.* // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38. **4.** *Пешков И.Б.* Кабели и провода. Основы кабельной техники. // М.: Энергоатомиздат, 2009. – 470 с. **5**. *Шидловский А.К.* Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. / *Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* // К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 550 с. **6.** *Шувалов М.Ю.* Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента / *Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л.* // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49–57. **7.** *Щерба А.А.* Концепция электротехнологических систем для нанесения полимерной изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей / *Щерба А.А., Золотарьов В.М., Подольцев А.Д.* // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. пр.– К.: ІЕД НАНУ: 2011. Вип. № 29. – С. 138–147. **8.** *Щерба М.А.* Возмущение электрического поля проводящими включениями в диэлектриках. – К.: Наш формат, 2013. – 224 с. **9.** *Щерба М.А.* Моделирование пондеромоторных сил влияния водяных микровключений и триингов на твердую изоляцию в переменном электрическом поле // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2014. – Спец. вып. – № 9 (128). – Т.2 – С. 25–31 **10.** Щерба М. А. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водяных микровключений / М. А. Щерба, С. С. Розискулов, О. В. Васильева // Техн. електродинаміка. - 2014. - № 4. - С. 17-19. **11.** *Boggs S.A.* A rational consideration of space charge. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2004. 20(4): pp. 22-27. **12.** *Dissado L.A.* Electrical degradation and breakdown in polymers / *Dissado L.A. and Fothergill J.C.* // IEE Materials and Devices Series 9, 1992. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK. – 601 p. **13.** *Kato T. et al.* Characteristics of space charge behavior and conduction current in xlpe and annealed polyethylene under high DC stress //Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of 2014 International Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 370-373. **14.** *Kurihara, Takashi, et al.* Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded XLPE Cables Diagnosis. / *Kurihara, Takashi, et al.* // *IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation*, 2014. 21.1: 321-330. **15.** *Li Y.* Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. Dielectrics and Electrical Insulation / *Li Y., Kawai J. et al.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997. – Vol. 4. – No. 1. – Pp. 52–57. **16.** *Moreau E.* The structure characteristics of water trees in power cables and laboratory specimens // *Moreau E., Mayoux C., Laurent C., and Boudet A.* // *IEEE Trans. Electr. Insulation*, 1993. Vol. EI-28, no. 1, pp. 54–64. **17.** *O'Dwyer J.J.* The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. − Oxford: Clarendon Press, 1973. **18.** *Ross R.* Dielectric properties of water trees, in Properties and Applications of Dielectric Materials. / *Ross R. and Megens M.* // Proceedings of the 6th International Conference on. 2000. **19.** *Saniyyati, C. N., et al.* Investigation on propensity difference of water tree occurrences in polymeric insulating materials. *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*. **20.** *Thomas A.J.* A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model. / *Thomas A.J. and Saha T.K. //* IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena. Kansas City, 2006. – Pp. 368–378.

Bibliography (transliterated): 1. *Zolotarev V.M.* The generation of electro-domestic production complexes cables energy purposes up to 330 kV // Visn. NTU "KhPI." – 2009. - № 39. – P. 50-63. **2.** *Kri S.H., Gessens T., Kelkvist E.B., Mendelson A., Gau I.* New materials for the production of high-voltage cables // Cables and wires. – 2009. – № 1 (314). – P. 26-30. **3.** *Meshchanov G.I., Shuvalov M.Y., Kamensky M.K., Obraztsov Y.V., Ovsiyenko V.L.* Cables for voltage 10-500 kV: state and prospects of development (analysis, forecast and research) // Cables and wires. – 2008. – № 5 (312). – P. 32-38. **4.** *Peshkov I.B.* Cables and wires. Fundamentals of cable technology. // M .: Energoatomizdat, 2009. – 470 p. **5** *Shydlouski A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheryava I.N.* Cables with polymeric insulation ultra-high voltage // K .: Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. – 550 p. **6.** *Shuvalov M.Y., Romashkin A.V., Ovsiyenko V.L.* Analysis of defects in the insulation of high-voltage power cables by video-microscopy and micro-experiments techniques // Electricity. – 2000. – № 5. – P. 49-57. **7.** *Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D.,* The concept of electro-deposition systems for polymer insulation on the wire UHV cables // Pr. In-elektrodinamiki the NAS of Ukraine. ST. Sciences. pr.- K .: IED NASU: 2011 № 29. – P. 138-147. **8.** *Shcherba M.A.* The electric field perturbation in dielectrics by conductive inclusions. – K .: Our format, 2013. – 224 p. **9.** *Shcherba M.A.* Modeling the influence of ponderomotive forces and water micro-treeing in the solid insulation on the electric field alternating // Energy-saving, energy efficiency and conservation. – 2014 – Special. Vol. – № 9 (128). – Vol.2 – P. 25-31 **10.** *Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Vasilieva O.V.* Dependence of the electric field perturbation in the dielectric from dispersion of closely spaced water micro-inclusions // Tech. elektrodinamika. - 2014. - № 4. - pp 17-19. **11.** *Boggs S.A.* A rational consideration of space charge. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2004. 20(4): pp. 22-27. **12.** *Dissado L.A.* Electrical degradation and breakdown in polymers / *Dissado L.A. and Fothergill J.C.* // IEE Materials and Devices Series 9, 1992. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK. – 601 p. **13.** *Kato T. et al.* Characteristics of space charge behavior and conduction current in xlpe and annealed polyethylene under high DC stress //Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of 2014 International Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 370-373. **14.** *Kurihara, Takashi, et al.* Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded XLPE Cables Diagnosis. / *Kurihara, Takashi, et al.* // *IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation*, 2014. 21.1: 321-330. **15.** *Li Y.* Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. Dielectrics and Electrical Insulation / *Li Y., Kawai J. et al.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997. – Vol. 4. – No. 1. – Pp. 52–57. **16.** *Moreau E.* The structure characteristics of water trees in power cables and laboratory specimens // *Moreau E., Mayoux C., Laurent C., and Boudet A.* // *IEEE Trans. Electr. Insulation*, 1993. Vol. EI-28, no. 1, pp. 54–64. **17.** *O'Dwyer J.J.* The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. − Oxford: Clarendon Press, 1973. **18.** *Ross R.* Dielectric properties of water trees, in Properties and Applications of Dielectric Materials. / *Ross R. and Megens M.* // Proceedings of the 6th International Conference on. 2000. **19.** *Saniyyati, C. N., et al.* Investigation on propensity difference of water tree occurrences in polymeric insulating materials. *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*. **20.** *Thomas A.J.* A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model. / *Thomas A.J. and Saha T.K. //* IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena. Kansas City, 2006. – Pp. 368–378.

Поступила (received) 31.08.2015

УДК 621.314

Г. В. ПАВЛОВ, докт. техн. наук, професор ИАЭ НУК им. адм. Макарова, г. Николаев;
А. В. ОБРУБОВ, канд. техн. наук, доцент ИАЭ НУК им. адм. Макарова, г. Николаев;
И. Л. ВИННИЧЕНКО, аспирант ИАЭ НУК им. адм. Макарова, г. Николаев.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА С НЕЛИНЕЙНІЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Введение. Традиционно используемые преобразователи частоты для питания бортовых сетей подвижных объектов, как правило, создают высокий уровень высокочастотных помех. Помехи от преобразователей дестабилизируют работу смежного электрооборудования и создают неблагоприятный электромагнитный фон для окружающей среды. Поэтому разработка преобразователя частоты с пониженным уровнем электромагнитных помех является актуальной задачей.

Постановка проблемы. Время-импульсная модуляция эффективно используется для регулирования выходного напряжения источников электропитания. [1, 2]. Однако жесткая коммутация силовых вентилей преобразователя приводит к коммутационным потерям, которые можно свести к минимуму, используя явление резонанса. [3, 5]. Резонансный инвертор с нелинейным управлением [4] использует принципы импульсной модуляции и переключения силовых ключей при нулевых уровнях напряжения и тока, позволяющие снизить потери энергии и электромагнитные помехи. При этом основной нерешенной задачей является разработка метода и системы управления резонансным инвертором, которая обеспечит требуемую форму выходного напряжения с заданными ограничениями коммутационных потерь и электромагнитных помех.

Цель работы: разработать способ нелинейного управления резонансным инвертором преобразователя частоты с пониженным уровнем высших гармоник.

Материалы исследований. Целевой функцией двухзвенного преобразователя частоты является получение на нагрузке выходного напряжения с заданной амплитудой и частотой (например, с частотой 400 Гц, которая используется для снижения массогабаритных показателей электрических машин). Дополнительными требованиями к такому преобразователю является снижение по сравнению с широко используемыми преобразователями уровня коммутационных потерь и электромагнитных помех. Для ограничения уровня коммутационных потерь целесообразно использовать режимы переключения силовых ключей при нулевых уровнях тока или напряжения. Для ограничения уровня электромагнитных помех в качестве несущих импульсов можно использовать импульсы, форма которых близка к синусоиде.

Для удовлетворения этих требований предложен принцип формирования выходного низкочастотного напряжения путем сглаживания синусоидальных высокочастотных импульсов, которые промодулированы по амплитуде и частоте [4]. Этот принцип реализуется двухзвенным преобразователем частоты на основе резонансного инвертора, схема силовой части которого представлена на рис. 1.

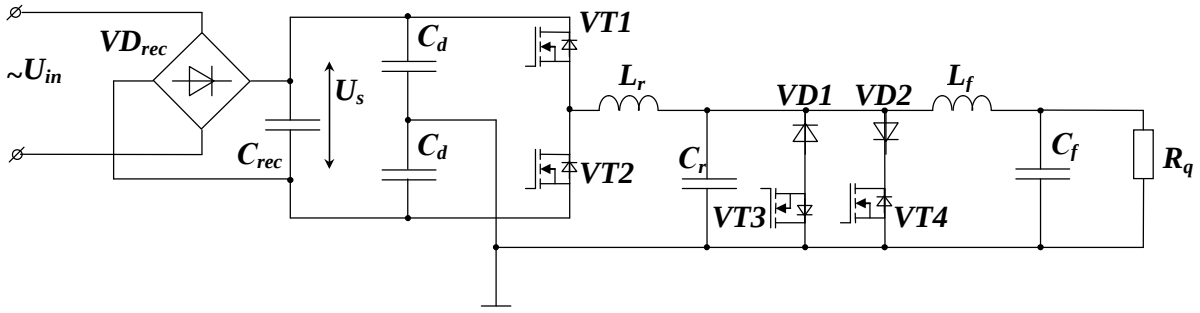


Рис. 1. Схема силовой части преобразователя частоты на основе резонансного инвертора с нелинейным регулированием.

При модуляции высокочастотных импульсов резонансного инвертора и последующем их сглаживании с помощью низкочастотного фильтра на выходе системы можно получить низкочастотное напряжение заданной формы и частоты. Результаты проведенного ранее анализа электромагнитных процессов, происходящих в силовой части данного резонансного инвертора [4], позволили теоретически рассчитать последовательность и длительность управляющих импульсов t_{imp} .по требуемым характеристикам выходного напряжения.

Стратегия управления для генерации резонансных кривых на L_r и C_r заключается в том, что на основе аналитического выражения, описывающего требуемое выходное синусоидальное напряжение, создается последовательность частотно модулированных импульсов одинаковой формы, которые преобразуются после выходного низкочастотного фильтра в синусоидальное напряжение с заданной амплитудой и частотой, равной опорной.

© Г. В. Павлов, А. В. Обрубов, И. Л. Винниченко, 2015

Закон формирования последовательности управляющих импульсов для нелинейного управления резонансным инвертором, связывающего характеристики выходного напряжения с параметрами преобразователя посредством использования относительного времени n_i, относительной частоты k_f и относительного выходного напряжения k_u, имеет вид:

$$n_{i+1}=\frac{1}{2\pi k_f}\cdot\arccos(\cos 2\pi k_f n_i-\frac{2\pi k_f}{k_u}), \quad (1)$$

где $k_f=f_{out}/f_r$ - относительная частота выходного напряжения равная отношению частот выходного напряжения и резонансного контура, $k_u=(2U_{out})/U_s$ - относительное напряжение выходного сигнала, равное отношению амплитуды выходного напряжения к амплитуде напряжения на конденсаторе резонансного контура, $n_i=t_i/T_r$ - относительное время замыкания ключей, определяемое как отношение времени, отсчитываемого от начала полуволны опорной синусоиды, к длительности несущего импульса, равной периоду собственных колебаний резонансного контура.

Определив значения n_i можно сформировать управляющую последовательность импульсов для замыкания ключей *VT1*, *VT2* $M=\{t_0, ..., t_i,..., t_q\}$, где $t_i=n_iT_r$, - времена замыкания силовых ключей, определямые через корни уравнения (1), M - множество действительных чисел, представляющих собой времена замыкания силовых ключей, q - число требуемых включений ключей в течение полупериода выходного низкочастотного напряжения. Соответствующие управляющие воздействия можно задавать с помощью цифровой схемы и усилителя мощности.

Размыкание ключей для обеспечения минимума коммутационных потерь необходимо осуществлять после перехода через ноль тока через индуктивность резонансного контура, т.е. через время t_{imp}. Закону формирования управляющей последовательности (1) можно поставить в соответствие переключающую функцию на управляющем входе силовых ключей

$$\Psi(t-t_i)=\begin{cases}1, \text{при } t\in[t_i, t_i+t_{imp}]\cap\forall t_i\in M;\\ 0, \text{при } t\in(t_i+t_{imp}, t_{i+1})\cap\forall t_i\in M.\end{cases} \quad (2)$$

Данный способ управления позволяет сформировать напряжение с заданными параметрами на выходе преобразователя без использования обратной связи. Он заключается в задании переключающих последовательностей силовых вентилей, обеспечивающих необходимую форму как несущих импульсов, так и выходного напряжения. При этом, в случаях активной и реактивных нагрузок, переключающие последовательности будут отличаться для дополнительных ключей *VT*3, *VT*4. В таблице 1 приведена переключающая последовательность для активной нагрузки. Временные интервалы включения задаются в соответствии с (1).

Система управления. С учетом того, что управляющая последовательность получена математическим методом и представляет собой числовую последовательность, то и систему управления целесообразно построить на базе цифровой системы. Для сглаживания выходного напряжения используется выходной низкочастотный фильтр (НЧФ) L_fC_f. Обобщенная структура преобразователя частоты показана на рис.2., где В – выпрямитель, ФВ – фильтр выпрямителя, РИ – резонансный инвертор, НЧФ - низкочастотный фильтр.

Алгоритм работы цифровой системы нелинейного управления с учетом переключающих последовательностей, приведенных в таблице 1, представлен на рис.3.

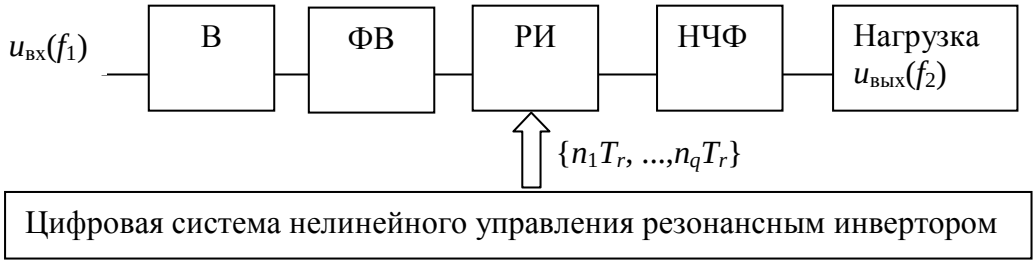
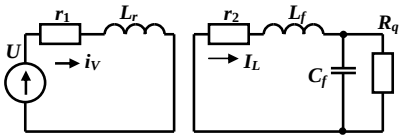
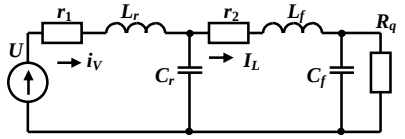
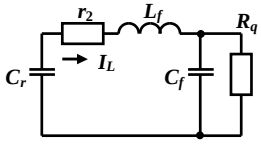
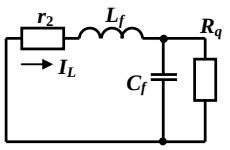
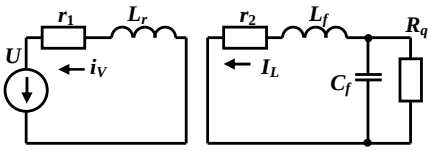
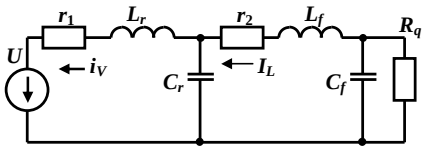
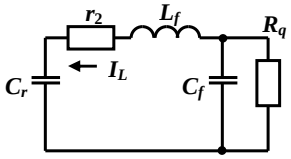
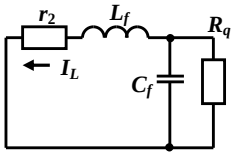


Рис.2. Обобщенная структура преобразователя частоты

Таблица 1 – Переключающие последовательности

Эквивалентные схемы РИ	Перечень замкнутых ключей преобразователя	Полярность выходного напряжения
	**VT1** – **VT3** –	+
	**VT1** – **VT3** –	+
	– – **VT3** –	+
	– – **VT3** –	+
	– **VT2** – **VT4**	–
	– **VT2** – **VT4**	–
	– – – **VT4**	–
	– – – **VT4**	–

Поскольку частота переключения в предлагаемом резонансном инверторе используется для время-импульсной модуляции, то должен быть указан допустимый диапазон частот коммутации основных ключей (интервалов времени между моментами коммутации). Максимальная частота коммутации может быть определена исходя из максимального выходного напряжения:

$$F_{SW} = \frac{2U_{out\_\max}}{U_s \cdot T_r}.$$

Минимальная частота коммутации определяется исходя из минимального выходного напряжения.

В цифровой системе управления (рис.3) на основе заданных параметров резонансного инвертора и характеристик выходного напряжения формируется последовательность управляющих импульсов, отпирающих силовые ключи в моменты времени $\{n_1T_r, ..., n_kT_r\}$ с длительностью $t_{imp}<T_r$.

Работа системы управления резонансным инвертором для преобразователя частоты была проверена с помощью имитационной модели, построенной в MatLab и показанной на рис.4.а. Силовой контур включает источник постоянного напряжения, основные ключи *VT*1 и *VT*2, индуктор и конденсатор, формирующие резонансный контур, параллельно конденсатору резонансного контутра подключены 2 ветки, каждая из которых содержит шунтирующий диод и дополнительный ключ *VT*3 (или *VT*4 для отрицательной полуволны выходного напряжения). Также паралельно им подключен выходной низкочастотный фильтр с нагрузкой. Последовательность управляющих импульсов задается с помощью переменных C111 - для положительной полуволны выходного напряжения, и C112 - для отрицательной, представляющих собой двумерный массив. Управление дополнительными ключами осуществляется при помощи переменных C11 и C12. Интервал открытия ключа *VT*3 (работающего при формировании положительной полуволны выходного напряжения) составляет первый полупериод выходного синусоидального низкочастотного сигнала. И соответственно, интервал открытия ключа *VT*3 - второй полупериод. Данная временная последовательность является актуальной только при работе преобразователя на активную нагрузку.

По результатам имитационного моделирования рассчитанные значения коэффициентов несинусоидальности выходного напряжения и напряжения на конденсаторе резонансного контура, которые составляют 3,37 % и 2,56 %.

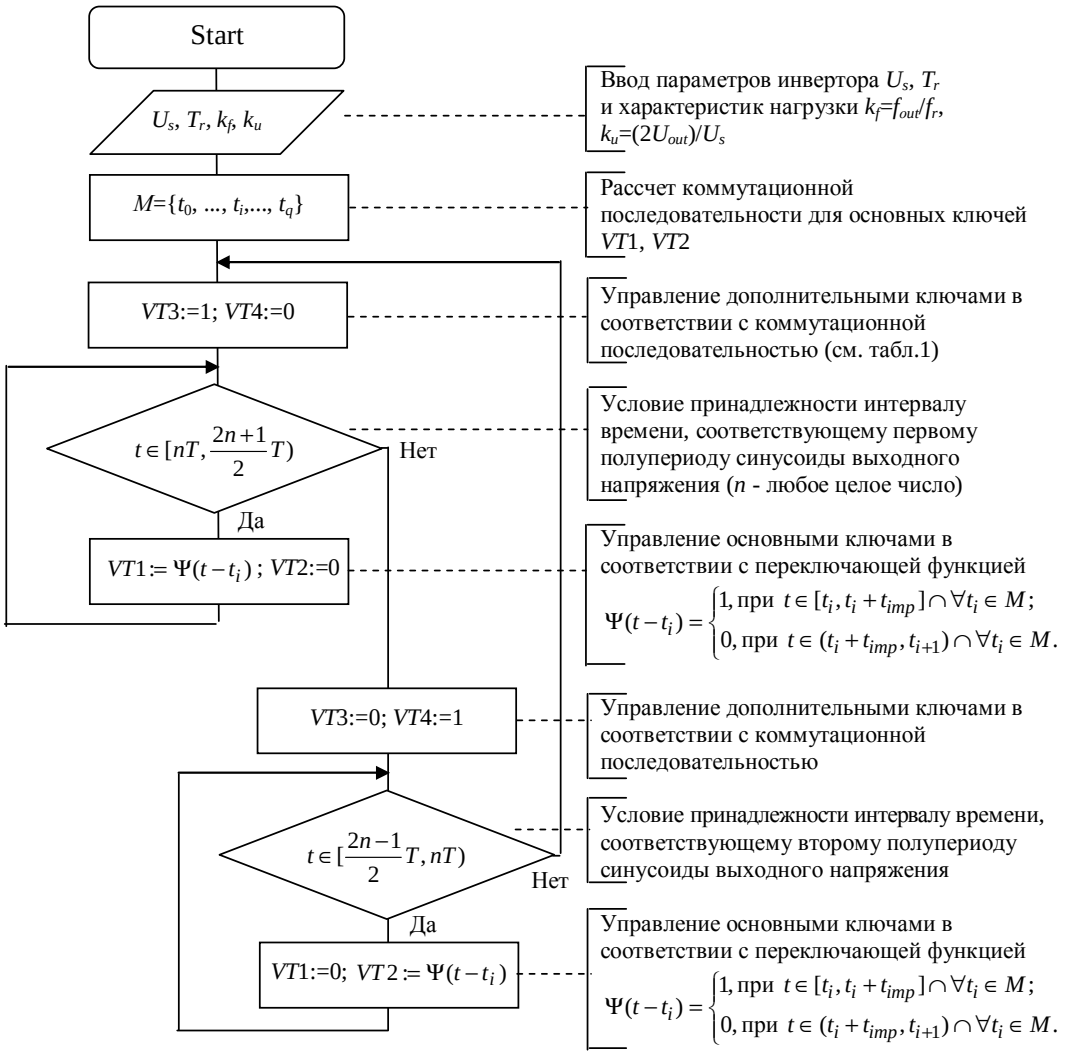


Рис.3. Алгоритм управления резонансным инвертором

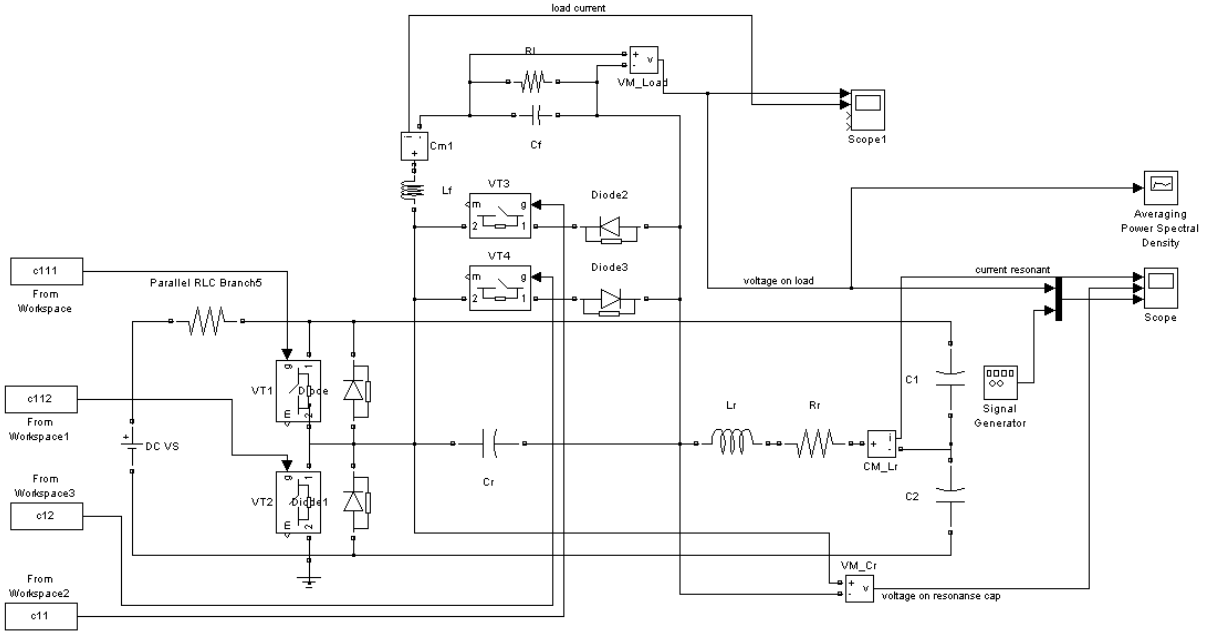


Рис. 4. Схема имитационной модели резонансного инвертора с нелинейным регулированием, входящего в состав преобразователя частоты

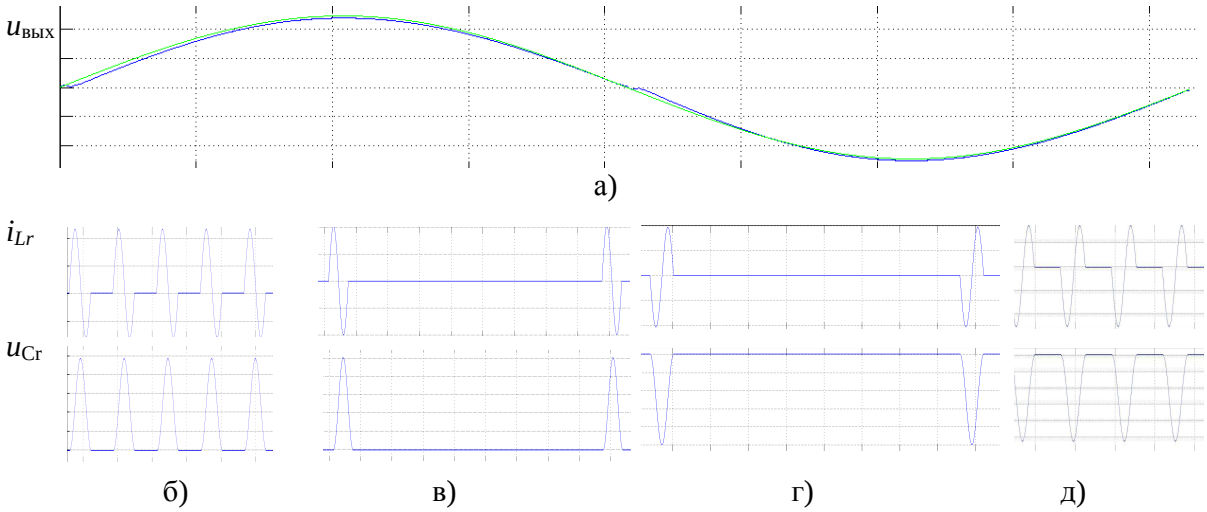


Рис.5. Эпюры процессов в преобразователе частоты на основе РИ с нелинейным регулированием: напряжение на нагрузке и эталонная синусоида (а); импульсы резонансных тока и напряжения при максимальном (б) и близком к нулю (в) напряжении для положительной полуволны выходного напряжения; импульсы резонансных тока и напряжения при максимальном (г) и близком к нулю (д) напряжении для отрицательной полуволны выходного напряжения

Форма несущих импульсов в резонансном контуре преобразователя показана на рис.5,б-д, а форма выходного напряжения показана на рис.5,а. Полученные характеристики выходного напряжения показывают возможность применения предложенной системы управления при работе резонансного инвертора, входящего в состав разработанного преобразователя частоты.

Выводы. Разработан способ нелинейного управления резонансным инвертором, входящим в состав предложенного преобразователя частоты. Определены коммутационные последовательности основных и дополнительных ключей инвертора. Разработанный алгоритм управления резонансным инвертором был проверен на работоспособность с помощью имитационной модели. Модель резонансного инвертора с цифровой системой нелинейного управления показала соответствие полученных характеристик выходного напряжения заданным. Малые значения рассчитанных коэффициентов несинусоидальности выходного напряжения и напряжения на конденсаторе резонансного контура свидетельствуют о снижении амплитуды высших гармоник и соответственно генерируемых помех по сравнению с преобразователем с жесткой коммутацией.

Список литературы: 1. *Браун М.* Источники питания. Расчет и конструирование / *М. Браун*. – Киев: «МК-Пресс», 2007. – 288 с. **2.** *Мелешин В. И.* Транзисторная преобразовательная техника / *В. И. Мелешин*. – Москва: Техносфера, 2005. – 632с. **3.** *Павлов Г. В.* Перетворювачі постійної напруги на основі резонансних інверторів: монографія / *Г. В. Павлов, А. В. Обрубов, О. В. Нікітіна, М. В. Покровський*. – Миколаїв: НУК, 2013. – 372 с. **4.** *Павлов Г. В.* Моделирование резонансно-импульсного инвертора напряжения [Электронный ресурс] / *Г. В. Павлов, А. В. Обрубов, И.Л. Винниченко* // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (підсумки V міжнародної науково-технічної конференції). 2014. Режим доступу: http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=2ea02bbf77dc9b002e1cd0511378?lectureId=30783&conferenceId=26153&isProjectorView=false. **5.** *Steigerwald R. I.* A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies / *R. I. Steigerwald* // IEEE APEC. – 1987. – P. 135–144.

Bibliography (transliterated): 1. Braun, M. *Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovanie*. Kiev: «MK-Press», 2007. Print. **2.** Meleshin, V. I. *Tranzistornaya preobrazovatelnaya tekhnika*. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2005. Print. **3.** Pavlov H. V., A. V. Obrubov, O. V. Nikitina, and M. V. Pokrovskyi. *Peretvoriuvachi postiinoi napruhy na osnovi rezonansnykh invertoriv: monohrafiia*. Mykolaiv: NUOS Publ, 2013. Print. **4.** Pavlov, G. V., A. V. Obrubov, and I. L. Vinnichenko. “Modelirovanie rezonansno-impulsnogo invertora napryazheniya.” *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi (pidsumky V mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii)*. 2014. **5.** Steigerwald, R. I. “A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies”. *IEEE APEC*, 1987. Print.

Надійшла (Received) 27.08.2015

УДК 621.316.7

Г.М. МУСТАФА, к.т.н., начальник отдела ФГУП ВЭИ, Москва, Российская Федерация;
С.И. ГУСЕВ, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ, Москва, Российская Федерация;
А.А. ЕРШОВ, инженер, ООО «НПП ЛМ Инвертор», Москва, Российская Федерация;
И.Б. ЛУГАНСКАЯ, старший научный сотрудник ФГУП ВЭИ, Москва, Российская Федерация.

МОДУЛЬНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Введение. Напряжение сети, питающей тяговые подстанции железной дороги переменного тока искажено действием однофазной несинусоидальной нагрузки, создаваемой выпрямителями электровозов. Выполненные контрольные измерения вдоль Транссибирской магистрали показывают существенные отклонения качества напряжения во всех контрольных точках от нормативных значений по двум группам показателей:

- по несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U};
- по искажению синусоидальности кривой напряжения K_U и коэффициенту *n*-ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Согласно [1] снижение показателей качества электроэнергии приводит к увеличению потерь напряжения и мощности, уменьшению пропускной способности сетей, нарушению нормальной работы и срока службы оборудования.

Так:

- снижение напряжения на 1% приводит к снижению производительности электрооборудования на 0,1 2%;
- при несимметрии напряжения 2% срок службы асинхронных двигателей сокращается на 10,8 %, а потери возрастают на 8%;
- при той же несимметрии срок службы синхронных двигателей сокращается на 16,2%, трансформаторов – на 4%, конденсаторов – на 20%;
- при увеличении напряжения на 10% срок службы осветительных установок сокращается в 4 раза;
- при несимметричной токовой загрузке фаз нагрузочные потери в сетях возрастают на 7-15%.

Устройство для приведения показателей качества напряжения в норму в окрестности тяговой подстанции должно выполнять одновременно две функции

- симметрировать напряжение (подавлять обратную составляющую напряжения);
- фильтровать высшие гармоники напряжения в динамичном режиме, когда источник гармоник быстро изменяется.

Вопросам симметрирования напряжения в 3-фазной сети пассивными устройствами посвящено множество работ, начиная с классического труда Штейнмеца [2]. Большой вклад в решение проблемы симметрирования напряжения внесли известные электротехники – Милях А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. [1, 3, 4]. В последние годы большое развитие получили управляемые устройства на основе силовой электроники. Однако, полноценно выполнять эти функции традиционные управляемые устройства не могут. Применявшиеся для этого до настоящего времени технические средства – системы СТК с регулируемыми тиристорами реакторными группами и пассивными настроенными фильтрами – дают лишь дорогостоящее и неполноценное решение задач обеспечения качества. Не вполне полноценное решение даёт и применение системы СТАТКОМ с трёхуровневым широтно-модулированным конвертором напряжения [5]. Частота PWM в мощных системах жёстко ограничена сверху коммутационными потерями мощности, и поэтому функция фильтрации, когда она востребована, при использовании трёхуровневого СТАТКОМ по-прежнему возлагается на пассивные цепи.

Комплексное решение задачи симметрирования и динамичной фильтрации способно дать новое техническое решение: модульный многоуровневый PWM – преобразователь (Modular Multilevel Converter - MMC) [6, 7]. В MMC эквивалентная частота PWM равна произведению числа модулей фазы на частоту PWM одного модуля. Даже при умеренном числе модулей и невысокой частоте PWM модуля без труда достигаются требуемая эквивалентная частота PWM и требуемая ширина полосы пропускания частот.

Быстрый прогресс IGBT, а также усовершенствование сигнальных процессоров (рост быстродействия, увеличение разрядности) открыл возможность для применения преобразователей этого типа в электроэнергетике, где они конкурируют с традиционными тиристорными системами и открывают новые возможности построения гибких систем регулирования мощности в системах AC (переменного тока) (Flexible Alternated Current Transmission Systems - FACTS). Решающее значение для расширения применений систем MMC в электроэнергетике имеет изобретение Р. Марквардтом современного варианта модульной многоуровневой схемы [6].

С системой MMC электроэнергетика получила полноценное средство трансформации форм электрической энергии. Электротехника уровня потребителей получила такое средство чуть раньше. В течение короткого промежутка времени PWM-преобразователи не только заняли доминирующее положение в технике преобразования

© Г.М. Мустафа, С.И. Гусев, А.М. Ершов, И.Б. Луганская, 2015

форм электрической энергии, но и многократно расширили сферу применения преобразователей и соответствующий рынок. Эта сфера охватывает ныне весь диапазон от малых источников питания компьютеров и бытовых приборов до мощных электроприводов установок сжижения природного газа.

Новый системный принцип модульных многоуровневых схем снял препятствия распространению технологии транзисторных PWM-преобразователей на высокие напряжения и мощности. ММС является универсальным и совершенным средством для регулирования потоков энергии в сетях и для управления качеством энергии. Насколько ожидаемым и востребованным электроэнергетикой является такое средство можно судить по скорости, с которой ММС получила всеобщее признание. Уже в 2010 году осуществлён первый проект передачи постоянного тока с преобразовательными подстанциями по технологии HVDC PLUS (базируется на ММС) и создан комитет IEC для выработки стандартов и рекомендаций по применению ММС в передачах энергии постоянным током. Однако ММС востребованы в качестве вспомогательного технического средства и в существующих сетях переменного тока. В них задачами ММС станут:

- участие в оптимальном регулировании перетоков энергии в разветвленных сетях переменного тока;
- обеспечение показателей качества напряжения в сетях переменного тока в условиях возрастающих искажающих факторов.

Цель работы. В настоящей работе освещаются результаты разработки и испытаний опытного образца активного фильтра, выполненного по одной из ранних схем ММС (см. рис. 1), и предназначенного для применения в составе полюса вставки постоянного тока, который однако позволяет при некоторой доработке воспроизводить и более специфические условия работы, необходимые для решения задач обеспечения качества напряжения.

Постановка проблемы. Обеспечение показателей качества в условиях действия однофазной искажающей нагрузки включает в себя необходимость решения триады задач:

a) регулирование реактивной мощности;

b) симметрирование;

c) фильтрацию высших гармоник и демпфирование переходных колебаний.

Проблемы применявшихся технических решений имеют фундаментальный характер. Широкополосная фильтрация в классе пассивных (линейных стационарных) цепей возможна лишь с применением резисторов, согласованных с волновым сопротивлением цепи. В электроэнергетических целях (в отличие от целей радиотехники и связи) применение согласованных резисторов, очевидным образом невозможно. Что же касается узкополосных (настроенных) фильтров, то применительно к ним действует дилемма «избирательность – затухание»: для обеспечения высокой избирательности требуется увеличение добротности, но при увеличении добротности увеличивается время затухания переходных процессов и наоборот. Вследствие этих общих закономерностей класса линейных стационарных систем, показатели качества пассивного фильтра в электроэнергетике являются неизбежно компромиссными - не слишком хорошая избирательность и не слишком долгое время затухания.

С применением активного элемента типа ММС (и соответственно с переходом от класса линейных стационарных систем к классу билинейных систем) в электроэнергетике становятся возможными как широкополосный фильтр, так и узкополосный фильтр с высокой избирательностью.

Модульный многоуровневый конвертор способен и должен осуществлять управление сразу совокупностью параметров сети переменного тока такой как:

модуль прямой последовательности напряжения или тока (регулирование реактивной мощности);

модуль обратной последовательности (обычно должен сводиться к нулю);

комплексные амплитуды для некой совокупности высших гармоник (должны сводиться к нулю);

переходные колебания (должны демпфироваться).

К многообразию регулируемых параметров сети переменного тока при использовании ММС, которые содержат «подвешенные» конденсаторы, добавляется ещё совокупность параметров сети постоянного тока – напряжений этих подвешенных накопительных конденсаторов. Таким образом, возникает задача синтеза разветвлённой многоконтурной системы, управляющей одновременно совокупностью большого числа параметров.

Материалы исследования. Рассматривается схема ММС-nM, представленная на рисунке 1, при работе в режиме СТАТКОМ, без применения дополнительных пассивных элементов (за исключением LC-фильтра для подавления пульсаций PWM, который энергетически незначим). Для построения такой системы при решении прикладных задач развита инженерная методика – DSB-алгоритм управления ММС. DSB-алгоритм базируется на традиционной «классической» теории управления и на теории трёхфазных (вращательных – drehnetz) цепей. Идея DSB-алгоритма заключается в последовательном построении регуляторов трёх типов:

D – демпфирование (demp);

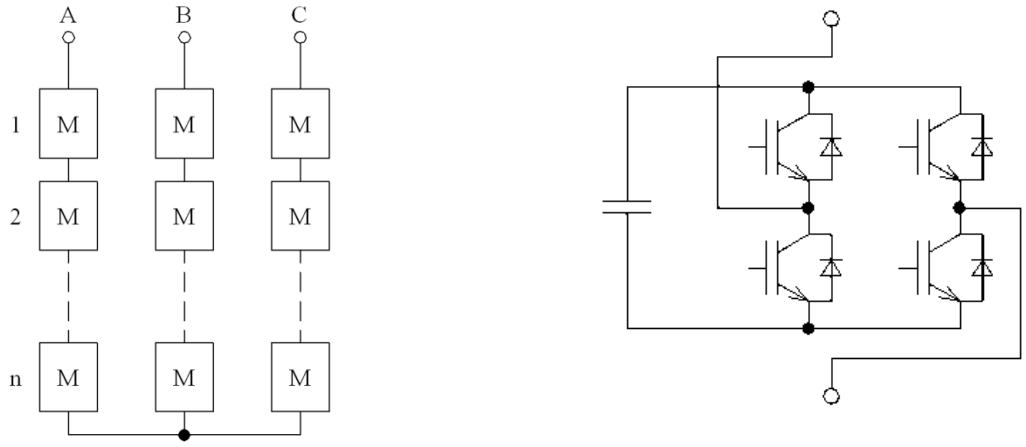
S – селективное подавление (select);

B – баланс (balance).

и последующим совмещении их действий (рис. 2).

Основная переменная управления ММС – задание напряжения vz(t) – образуется как трёхкомпонентная сумма:

$$vz = vdemp + vsel + vbal.$$



а) б)

Рисунок 1 – Структура ММС-nM, не имеющая выделенных высоковольтных полюсов (а). ММС-nM составляется из мостовых PWM- модулей (б).

Каждый из компонентов образуется своими обратными связями и выполняет свою функцию в комплексе задач ММС. Компонент D (демпфирование) образуется с помощью обратной связи по выходному току активного элемента iae.

Компонент S (селективное подавление гармоник) образуется обратной связью по сетевому току is с участием в образовании этой связи напряжения сети vs. Компонент B (баланс) образуется обратной связью по напряжениям накопительных конденсаторов звеньев постоянного напряжения (DC) модульного многоуровневого преобразователя с участием в этой обратной связи сетевого напряжения vs.

Процессы и характеристики СТАТКОМ-ММС иллюстрируются результатами испытаний опытного образца активного фильтра мощностью 16 Мвар, выполненного по схеме ММС-nM (см. рис. 1), и предназначенного для применения в составе полюса передачи постоянного тока, однако который позволяет при некоторой доработке воспроизводить и более специфические условия работы.

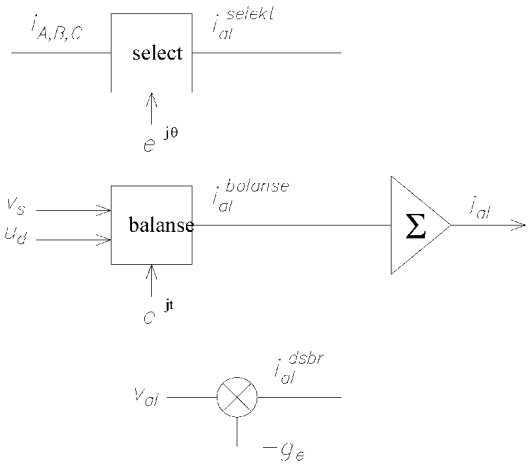


Рис. 2 - Структура управления ММС по DSB-алгоритму

Номинальные параметры испытательного стенда

- напряжение 15,75 кВ;
- мощность 16,6 МВА.

Упрощённая однолинейная схема стенда представлена на рис. 3. В качестве источника искажённого тока используется 6-ти-пульсный тиристорный выпрямитель мощностью 16,6 МВА, короткозамкнутый по постоянному току через сглаживающий реактор. По стороне переменного тока выпрямитель подключен к сборным шинам переменного тока напряжением 15,75 кВ, питающимся от трансформатора мощностью 3 МВА. ММС включается параллельно выпрямителю. Система управления выпрямителем оснащена регулятором тока, который осуществляет поддержание тока выпрямителя равного поступающему заданию.

При этом от шин переменного напряжения потребляется трапециевидный ток, состоящий из основной гармоники и канонических гармоник 6-пульсной схемы

5, 7, 11, 13, 17, 19, … .

Назначением ММС является поддержание стабильного синусоидального напряжения на сборных шинах сети 15,75 кВ при изменениях потребляемого тока и изменениях высших гармоник тока.

Система управления ММС конструктивно разделяется на следующие составные части:

-ячейка управления модуля транзисторно конденсаторного (ТКМ) – 21 шт.;
- шкаф управления фазой (ШУФ) – 1 шт.;
- система управления, регулирования, защит и автоматики (СУРЗА) – 1 шт.

Ячейка управления ТКМ размещается непосредственно в силовом блоке ТКМ. Связь с блоком управления фазой осуществляется по оптоволоконному интерфейсу. Питание ячейки – через трансформатор тока от токовой петли с гальванической развязкой на полное рабочее напряжение. ШУФ размещается в отдельном шкафу (рис. 4) на потенциале «земли» с изоляцией от ячейки управления ТКМ через токовую петлю (питание) и оптоволоконные кабели (управление, диагностика) на полное рабочее напряжение.

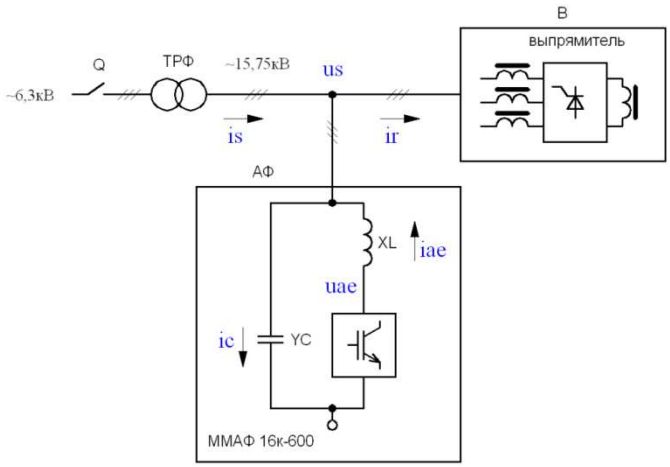


Рисунок 3 – Упрощенная однолинейная схема стенда для испытаний АФ
АФ – активный фильтр; В – мостовой выпрямитель;
Q – выключатель.

Рисунок 4 – Внешний вид шкафа управления фазами

В ШУФ входят три микропроцессорных блока управления фазами БУФ. Связь БУФ с СУРЗА осуществляется по быстродействующему оптоволоконному интерфейсу. СУРЗА размещается в отдельном шкафу (рис. 5), который может быть расположен удалённо от помещения с силовым оборудованием. В состав СУРЗА входит блок микропроцессорного управления, блок питания и панель реле для обмена дискретными сигналами.

Связь СУРЗА с системой верхнего уровня подстанции (АСУ ТП) осуществляется по быстродействующему цифровому интерфейсу с оптоволоконной развязкой.

Датчики тока и напряжения, входящие в состав ММС, осуществляют оцифровку измеряемых величин в непосредственной близости от соответствующих силовых элементов и передают данные в блок СУРЗА по быстродействующему оптоволоконному интерфейсу. Питание датчиков осуществляется от токовой петли с гальванической развязкой на полное рабочее напряжение.

Рисунок 5 – Внешний вид шкафа СУРЗА

В СУРЗА предусмотрены дополнительные оптические входы для приёма оцифрованных сигналов с внешних датчиков напряжения (3 фазы) и тока (3 фазы).

На рис. 5 показан установившийся процесс системы. Трапециевидный ток выпрямителя ira практически полностью поглощается активным элементом, и сетевое напряжение остаётся синусоидальным. Поскольку выпрямитель замкнут на сглаживающий реактор, его активная мощность близка к нулю. Поэтому активная часть сетевого тока весьма мала (около 3%). Реактивная часть сетевого тока полностью подавлена астатическим регулятором реактивной мощности.

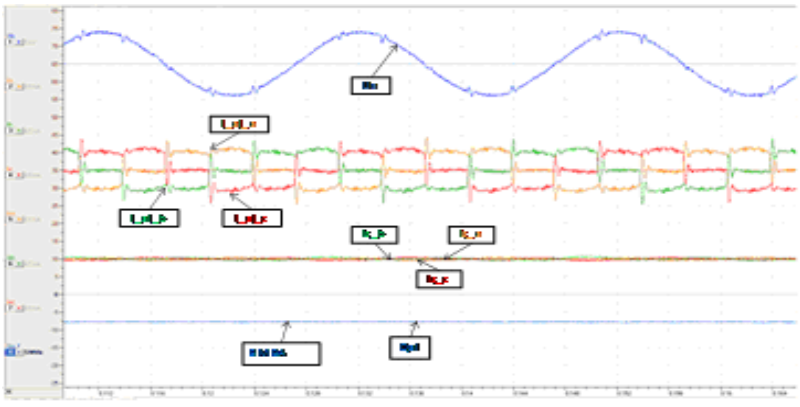


Рисунок 6 – Работа ММС совместно с выпрямителем: стационарный режим – ток выпрямителя 600А при напряжении сети 10 кВ. Сверху вниз: фазное напряжение(Ua), фазные токи активного элемента (I_al), фазный сетевой ток (Is_a), реактивная мощность АФВГ(Qal).

Как было отмечено изготовленный активный фильтр был разработан для применения в составе фильтрокомпенсирующего устройства вставки постоянного тока. Однако, более востребованным оказалось его использование для симметрирования и фильтрации напряжения в окрестности подстанции 220 кВ Сковородино Забайкальской железной дороги. Для целей симметрирования очевидным образом необходимо изменить схему соединения силовой части из звезды в треугольник и провести соответствующую доработку алгоритмов управле-

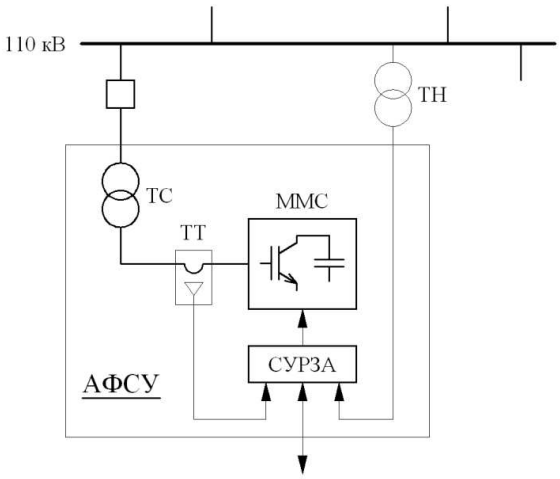
ния. Шунтирующее активное фильтро-симметрирующее устройство (АФСУ) на базе ММС предполагается присоединить к шинам 110 кВ ПС 220 кВ Сковородино через согласующий трансформатор с относительно небольшим напряжением короткого замыкания. Упрощённая структурная схема подключения АФСУ представлена на рисунке 7.

Была разработана следующая методика расчёта несимметрии и искажений на шинах 110 кВ ПС «Сковородино» при действии АФСУ методом частотных характеристик [8].

Расчёты выполняются по методу симметричных составляющих на основе амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) сети по расчётной схеме замещения, приведённой к уровню напряжения 110 кВ, которая учитывает схему замещения сети, параметры трансформаторов и отходящих линий электропередачи.

На первом этапе рассчитывается кривая тока однофазного выпрямителя электровоза, на основании анализа которой формируется вектор комплексных амплитуд гармоник искажающего тока нагрузки для гармоник с номерами: 1, 3, 5, 7, 9. Далее эти гармоники преобразуются в гармоники тока трёхфазной системы с номерами: ±1, ± 3, ± 5, ± 7, ±9, - отображая действие трансформатора тяговой подстанции с группой соединения обмоток Y/D (знак минус отображает обратную последовательность токов и напряжений).

По параметрам схемы замещения сети рассчитываются амплитудные фазочастотные характеристики входного сопротивления сети.



ММС - модульный многоуровневый преобразователь ;
ТС - согласующий трансформатор ;
СУРЗА - система управления, регулирования и защиты ;
ТТ и ТН - датчики тока и напряжения.

Рисунок 8 - Упрощённая структурная схема подключения АФСУ

Модульный многоуровневый преобразователь (ММС) представляется как идеальный усилитель мощности, повышающий на силовом выходе сигнал задания для каждой рассматриваемой гармоники до величины, обеспечивающей либо полное подавление (обнуление) гармоник, либо их снижение до нормативного уровня.

Регуляторы искажающих гармоник АФСК от гармоники кратности – 1 (обратная последовательность - несимметрия) до гармоник кратности ± 3, ± 5, ± 7… (искажения) отображаются косвенно, путём задания в напряжении АФСК такой комплексной амплитуды искажающих гармоник, которая устраняет полностью или снижает до нормативного уровня соответствующей гармоники напряжения шин 110 кВ.

Проводится идентификационный расчет искажений напряжения на шинах 110 кВ при отсутствии АФСУ, на основании которого определяется величина искажающего тока электровоза по условию совпадения коэффициента несимметрии, получаемого по расчётной схеме, с измеренным при испытаниях – длительно сохраняющимися и наибольшими.

Рассчитываются комплексные амплитуды напряжений гармоник на шинах 110 кВ и на шинах 220 кВ при действии АФСК при условии полного подавления гармоник на шинах 110 кВ. Это соответствует «заземлению» узла, соответствующего шинам 110 кВ схемы замещения, потенциал которого приравнивается нулю для каждой рассматриваемой гармоники, включая обратную последовательность. В этих условиях рассчитываются комплексные сопротивление и передаточные функции, комплексные амплитуды напряжений и токов АФСУ, на основании которых определяется предельная мощность АФСУ, необходимая для полного подавления несимметрии и гармоник с номерами 3, 5, 7, 9.

Рассчитываются комплексные амплитуды напряжений гармоник на шинах 110 кВ при условии снижения гармоник на шинах 110 кВ ниже предельно допустимых значений. Для этого задание напряжения гармоники ММС устанавливается на нулевом уровне, что соответствует закороченному выходу ММС. При этом согласующий трансформатор ММС остаётся в действии. Искажение напряжения шин 110 кВ в таком режиме снижается пропорционально соотношению сопротивлений схемы замещения. По комплексным амплитудам гармоник напряжения рассчитываются показатели качества напряжений шин 110 кВ, выраженные в % по отношению к величине основной гармоники напряжения. После расчёта комплексных амплитуд гармоник токов и напряжений по ним восстанавливаются соответствующие переменные и рассчитывается мощность АФСУ, необходимая для реализации такого режима.

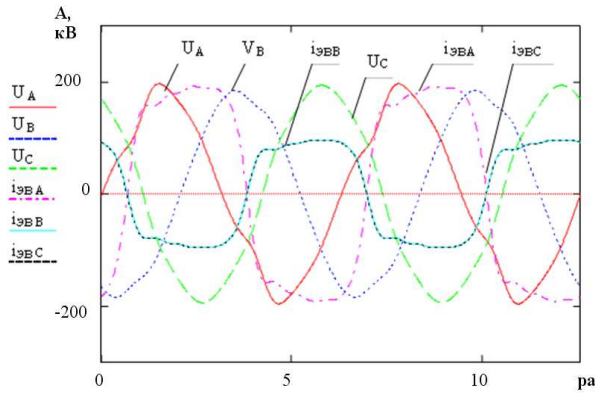


Рисунок 9 - Графики токов и напряжений для режима наибольших искажений. U $_{A, B, C}$ – фазные напряжения; iэв $_{A, B, C}$ – искажающие фазные токи.

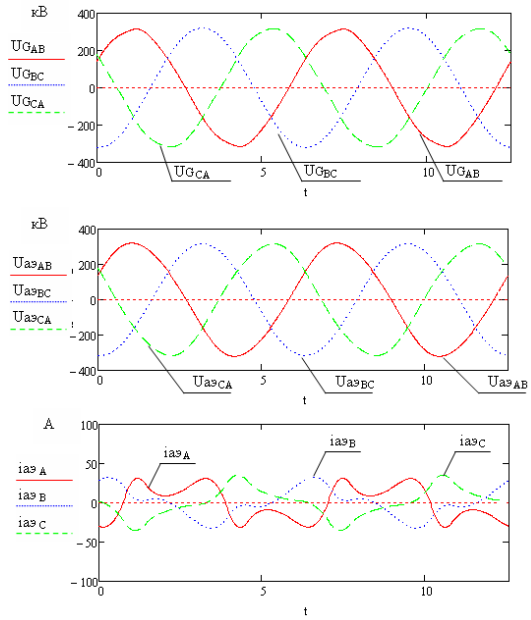


Рисунок 10 - Работа активного элемента в режиме наибольшей загрузки при подавлении гармоник ниже нормативных значений

$u_{аэAB,BC,CA}$ - линейные напряжения активного элемента;

$i_{аэ\,A,\,B,\,C}$ - фазные токи активного элемента;

$u_{G\,AB,BC,CA}$ - линейные напряжения узла G расчетной схемы.

На рисунке 9 представлены расчётные количественные данные и графики для режима наибольших искажений при отключенном АФСК. Искажающая нагрузка сосредоточена на одной дистанции, и имеет величину: $I_{эвA}$ = 136 А, $I_{эвB}$ = 0, $I_{эвC}$ = 0. Здесь *A*, *B* и *C* – индексы векторов 3-фазной системы координат.

Полная мощность искажающей нагрузки (мощность электровозов на дистанции) равна 31,4 МВА, а её активная мощность - 23,7 МВт.

На рисунке 10 приведены результаты действия АФСУ при подавлении гармоник ниже нормативных требований.

Величина искажений радикально снижается по сравнению с режимом работы без АФСУ. Мощность АФСУ при этом составляет 14,6 Мвар.

Список литературы: **1**. *Шидловский А.К., Кузнецов В.Г.* Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 268 с. **2.** *C.P. Steinmetz.* Theory and calculation of electric circuits. – New York, 1917. – 361 с. **3**. *Милях А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г.* Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. – Киев: Наукова Думка, 1973. - 219 с. **4.** *Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Т.* Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 174 с. **5.** *Rolf Grunbaum, Tomas Johansson.* SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. ABB Review 6/98. **6.** *Marquardt Rainer* (DE) – Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors. Publication number DE10103031, 2002-07-25. **7.** *A. Lesnicar, and R. Marquardt,* "An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range", IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003. **8.** *Мустафа Г.М., Гусев С.И., Ершов А.М. и Луганская И.Б.* Расчет мощности активного фильтросимметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Сковородино. – Электрические станции. – 2005. - №3. - С. 46-53.

Bibliography (transliterated): **1**. *Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G.* Povyshenie kachestva energii v elektricheskih setjah. – Kiev: Naukova Dumka, 1985. – 268 s. **2**. *C.P. Steinmetz.* Theory and calculation of electric circuits. – New York, 1917. – 361 с. **3**. *Miljah A.N., Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G.* Shemy simmetrirovanija odnofaznyh nagruzok v trehfaznyh tsepjah. – Kiev: Naukova Dumka, 1973. – 219 s. **4**. *Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.T.* Optimizatsija nesimmetrichnyh regimov system elektrosnabjenija.- Kiev: Naukova Dumka, 1987. – 174 s. **5.** *Rolf Grunbaum, Tomas Johansson.* SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. ABB Review 6/98. **6.** *Marquardt Rainer* (DE) – Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors. Publication number DE10103031, 2002-07-25. **7.** *A. Lesnicar, and R. Marquardt,* "An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range", IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, June 23-26, 2003. **8.** *Mustafa G.M., Gusev S.I., Ershov A.M. and Luganskaja I.B.* Raschet moschnosti aktivnogo filtrosimmetriruyuschego ustroystva dlja normalozatsii naprjagenija na shinah PS 220 kV Skovorodino. – Electricheskie stantsii. *– 2005. - №3. –S. 46-53.*

Поступила (received) 04.09.2015

Информация

УДК 658:005.52

С. А. МЕХОВИЧ, канд. екон. наук, професор НТУ «ХПІ»

МЕХАТРОНІКА У КОНТЕКСТІ РЕГІОНАЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ

Введення. Світовий досвід створення нового та модернізації діючого технологічного обладнання свідчить про високу динаміку розвитку регульованих електроприводів, комп'ютерних засобів автоматизації, та використання інформаційних систем. Це обумовлено формуванням і активним розвитком у всьому світі нової галузі науки – мехатроніки, яка базується на знаннях і досягненнях в області механіки, електроніки, автоматики та інформатики.

Постановка проблеми. Дуже важливою задачею сучасного етапу розвитку є визнання машинобудування пріоритетною галуззю та розробка відповідної стратегії.

Основна частина. Інтеграція знань у цих областях науки і техніки дозволила створити якісний скачок у розвитку техносфери, підійти до створення принципово нових видів і систем обладнання. Як галузь науки, мехатроніка присвячена аналізу та вибору законів виконавчих рухів машинних агрегатів із комп'ютерним управлінням, а також синтезу таких агрегатів та машин на їх основі. У науковому плані задача створення мехатронних вузлів для металоріжучих верстатів складається не в елементарному поєднанні механіки, управління і електроники, а у створенні методів формально логічного аналізу. Створення мехатронних модулів у станкобудуванні принципово змінює погляд на конструювання, створює системний рівень, що враховує складні взаємозв'язки між проектуванням, виробництвом, складанням, налагодженням, експлуатацією, ремонтом і утилізацією металообробних верстатів [1]. Для таких виробів, завдяки технічному обслуговуванню термін їх життя може бути подовжений. Блочно-модульний принцип побудови сучасного обладнання дозволяє реактивувати остаточну вартість на різних ступенях та восстановити для повторного або багаторазового використання на основі високо розвинутих промислових технологій. Вторинне використання виробів - це зростаюча промислова область. Девиробництво індустріалізується, виникають нові заводи із новітніми технологіями для демонтажу відтворення споживчих якостей виробу або для підготовки сировини [2,с.47-48]. За умови державної підтримки цього напряму існуючі машинобудівні підприємства можуть перетворитись у сучасні, та за рахунок значно нижчої вартості порівняно із новими виробами розвинути малий та середній бізнес на основі використання подвійних технологій підприємств військово-промислового комплексу.

Мехатроніка – це наука, що вивчає синтетичне об'єднання вузлів точної механіки із електронними, електротехнічними та комп'ютерними компонентами з метою проектування та виробництва якісно нових модулів, систем, машин та комплексів машин із інтелектуальним управлінням їх функціональними рухами [3].

Із цього визначення слідує, що створення мехатронних вузлів забезпечує принципово новий концептуальний підхід до побудови виробничих систем із принципово новими характеристиками. Вимоги ринку створили такі умови, коли усі провідні електротехнічні корпорації виробляють електроприводи, що регулюються, комплексно із комп'ютерними засобами автоматизації у виді гнучкопрограмуємих систем, адаптованих до широкої області їх використання. Окупність вкладень при цьому найбільш швидка [4]. Створення автоматизованих мехатронних модулів лінійних та нелінійних пересувань для металообробних станків є новою задачею як у теоретичному , так і у практичному плані.

Розробка мехатронних електромеханічних пристроїв, перш за все, базується на теорії автоматизованого електроприводу, теорії автоматизованого управління і конструюванні верстатів та машин. Таким чином, від розвитку вітчизняного виробництва електроприводів залежить розвиток вітчизняного машинобудування, причому перше повинно розвиватись випереджаючими темпами. Усі провідні електротехнічні корпорації виробляють електроприводи, що регулюються, комплексно із комп'ютерними засобами автоматизації у виді гнучкопрограмуємих систем, адаптованих до широкої області їх використання. Окупність вкладень при цьому найбільш швидка [5]. Поряд із традиційним застосуванням електроприводи, що регулюються, сумісно із технологічними засобами виступають у вигляді засобів регулювання технологічних змінних, таких як рівень, тиск, вологість, температура, виробництво, тощо[6,]. Усе це свідчить про виключну актуальність галузі.

Машинобудування матеріалізує інновації у вигляді машин, обладнання, приборів та технологічних процесів. Його особиста роль полягає в тому, що воно виступає як утворюючий комплекс, що формує активну частину основних виробничих фондів практично в усіх галузях народного господарства, утримує виробничо – технічний потенціал на потрібному рівні та закладає тим самим основу для переходу до нового технологічного укладу. Теперішній стан машинобудівного комплексу не дозволяє вирішувати цю проблему, тому першочерговою стоїть задача розробки механізмів його корінних перетворень. Потребують розробки методологічні аспекти щодо обґрунтування стратегії інтеграції машинобудування України в світове господарство, а також напрями її державної підтримки.

Аналіз інноваційних перетворень провідних держав свідчить про те, що у їх практиці використовуються досить ефективні інструменти, які в умовах України не знайшли свого місця. У першу чергу це стосується кла-

© С.А. Мехович, 2015р.

стерної політики, державно-приватного партнерства та його підтримуючого напряму – технологічних платформ, інжинірингу, мереж трансферу технологій та деяких інших. Важливим методологічним завданням дослідження є розробка теоретичних підходів щодо обґрунтування доцільності їх комплексного застосування у вітчизняній практиці перетворень.

По багатьом теоретичним і практичним питанням даних проблем не склалося єдиного бачення і наукового апарату. Управлінські структури на практиці інтуїтивно намагаються виробити стратегію оздоровлення для керованих ними підприємств. Відокремленість теоретичних досліджень існуючих проблем та їх дискусійний характер є однією із причин, що стримують розробку стратегії структурної перебудови економіки України. В існуючих дослідженнях переважно розглядаються окремі економічні аспекти реформування системи управління в цілому. Основний акцент робиться на практичному застосуванні нових методів діяльності міжгалузевих формувань, розробку відповідних маркетингових програм, виготовлення нових видів продукції міжгалузевого призначення та впровадження прогресивних технологій міжгалузевого виробництва, переважно іноземного походження. Більшість досліджень не бере до уваги нові обставини, що склалися на ринку внаслідок трансформаційних глобалізаційних процесів, втрати певних галузевих ознак через появу фінансово-промислових груп, холдінгових компаній та інших ринкових формувань.

Глобалізація у розумінні світових фінансових організацій, Всесвітнього банку та МВФ – це стрімка інтеграція різних країн за рівнем розвитку у плані торгівлі та інвестицій. Існує багато аргументів на захист вільної глобальної торгівлі та інтеграції, значна частина яких стосується економіки та сфери виробництва. Принциповим питанням щодо оцінки наслідків глобалізації для різних країн є вибір часу для її проведення. Деякі дослідники наслідки глобалізації пов'язують із таким явищем, як несиметричність, тобто, коли одні країни спеціалізуються на видах діяльності із зростаючою віддачею, а інші – із спадаючою. У цьому разі внаслідок обміну товаром та послугами, що виникає поміж ними, останні країни за визначенням Е. Райнерта спеціалізуються на бідності. При цьому, країна, в якій немає промисловості вимушена підкорятись закону спадаючої віддачі. Ця закономірність існує багато сторіч і добре відома економістам. Звідси виходить, що краще мати неефективний промисловий сектор, ніж не мати його зовсім [7, с.35 - 37]. Теорія глобалізації спирається на вільні ринки, демократію і волю (рис.1).

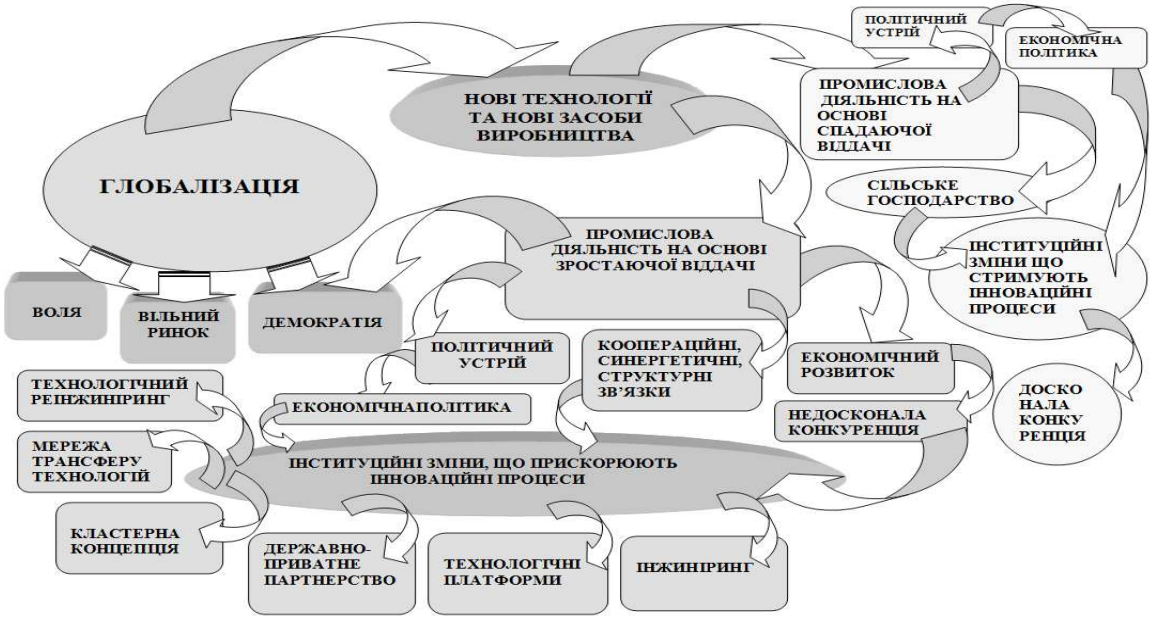


Рис.1 – Ланцюги впливу наслідків глобалізації на промислову діяльність (розроблено автором).

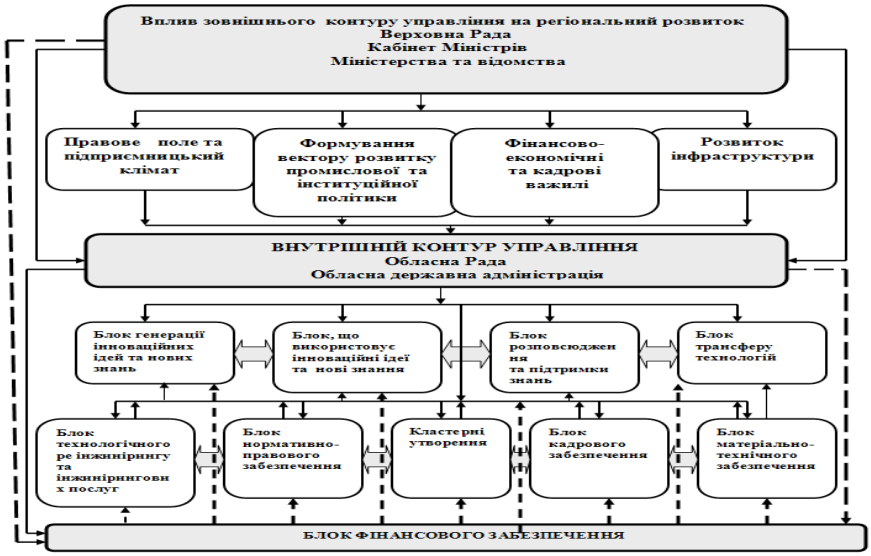
Як видно із рис.1, наслідками глобалізації є дифузія виробництва у вигляді нових технологій та нових засобів виробництва. Глобалізація відчуває потужний цілеспрямований вплив організованих сил провідних держав, міжнародних організацій, ТНК, найбільш впливових засобів масової інформації. У сфері виробництва для глобалізації характерна трансформація сучасних технологій, виробничих систем, принципів організації та управління виробничими процесами, інформаційних технологій, програмного продукту, інтелектуального потенціалу. Така проява глобалізації обумовлює промислову діяльність. Слід розуміти, що не усі види діяльності приводять до позитивного результату. Промислова діяльність може здійснюватись на основі спадаючої або зростаючої віддачі. Внаслідок факторів зростаючої та спадаючої віддачі, якісних відмінностей у рівні підприємництв, лідерства та знань, а також різниці між видами економічної діяльності, ринкова економіка, якщо в неї не втручатись, створює передмови для банкрутства. [7, с.211-213]. Промислова діяльність на основі спадаючої віддачі, для якої характерна досконала конкуренція, обумовлює формування політичного устрою та економічної

політики, яка приводить до інституційних змін, що стримують інноваційні процеси. Країна, в якій немає промисловості, вимушена підкорятись закону спадаючої віддачі.

Для економічного розвитку характерні зростаюча віддача, розподіл праці, динамічна недосконала конкуренція та сприятливі умови для інновацій. Промислова діяльність на основі зростаючої віддачі сприяє розвитку демократії та формує політичний устрій і економічну політику, яка приводить до інституційних змін, що прискорюють інноваційні процеси. Така діяльність сприяє розвитку коопераційних, синергетичних та структурних зв'язків, а ефективне використання нових технологій та нових засобів виробництва потребує удосконалення інноваційного середовища. Тому разом із експортом технологій експортуються і відповідні інститути, що забезпечують їх ефективне функціонування. Це – об'єктивний процес, який потребує вивчення світового досвіду їх використання та створення необхідних умов для пристосування з урахуванням рівня та особливостей інтелектуального та інституційного розвитку тієї чи іншої країни.

Характерним проявом глобалізації у сфері виробництва є той факт, що виробники сучасного устаткування розміщують у країнах, у яких вони зацікавлені, представництва, філії та склади, максимально наближаючи виробництво до потенційних споживачів, пропонуючи будівництво підприємств будь-якого профілю з виконанням робіт «під ключ» і включаючи постачання устаткування, технологій, а також розробку спеціальних програм. В Україні через зазначені вище закономірності процесів глобалізації почала проявлятися нова хвиля технологічного реінжинірингу за участю іноземних виробників, що вже працюють на українському ринку. Україна розглядається як привабливa країна для цього бізнесу. Підтвердженням є стратегія провідних виробників металообробного устаткування [8]. Як тут не згадати заклопотаність академіка Ю.П. Пахомова, який застерігав Україну, що «Модернизация производства через иностранные инвестиции важна. Однако, для страны, догоняющей высокоразвитые страны, технологический прорыв на иностранной базе уже невозможен. Ныне, когда значимо лишь конкурентное превосходство, во внешний мир передаются только старые технологии, которые «вышли в тираж» и потеряли способность быть носителем эксклюзивно обогащающей интеллектуальной ренты. Опережающее развитие обеспечивает лишь собственная наука и свои прорывные технологии. Именно по этим причинам Китай, куда валом идут инвестиции Запада, этим не удовлетворяется и ускоренно форсирует свою науку и свои технологии» [9].

Із економічної теорії відомо, що тип виробництва формує інститути, які призначені для його підтримки, а ефективність впливу на розвиток того чи іншого виду діяльності залежить від їх складу, механізмів взаємодії із регіональною владою та між собою, системи заохочення та місця в ієрархії регіональної інноваційної системи (РІС) (рис.2).



↔ двосторонні виробничі зв'язки ; – – → фінансові потоки; ← управлінські зв'язки.

Рис.2 - Концептуальна модель управління інформаційними та грошовими потоками у Регіональній інноваційній системі (розроблено автором).

РІС представляє собою територію концентрації системоутворюючих елементів, що забезпечують інноваційну діяльність та розвиток коопераційних зв'язків, а мережева взаємодія підтримується завдяки властивості регіональної інноваційної системи створювати кластери та розвивати регіональні міжгалузеві зв'язки. Інституційні особливості РІС - це процес, що може управлятись та який залежить від здатності органів регіональної влади сформувати привабливі умови для функціонування промислового виробництва із зростаючою віддачею, спрямувати дію інститутів на прискорення інноваційних процесів та забезпечити ефективну координацію мере-

жевої взаємодії інститутів із владою, бізнесом і наукою. Управління таким складним об'єктом, що представляє собою регіон, потребує наявність багатьох функцій : законодавчих, розпорядницьких, координаційних, стимулюючих, регулюючих, фінансових, контролінгу. Ефективне управління такими великим соціально-економічними системами потребує використання оціночних, аналітичних і інших, специфічних для регіону функцій. Такими характерними функціями визначено аналіз зазначених вище блоків РІС, оцінка умов створення та функціювання міжгалузевих зв'язків, оцінка масштабів залучення підприємств та закладів науки до участі у коопераційних зв'язках, оцінка ефективності міжгалузевих зв'язків для регіону та для окремих учасників. У межах такого підходу розроблена модель управління РІС, що зображена на рис.2 Вона відображує організаційно - управлінські та економічні відносини, що характеризують форми взаємозв'язку блоків та підсистем РІС. Концептуальна модель управління регіональною інноваційною системою характеризує ієрархічні зв'язки у системі управління, форми взаємозв'язків та визначає направленість інформаційних та фінансових потоків у процесі соціально-економічного розвитку регіону. Формування регіональних інноваційних систем повинно здійснюватись із урахуванням індивідуальних особливостей соціально-економічної структури регіону та спрямовано на створення нових інноваційних інститутів, які підтримують зв'язки між усіма учасниками інноваційного процесу. З іншого боку, регіони, володія певною самостійністю та відкритістю, незалежно вистроюють свої партнерські відносини на міжрегіональному рівні та встроюються у глобальні ланцюги створення коштовності.

Висновки. 1. Теорія автоматизованого електромеханічного приводу є базовою у становленні мехатроніки. 2. Автоматизовані електромеханічні приводи визначають напрями і темпи науково-технічного прогресу у розвитку майже всіх галузей економіки, і , в першу чергу, у машинобудуванні та станко інструментальній промисловості. 3. Розвиток галузі залежить від промислової політики, що сформована у країні. Вона повинна базуватись на видах діяльності із зростаючою віддачею. Такий підхід повинен бути положений у основу нової промислової політики. 4. Розвиток електроприводів не може здійснюватись відокремлено від машинобудування, а темпи їх зросту та удосконалення повинні здійснюватись випереджаючими темпами. 5.Слід розробити програму розвитку галузі де виробництва. Це дасть змогу запобігти банкрутства чисельних підприємств машинобудування та створити умови для розвитку малого та середнього бізнесу на базі подвійних технологій ВПК. Така практика сприятиме створенню нових робочих місць, технологічному ре інжинірингу виробничих підприємств та підвищенню їх конкурентоспроможності.

Список літератури. 1. Босинзон М. А. Особенности применения современных электродвигателей в приводах станков и роботов. М.: ВНИИТЭМР, 1987. 26 с. **2.** Весткемпер Э. Введение в организацию производства : учеб.пособие/ Э.,Весткемпер, М. Декер, А.И.Г рабченко и др.:пер.с нем.:под общей ред. А.И. Грабченко.-Харьков: НТУ «ХПИ».2008-376с.-на рус.яз. **3.** Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных стстем.// Мехатроника. 2000. - №1. - с. 5-10. **4.** Экономическая эффективность многоцелевых станков с линейными двигателями. Beyer J. Niedrige Sruckkosten bei Linearmotorbear Beitungszentren.// Werkstatt und Beitrib. 1998. - 131, №6. - 519-524. **5.** Босинзон М. А. Применение регулируемых электроприводов в технологическом оборудовании для гибких производственных систем. М.: г1. ВНИИТЭМР, 1987. 50 с. **6.** Андреев Г.И., Босинзон М.А., Кондриков А.И. Электроприводы главного движения металлообрабатывающих станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1980. - 152 с. **7.** Райнерт Э.С. Как богатые страны стали богатыми, и почему бедные страны остаются бедными. М.: Издательский дом ГУ-ВШЭ. Серия: Экономическая теория.: 2011. – 382 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:http://institutiones.com/strategies/2039-kakoj-dolzhna-byt-ekonomi ches kaya-politika.html **8.** Мехович С. А. Формирование региональных межотраслевых связей на основе концепции технологического реинжиниринга: монография / Мехович С. А., – Харьков: Вір овець А. П. 2013. – С. 360. **9.** Ю.П. Пахомов. Интеграция и модернизация: что важнее для Украині и России?-Тенденция.17 июля 2007 г.

Bibliography (transliterated): 1. Bosinzon M.A.Osobennosty preymeneniya sovremennyx elektrodvigateley v prevodax stankov I robotov.M:VNIITEMR,1987,26s. **2.** Vestkemper E. Vvedeniye v ordanizatsiu proizvodstva. Uthebnoye posobiye . per. s nem. pod obthey redaktsiey A.I.Grabthenko-Kharkov,NTU "HPI",2008-376 s., rus.yaz. **3.**Printsipy postroyeniya I isovremenniye tendentsiy razvitiya mehatronnih system.//Mehatronika.2000.-s.5-10. **4.** Ekonomitheskaya effektivnost mnogotselevih stankov s lyneynimi dvigatelyamy. Beyer J. Niedrige Sruckkosten bei Linearmotorbear Beitungszentren.// Werkstatt und Beitrib. 1998. - 131, №6. - 519-524. **5** /Bosinzon M.A/ Primeneniye reguliruyemih elektroprivodov v tehnologitheskom oborudovaviyi dlya gibkih proizvodstvennih system.M.t.1.VNIITEMR,1987.50 s. **6.** Andreev G.I.,Bosinzon M.A.,Kondrikov A.I.Elektroprivodi glavnogo dvigeniya metalloobrabativayushih stankov s THPU.M. Mashinostroyeniyem1980-152 s. **7.** Raynert T.S. Kak bogatiye strany staly bogatimi I ponhemu bedniye straine ostayutsya bednimi. M.: Izd.dom.GU VSHE.Seriya :Ekonomitheskaya teoriya:2011.-382 s. Regim doatupu : http://institutiones.com/strategies/2039-kakoj-dolzhna-byt-ekonomi ches kaya-politika.html **8.** Mehovyth S.A. Formirovaniye redionalnih megotraslevih svyazey na osnove tehnologitheskogo reinginiringa:Monografiya-Kharkov. 2013.-s360. **9.** U.P.Pahomov.Integransiya I modernizatsiya: nhto vagnee dlya \ukraini I Rossiyi? –Tendennaiya.17 iulya 2007.

Надійшла (04.09.2015)

До 75-річчя академіка НАН України Геннадія Григоровича Півняка

23 жовтня 2015 року виповнюється 75 років ректору Національного гірничого університету, двічі лауреату Державної премії України в галузі науки і техніки, лауреату премії НАН України ім. С.О. Лебедєва, доктору технічних наук, професору, академіку НАН України Геннадію Григоровичу Півняку.

Талановитий учень професора С.А. Волотковського, у вересні 1982 р. був призначений ректором Дніпропетровського гірничого інституту. Сам він до цього не прагнув і бачив своє головне покликання в науці. Відтоді минуло понад три десятиліття, а ректор – академік Г.Г. Півняк активно веде наукові дослідження разом зі своїми учнями, упевнено керує університетом, який увійшов до числа провідних у країні й визнаних у світі.

Народився Г.Г. Півняк 23 жовтня 1940 року в місті Олександрія Кіровоградської області, в сім'ї вчителів, людей високої духовної культури й інтелігентності. Це, безумовно, благотворно вплинуло на виховання й становлення майбутнього вченого, педагога та керівника.

У 1981 році в Інституті електродинаміки Академії наук УРСР Геннадій Григорович успішно захистив докторську дисертацію по двом науковим спеціальностям. Результати його досліджень було високо оцінено Академією наук України, зокрема президентом НАН України, академіком Б.Є.Патоном та академіком А. К. Шидловським.

Г.Г.Півняк – відомий вчений у галузі електроенергетики та стійкості геотехнічних систем. Засновник наукової школи гірничої та металургійної електроенергетики. Його дослідження і розробки з фізико-технічних проблем ефективного використання енергетичного потенціалу геотехнічних систем отримали міжнародне визнання. Він авторитетний спеціаліст у сфері паливно-енергетичних ресурсів, раціонального природокористування, стійкого розвитку.

Творчі зв’язки НТУ «Харківський політехнічний інститут» та Національним гірничим університетом у науково-технічній сфері завжди були результативними, що свідчить про високий інтелектуальний потенціал наших вишів.

Ми пам’ятаємо авторитетне висловлювання президента Національній академії наук України Б.Є.Патона: «Національний гірничий університет – елітарний науково-освітній центр. Відзначу, що гірничий є фундатором провідних наукових інститутів Національної академії наук України. Колектив НГУ вносить значний вклад в економіку країни, зміцнення її інтелектуального потенціалу, підтримує і розвиває духовні цінності українського народу. І в цьому – велика заслуга ректора, академіка НАН України Г.Г. Півняка, наукові праці якого визнані у світі. Завдяки таким вищим навчальним закладам Україна виходить на інноваційний шлях розвитку і посяде належне місце у світовій спільноті».

Президія
Української асоціації інженерів-електриків

Садовой Александр Валентинович (к 70-летию со дня рождения)

Доктор технических наук, профессор Садовой Александр Валентинович родился 25 февраля 1945 г. в г. Заульба Восточно-Казахстанской области.

В 1960 году после окончания восьмого класса общеобразовательной школы работал токарем Уманского завода «Мегомметр» и продолжал обучение в вечер-ней школе рабочей молодежи, после окончания которой с серебряной медалью в 1962 г. поступил в Киевский политехнический институт на энергетический факультет, после окончания которого в 1967 г. получил квалификацию инженера - электромеханика по специальности электропривод и автоматизация промыш-ленных установок.

После окончания института с 1967 по1968 г. работал инженером - конструк-тором Уманского завода «Мегомметр». С 1968 по 1970 г. служил в Советской Армии в должности командира взвода – начальника электротехнической стан-ции.

Научно-педагогическую деятельность начал в 1970 г., работая руководителем группы инженеров Центральной научно-исследовательской лаборатории сварки – филиала Киевского института электросварки им. Е.О.Патона, и по совместительству – старшим преподавателем Коммунарского горнометаллургического института.

С 1972 по 1985 год на преподавательской работе ассистентом, старшим преподавателем, доцентом кафедры электрооборудования промышленных пред-приятий Коммунарского горнометаллургического института. В 1980 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Синтез и исследование систем оптимального управления тиристорным элек-троприводом», а в 1983 г. ему присвоено ученое звание доцента кафедры элек-трооборудования промышленных предприятий.

С 1985г. работает в Днепродзержинском государственном техническом уни-верситете доцентом кафедры электрооборудования промышленных предпри-ятий. В 1993 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: «Синтез и исследование оптимальных по точности систем управления электроприводами с низкой чувствительностью к широкому спектру дестабилизирующих факторов» и был переведен на должность профес-сора той же кафедры.

В 1996 г. после присвоения ученого звания профессора кафедры электро-оборудования промышленных предприятий возглавил эту кафедру. С 1998 г. по настоящее время работает проректором Днепродзержинского государственного технического университета по научной работе.

Преподает дисциплины: теория автоматического управления; системы оптимального управления электроприводами; системы управления прецизионными электроприводами; современные методы синтеза систем управления, методоло-гия и организация научных исследований.

Основное направление научно-исследовательских работ: оптимальное управление электромеханическими системами, технологическими процессами и комплексами, их энергоэффективность и проблемы энергосбережения.

Опубликовал более 300 научных работ, в том числе 5 монографии, учебник и 5 учебных пособий для студентов ВУЗов. Является автором 53 изобретений.

Основные научные труды: монографии «Системы управления следящими приводами антенных установок», 1990 г.; «Системы оптимального управления прецизионными электроприводами», 1996 г.; «Релейные системы оптимального управления электроприводами» 2011г.; «Научные основы энергоресурсосбереже-ния с позиций эксерго- и энергоэффективного анализа физико-технологических систем», 2013 г.; «Новое в моделировании и исследовании электромеханических систем станов холодной прокатки», 2014 г.; учебник «Моделирование электроме-ханических систем» 2001г.; учебные пособия «Синтез систем оптимального управ-ления электроприводами», 1990 г.; «Моделирование электромеханических систем», 1999 г. «Особливості енергозбереження в галузях економіки», 2012 г.; «Теплотехнічні процеси та установки», 2013г.; «Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем», 2014 г.

Подготовил одного доктора и десять кандидатов технических наук.

Президиум
Украинской ассоциации инженеров-электриков

Барский Виктор Алексеевич (к *80-летию со дня рождения*)

17 июня 2015 года исполнилось 80 лет со дня рождения и 58 лет инженерной и научной деятельности почётного члена Украинской Ассоциации инженеров-электриков, известного специалиста в области электропривода и преобразовательной техники, доктора технических наук, профессора, члена специализированного ученого совета по защите докторских диссертаций Д.64.050.04, работающего в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», Ассоциации «Автоматизированный электропривод» России, Института инженеров-электриков США (IEEE), главного конструктора – Председателя Правления Международного Консорциума «Энергосбережение», Барского Виктора Алексеевича.

На протяжении более полувека юбиляр активно участвует в исследованиях и разработках на наиболее актуальных направлениях развития электропривода, преобразовательной техники, автономных энергоустановок и смежных областей. Он внес существенный вклад в создание и производство в больших масштабах новой электротехнической продукции на протяжении 4-х эпох развития электромеханических систем: с контактными, электромашинными, тиристорными и транзисторными преобразователями.

За последние 5 лет под его непосредственным руководством были выполнены работы по созданию, изготовлению и вводу в эксплуатацию не имеющего аналогов в Европе уникального комплекса оборудования для испытания электрических машин локомотивов на Новочеркасском электровозостроительном заводе, станции для испытания электрических машин в компании «Энергопром» (г. Кривой Рог), поставлено и введено в эксплуатацию более 600 комплексов оригинальных климатических установок типа ККЛ для локомотивов, разработаны, изготовлены и испытаны новые тяговые многоканальные тиристорные выпрямители типа ВУТГ для магистральных тепловозов типов 2ТЭ116У и (2-3)ТЭ25КМ, более 40 энергосберегающих систем ЭКО-3 в котельных средней и большой мощности в Украине и России, создана серия устройств плавного пуска типа РУПП для приводов турбомеханизмов, имеющая существенные преимущества перед аналогами, введены в эксплуатацию образцы для двигателей мощностью до 8 000 кВт, разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию 4 привода шахтных подъёмных машин большой мощности и другое оборудование.

В настоящее время под руководством В.А. Барского разрабатываются новые электромеханические системы на основе электрических машин с пассивными роторами для транспорта и газотурбинных электростанций, новые приводы со встроенными накопителями энергии для различных отраслей, новые распредустройства, продолжаются работы по внедрению ранее разработанного оборудования.

Автор более 300 научных трудов, изобретений и патентов В.А. Барский пользуется заслуженным уважением специалистов.

Президиум
Украинской ассоциации инженеров-электриков

А Н Н О Т А Ц И И

Социально-экономические проблемы электропривода. Учебный процесс

Клепіков В.Б.
До 85-річчя кафедри «автоматизовані електромеханічні системи» 11
Дана коротка інформація з історії кафедри до 2005 р., а також описані основні результати діяльності кафедри по підготовці кадрів, в області учбово-методичної й організаційної роботи, наукової діяльності й розвитку матеріально-технічної бази.

Клепиков В.Б.
К 85-летию кафедры «автоматизированные электромеханические системы»
Дана краткая информация из истории кафедры до 2005 г., а также описаны основные результаты деятельности кафедры по подготовке кадров, в области учебно-методической и организационной работы, научной деятельности и развития материально-технической базы.

Klepikov V.
To 85 anniversary of the chair «automated electromechanical systems»
The brief information from history of chair till 2005 is given, and the basic results of chair activity on a educational, methodical and organizational work, scientific activity and development of material base are described.

Сокол Є.І., Гриб О.Г., Бєлов Н.С., Гапон Д.А., Шевченко С.Ю. 18
Мережево-центричне диспетчерське управління в електроенергетиці
Для укріплення національної конкурентноздатності в умовах європейської енергетичної інтеграції необхідно підприємствам електроенергетичної галузі провести впровадження мережево-центричного управління рішень для розвитку енергоінфраструктурних вузлів на базі «Цифрова підстанція».

Сокол Е.І.,Гриб О.Г., Белов Н.С., Гапон Д.А., Шевченко С.Ю.
Сетецентрическое диспетчерское управление в электроэнергетике
Для укрепления национальной конкурентоспособности в условиях европейской энергетической интеграции необходимо предприятиям электроэнергетического комплекса провести внедрение сетецентрического управления решений для развития энерго-инфраструктурных узлов на базе «Цифровая подстанция»

Sokol E., Gryb O., Bielov N., Gapon D., Shevchenko S.
Network-centric dispatch control in the electric power
To strengthening of national competitiveness in terms of integration of European energy companies must conduct electricity sector in implementation of network-centric control solutions for the development of energy infrastructure nodes at base the "Digital Substation".

Родькін Д. Й., Чорний О. П.
Історія створення та досвід роботи Кременчуцької школи електроприводчиків 22
У статті викладається короткий аналітичний матеріал, що стосується самої молодої школи електроприводчиків України в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського. Показано, що за короткий термін колектив кафедри за рахунок правильної організації навчальної, методичної та наукової роботи досягнув результатів, які поставили Кременчуцьку школу приводчиків в число лідерів в Українській вищій школі.

Родькин Д. И., Черный А. П.
История создания и опыт работы Кременчугской школы электроприводчиков
В статье излагается краткий аналитический материал, касающийся самой молодой школы электроприводчиков Украины в Кременчугском национальном университете имени Михаила Остроградского. Показано, что за краткий срок коллектив кафедры за счет правильной организации учебной, методической и научной работы добился результатов, поставивших Кременчугскую школу приводчиков в число лидеров в Украинской высшей школе.

Rodkin D., Chornyi O.
Foundation history and working experience of elektrodrivers Kremenchug school
The article presents a brief analytical material of the Ukraine youngest school elektrodrivers in Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. It is shown that in the short term the department staff by the correct organization of educational, methodical and scientific work has achieved results that have put Kremenchug school drivers among the leaders in the Ukrainian higher education.

Барский В.А.
международный консорциум «Энергосбережение» (www.mke.com.ua) – 20 лет разработок и внедрения нового электрооборудования для различных отраслей.....29
Главной предпосылкой создания Консорциума было желание специалистов – исследователей, разработчиков и производителей электротехнического и приборостроительного направлений продолжать заниматься своим делом в сложных условиях начала 90-х годов. Непосредственным поводом стал интерес ведущих предприятий и организаций России, Украины, Белоруссии к созданным в Харькове в 1991..93 гг. первым «отечественным» преобразователям частоты (ПЧ) на IGBT с микропроцессорным управлением. Создание в январе 1995 г. МКЭ позволило организовать сотрудничество всех заинтересованных предприятий «по горизонтали». В итоге, уже в 1996 г. началось производство ПЧ на IGBT в России и Белоруссии до 100 кВт, а позже в Украине – до 315, 1000 кВт и более, в том числе – для тяжелых условий эксплуатации. Предприятие выступает и как поставщик услуг по исследованиям и разработке методик, оборудования и систем для отечественных и зарубежных заказчиков. В статье перечислены направления возможного предоставления услуг.

Барський В.О.
Міжнародний консорціум «енергозберігання» (www.mke.com.ua) - 20 років розробок і впровадження нового електрообладнання для різних галузей
Головною метою створення Консорціуму було бажання фахівців - дослідників, розробників і виробників електротехнічного і приладобудівного напрямів продовжувати займатися своєю справою в складних умовах початку 90- х років.
Безпосереднім приводом була зацікавленність провідних підприємств і організацій Росії, України, Білорусії до створення в Харкові в 1991..93 рр. перших "вітчизняних" перетворювачів частоти (ПЧ) на IGBT з мікропроцесорним управлінням. Ство-

рення в січні 1995 р. «МКЭ» дозволило організувати співпрацю усіх зацікавлених підприємств "по горизонталі". Внаслідок чого, вже в 1996 р. почалося виробництво ПЧ на IGBT в Росії і Білорусії до 100 кВт, а пізніше в Україні - до 315, 1000 кВт і більше, у тому числі – для важких умовах експлуатації. Підприємство виступає і як постачальник послуг з досліджень і розробки методик, обладнання та систем для вітчизняних і зарубіжних замовників. У статті перераховані напрямки можливого надання послуг.

Barskiy V.

The «Energosberezheniye» international consortium (www.mke.com.ua) - 20 years of development and introduction of new electric equipment for various branches

The desire of experts, researchers, developers and producers of the electrotechnical and instrument-making equipment to continue the business in difficult conditions of the beginning of the 90th years was the main prerequisite of creation of the «Energosberezheniye» international consortium (MKE).

Interest of leading enterprises and organizations of Russia, Ukraine, Belarus in the first "domestic" IGBT frequency converters with microprocessor control created in Kharkov in 1991-1993 years became a direct prerequisite. MKE created in January, 1995 allowed to organize cooperation of all interested enterprises. As a result, in 1996 production of IGBT frequency converters with power up to 100 kW in Russia and Belarus began. Later production of frequency converters with power up to 315, 1000 kW and more in Ukraine began. Production of frequency converters for severe operating conditions began. MKE also renders services in researches and development of methods, equipment and systems for domestic and foreign customers

Аніщенко М.В., Тимощенко А.В., Ткаченко А.О.

Створення на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» віддаленої лабораторії 33

В статті наведена структурна схема та принцип побудови віддаленої лабораторії з використанням обладнання компанії National Instruments. Показані результати виконання лабораторних робіт з віддаленим керуванням.

Анищенко Н.В.,Тимощенко А.В., Ткаченко А.А.

Создание на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» удаленной лаборатории

В статье приведена структурная схема и рассмотрен принцип построения удаленной лаборатории с использованием оборудования компании National Instruments. Показаны результаты выполнения лабораторных работ с удаленным управлением.

Anishchenko N., Timoshchenko A., Tkachenko A.

Creation on the department "Automated electromechanical systems" NTU "KhPI" the remote lab

In the article shows the block diagram and reviewed the principle of building a remote laboratory using the equipment from National Instruments Company. Shows the execution results of laboratory work with a remote control.

Мещанінов С.К., Трикіло А.І., Копитова К.А.

Математична модель вікової періодизації тривалості життя людини 39

Запропонована математична модель періодизації життя людини, яка заснована на використанні чисел Фібоначчі та пропорції «золотого перетину». Отримано формули для визначення початкового та кінцевого віку людини для періодів та етапів всередині періодів, які відповідають пропорції «золотого перетину», на основі яких може бути створена прикладна комп'ютерна програма для аналізу та контролю психофізіологічного стану людини на любому етапі його життєвого циклу та з урахуванням індивідуальних особливостей.

Мещанинов С.К., Трикило А.И., Копытова Е.А.

Математическая модель возрастной периодизации продолжительности жизни человека

Предложена математическая модель периодизации жизни человека, основанная на использовании чисел Фибоначчи и пропорции «золотого сечения». Получены формулы для определения начального и конечного возраста человека для периодов и этапов внутри периодов, соответствующие пропорции «золотого сечения», на основе которых может быть создана прикладная компьютерная программа для анализа и контроля психофизиологического состояния человека на любом этапе его жизненного цикла и с учетом индивидуальных особенностей.

Meshaninov S., Trikilo A., Kopytova K.

Mathematical model of the human`s life periodisation

The mathematical model of the human's life periodisation was suggested, which is based on Fibonacci sequence and the "golden section" proportion. Formulas were found for determining initial and final human's age for periods and phases into the periods, which correspond to the "golden section" proportion. On these data the computer software can be created for analyze and control psychophysiological state of the human at any phase of life cycle considering his individual characteristics.

Теоретические вопросы автоматизированного электропривода

Пересада С. М., Благодір В. О.

Бездавачеве керування в системах на основі машини подвійного живлення: короткий аналітичний огляд.....44

В роботі проведено аналіз представлених в літературі бездавачевих алгоритмів керування машиною подвійного живлення (МПЖ). Основними відмінностями в існуючих методах оцінювання кутового положення (швидкості) ротора МПЖ є точність розрахунку, чутливість до зміни параметрів, що входять в математичну модель спостерігача, особливості роботи в певних областях механічної характеристики асинхронного двигуна та в певних режимах роботи електромережі. Підходи до оцінювання можна поділити на основні три групи: розімкнені алгоритми, адаптивні методи та методи з введенням високочастотних сигналів. Проведений аналіз свідчить, що відомі методи ґрунтуються на суттєвих припущеннях, мають обмеження у використанні і потребують подальших досліджень.

Пересада С. М., Благодир В. О.

Бездатчиковое управление в системах на основе машины двойного питания: аналитический обзор

В работе проведен анализ представленных в литературе бездатчиковых алгоритмов управления машиной двойного питания (МДП). Основными отличиями в существующих методах оценки углового положения (скорости) ротора МДП является точность расчета, чувствительность к изменению параметров, входящих в математическую модель наблюдателя, особенности работы в определенных областях механической характеристики асинхронного двигателя и в определенных режимах работы электросети. Подходы к оценке можно разделить на три основные группы: разомкнутые алгоритмы, адаптивные методы и

методы с введением высокочастотных сигналов. Проведенный анализ свидетельствует, что известные методы основываются на существенных предположениях, имеют ограничения в использовании и требуют дальнейших исследований.

Peresada S., Blagodir V.

Sensorless control in systems based on doubly fed induction machine: short analytical review

The paper presents analyse of presented in the literature sensorless control algorithms of doubly fed induction machine (DFIM). The main differences in existing methods of DFIM rotor angular position (speed) observation are calculation accuracy, sensitivity of the observer mathematical model parameters variation, especially in specific areas of the mechanical characteristic of the induction motor and specific modes of power supply. Approaches of the observation can be divided into three main groups: open-loops algorithms, adaptive methods and high-frequency signals injection methods. The analysis shows that the existing methods are based on significant assumptions, are limited in use and need further research.

Островерхов М.Я., Пижов В.М.

Оптимізація законів керування вентильно-індукторним електроприводом 48

За своєю природою вентильно-індукторний електродвигун є взаємозв'язаним об'єктом керування. При обчисленні параметрів схеми заміщення двигуна виникають похибки, що обумовлені допущеннями відповідної методики. Внаслідок нагрівання чи зміни кінематики механізму параметри електродвигуна та електропривода змінюються. Вказані причини обумовлюють координатні та параметричні збурення, що призводять до погіршення заданої якості керування електроприводом. Метою роботи є підвищення якості керування вентильно-індукторним електроприводом в умовах невизначеності математичної моделі електропривода.

Островерхов Н.Я., Пыжов В.М.

Оптимизация законов управления вентильно-индукторным электроприводом

По своей природе вентильно-индукторный электродвигатель является взаимосвязанным объектом управления. При исчислении параметров схемы замещения двигателя возникают погрешности, обусловленные допущениями соответствующей методики. При нагревании или изменения кинематики механизма параметры электродвигателя и электропривода меняются. Указанные причины обусловливают координатные и параметрические возмущения, приводящие к ухудшению заданного качества управления электроприводом. Целью работы является повышение качества управления вентильно-индукторным электроприводом в условиях неопределенности математической модели электропривода.

Ostroverkhov N., Pyzhov V.

Optimization of control laws of switched reluctance electrical drive

Naturally, a gated inductor-type electrical motor is an interrelated control object. Miscalculations during identification of the parameters of the equivalent circuit of the electrical motor can be caused by assumptions used in an applied methodology. Heating or changes of the kinematics may also result in changes of parameters of the electrical motor and electrical drive. These reasons determine coordinate and parametric disturbances which lead to worsening the specified quality of the electrical drive control. Purpose of this study is to analyse the possibility to improve the quality of control of the gated inductor-type electrical drive under the uncertainties in a mathematical model.

Бур'ян С.О., Печеник М.В., Боднар Д.О.

Оптимальне керування насосною установкою з варіацією параметрів гідравлічної мережі 54

В даній статті розроблено оптимальний регулятор насосної установки, який враховує варіацію параметрів гідравлічної мережі. Обрано критерій оптимальності на основі технологічної та енергетичної умов. Використовуючи обраний критерій, на основі двох нейронних мереж розроблено регулятор, який максимізує коефіцієнт корисної дії насосної установки та, одночасно з цим, мінімізує відхилення тиску від заданого значення. Керування насосною установкою відбувається за рахунок зміни швидкості та пошуку оптимальної робочої точки для заданих параметрів.

Для перевірки роботи регулятора проведено моделювання за допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink. У першому досліді на вхід системи подано плавний сигнал зміни гідравлічного опору, а в другому досліді робота розробленої системи з оптимальним регулятором порівнювалась з системою стабілізації тиску. Отримані результати показали, що, при використанні оптимального регулятора, ККД системи підвищується в середньому на 0.7-1%.

Бурьян С.О., Печеник Н.В., Боднар Д.О.

Оптимальное управление насосной установкой з вариацией параметров гидравлической сети

В данной статье разработан оптимальный регулятор насосной установки, учитывающий вариацию параметров гидравлической сети. Выбран критерий оптимальности на основе технологического и энергетического условий. Используя выбран критерий, на основе двух нейронных сетей разработан регулятор, который максимизирует КПД насосной установки и, одновременно с этим, минимизирует отклонение давления от заданного значения. Управление насосной установкой происходит за счет изменения скорости и поиска оптимальной рабочей точки для заданных параметров.

Для проверки работы регулятора проведено моделирование с помощью программного обеспечения Matlab/Simulink. В первом опыте на вход системы подано плавный сигнал изменения гидравлического сопротивления, а во втором опыте работа разработанной системы с оптимальным регулятором сравнивалась с системой стабилизации давления. Полученные результаты показали, что, при использовании оптимального регулятора, КПД системы повышается в среднем на 0.7-1%.

Buryan S., Pechenyk N., Bodnar D.

Optimal control of pumping unit with hydraulic network parameters variation

In this article the optimal regulator pumping unit that accounts for variation in hydraulic parameters of the network is designed. An optimal criterion based on technology and energy conditions was chosen. Using selected criteria, based on two neural networks, the controller was developed that maximizes the efficiency of the pumping unit and, at the same time, minimizes pressure deviation from the set value. Manage pumps is due to speed change and the search for the optimum operating point for the given parameters.

To test the regulator conducted using modeling software Matlab/Simulink. In the first experiment the input system signal presents a smooth change of hydraulic resistance, and in the second experiment system with optimal regulator against a stabilization system pressure is developed. The results showed that the use of optimal regulation system increases efficiency by an average of 0.7-1%.

Волянський Р. С., Садовой О. В.

Синтез керуючого впливу для електромеханічних об'єктів з невідомими параметрами 60

Шляхом аналізу рівнянь руху узагальненого електромеханічного об'єкта виконано синтез керуючого впливу, подача якого на вхід об'єкта забезпечує компенсацію його інерційності та внутрішніх зворотних зв'язків при неповній інформації про зна-

чення параметрів об'єкта керування. Встановлено, що вказаний керуючий вплив дозволяє реалізувати в замкненій системі ковзний режим заданого порядку та забезпечити її інваріантність до зміни параметрів. Амплітуда синтезованого керуючого впливу визначається на основі наперед заданих інтервалів параметрів об'єкта управління за допомогою інтервальних методів.

Волянский Р. С., Садовой А. В.

Синтез управляющего воздействия для электромеханических объектов с неизвестными параметрами

Путем анализа уравнений движения обобщенного электромеханического объекта выполнен синтез управляющего воздействия, подача которого на вход объекта обеспечивает компенсацию его инерционностей и внутренних обратных связей при неполной информации о значениях параметров объекта управления. Установлено, что указанное управляющее воздействие позволяет реализовать в замкнутой системе скользящий режим заданного порядка и обеспечить ее инвариантность к изменению параметров. Амплитуда синтезированного управляющего воздействия определяется на основе наперед заданных интервалов параметров объекта управления при помощи интервальных методов.

Volyanskiy R., V Sadovoy A.

The synthesis of control actions for electromechanical objects with unknown parameters

By analyzing the motion equations of the generalized electromechanical object is synthesied control action, which provides compensation for inertia and internal feedback of the control object with incomplete information about the values of its parameters. It is established that the specified control action allows to implement in a closed loop system sliding mode of a given order and to ensure its invariance to changes in parameters. The amplitude of the synthesized control action is determined on the basis of preassigned parameters of control object intervals by using interval methods.

Клепіков В.Б., Тимощенко А.В.

Комбіноване визначення буксування та юзу коліс рудникового електровозу з використанням програмованої логічної інтегральної схеми 64

В статті описується методика визначення буксування та юзу коліс рудникового електровозу по результатам аналізу пульсацій у струмі тягового електродвигуна з використанням програмованої логічної інтегральної схеми.

Клепиков В.Б., Тимощенко А.В.

Кобинированное определение буксования и юза колес рудничного электровоза с использованием программируемой логической интегральной схемы

В статье описывается методика определения буксования и юза колес рудничного электровоза по результатам анализа пульсаций в токе тягового электродвигателя с использованием программируемой логической интегральной схемы.

Klepikov V., Tymoshchenko A.

Combined determination of slipping and skidding wheels mine locomotive using field programmable gate array

The article describes the method of determining the slipping and skidding wheels mine locomotive on the traction motor current ripple analysis using field programmable gate array.

Кузнецов Б. І., Нікітіна Т. Б., Коломієць В. В., Хоменко В. В.

Дослідження впливу нелінійностей і варіації параметрів об'єкта керування на динамічні характеристики електромеханічних стежачих систем.....68

Виконано дослідження впливу нелінійностей і варіації параметрів об'єкта керування на динамічні характеристики електромеханічних стежачих систем з робастними регуляторами і з типовими регуляторами. Показано, що система з робастним регулятором має меншу чутливість по відношенню до зміни параметрів об'єкта керування в порівнянні з системою з типовими регуляторами.

Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В.

Исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем

Выполнено исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем с робастными регуляторами и систем с типовыми регуляторами. Показано, что система с робастным регулятором обладает меньшей чувствительностью по отношению к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

Kuznetsov B., Nikitina T., Kolomiets V., Khomenko V.

Research of influences of nonlinearities and plant parameter variation of electromechanical servo systems dynamic characteristics

The research of non-linearities and plant parameters variations influence on the dynamic characteristics of electromechanical servo systems with robust and with standard controls. It is shown that a robust control system has less sensitivity to changes of plant parameters compared to a system with standard controllers.

Полілов Є.В.

Щодо меж досяжності теорії автоматичного управління.....72

Вперше представлена аналітична залежність точки перегину т.зв. феномена сплеску в управлінні динамічними системами довільного порядку. Сплеск з легкістю може бути згенерований навмисне в будь-якій передавальної функції з наперед заданими порядками поліномів чисельника і знаменника, будь-якої геометрії нулів і полюсів, їх місцезнаходження щодо уявної осі, і, що особливо примітно, будь-якої амплітуди. Генерація, як, втім, і дзеркально протилежне - виключення сплеску, зводяться до примітиву зміщення радіусів середньогеометричних коренів поліномів чисельника і знаменника «генеруючої» передавальної функції. Умова (швидкі нулі) є заходом гарантованого невиникнення сплеску на будь-яких удаленнях кластерів коренів ПФ будь-якого порядку від уявної осі.

Полилов Е.В.

О границах достижимости теории автоматического управления

Впервые представлена аналитическая зависимость точки перегиба т.н. феномена всплеска в управлении динамическими системами произвольного порядка. Всплеск с лёгкостью может быть сгенерирован умышленно в любой передаточной функции с наперёд заданными порядками полиномов числителя и знаменателя, любой геометрии нулей и полюсов, их местоположении относительно мнимой оси, и, что особо примечательно, любой амплитуды. Генерация, как, впрочем, и зеркально противоположное – исключение всплеска, сводятся к примитиву смещения радиусов среднегеометрических корней

полиномов числителя и знаменателя «генерирующей» передаточной функции. Условие (быстрые нули) есть мерой гарантированного невозникновения всплеска на любых удалениях кластеров корней ПФ любого порядка от мнимой оси.

Polilov E.V.

On the boundary attainable of control theory

For the first time the analytical dependence of the so-called inflection point of splash phenomenon in dynamic systems control of arbitrary order is presented. Splash could easily be generated intentionally in any transfer function given in advance orders of the numerator and denominator $m \le n$, any geometry of zeros and poles, their location relative to the imaginary axis, and, most notably, of any amplitude. Generation, as, indeed, and the mirror opposite - exclusion splash are reduced to the primitive of geometric mean radius of the roots of the numerator and denominator offset of the "generation" transfer function. Condition (quick zero) is a measure of guaranteed non-arising splash on any remote TF clusters roots of any order $m \le n$ of the imaginary axis.

Худяєв О. А.

Математична модель руху ітераційного двоканального електропривода механізму подачі з двома гвинтовими парами.....83

Запропоновано варіант спрощеної схеми конструкції дводвигунного безредукторного механізму подачі з двома гвинтовими парами (ГП), що реалізує механічну безлюфтову передачу рухів з двома ступенями свободи. Отримано кінематичну схему й математичну модель руху (із врахуванням негативного динамічного взаємовпливу між каналами керування) навантаженого двоканального електропривода (ЕП) подачі, побудованого за ітераційним принципом на базі дводвигунного механізму подачі з двома ГП. Визначено оператори компенсувальних перехресних зв'язків (компенсаторів динамічного взаємовпливу каналів), які забезпечують повну автономність роботи каналів керування двоканального ЕП подачі з двома ГП. Показано, що оператори компенсаторів, які отримані в роботі, мають можливість їх реальної технічної реалізації. Конкретизація математичної моделі виконана стосовно моделювання сталого руху ітераційного двоканального ЕП з двома ГП і типовим налаштуванням каналів, який призначений для повздовжньої подачі робочого органу металорізального верстата моделі 24К70АФ4 у режимі механообробки (торчового фрезерування).

Худяев А. А.

Математическая модель движения итерационного двухканального электропривода механизма подачи с двумя винтовыми парами

Предложен вариант упрощенной схемы конструкции двухдвигательного безредукторного механизма подачи с двумя винтовыми парами (ВП), реализующего механическую безлюфтовую передачу движений с двумя степенями свободы. Получены кинематическая схема и математическая модель движения (с учетом негативного динамического взаимовлияния между каналами управления) нагруженного двухканального электропривода (ЭП) подачи, построенного по итерационному принципу на базе двухдвигательного механизма подачи с двумя ВП. Определены операторы компенсирующих перекрестных связей (компенсаторов динамического взаимовлияния каналов), обеспечивающих полную автономность работы каналов управления двухканального ЭП подачи с двумя ВП. Показано, что полученные операторы компенсаторов обладают возможностью их реальной технической реализации. Конкретизация математической модели выполнена применительно к моделированию установившегося движения итерационного двухканального ЭП с двумя ВП и типовой настройкой каналов, предназначенного для продольной подачи рабочего органа металлорежущего станка модели 24К70АФ4 в режиме механообработки (торцового фрезерования).

Khudiayev A.

Movement mathematical model of iterative two-channel electric drive of feed with two screw-nut pairs

Variant of the simplified diagram of two-motor reducerless feed design with two screw-nut pairs (SNP), realized mechanical backlash-free transmission of movements with two degrees of freedom is proposed. The kinematical diagram and movement mathematical model (including negative dynamic interconnection between control channels) of loaded two-channel electric drive of feed, constructed by iterative principle on basis of two-motor machine tool feed with two SNP are obtained. The operators of compensating cross connections (compensators of channels dynamic interconnection), providing full autonomy of control channels operation for the two-channel electric drive of feed with two SNP are determined. It is shown that the obtained operators of compensators have the possibility of their real technical realization. Concretization of mathematical model realized applying to the steady movement modeling of the iterative two-channel electric drive with two SNP and with standard tuning of channels, which is intended for longitudinal feed of the metal-cutting machine tool model 24K70AF4 work piece in working mode (face milling).

Чунашвили Б.М., Петросян А.М., Шавелашвили Г.В., Тугуши М.А

Улучшение коэффициента реактивной мощности технологического комплекса с групповым асинхронным электроприводом 89

Предложен способ управления устройства компенсации реактивной мощности плавного регулирования для повышения энергетических показателей технологичеслого комплекса с групповым асинхронным электроприводом путем полной компенсации потребляемой от сети реактивной мощности. При этом, учитываются потери реактивной мощности в силовом трансформаторе подстанции комплекса. Дается блок-схема разработанной системы. Предложена методика расчета параметров элементов системы.

Семіков О. В.

Комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів в електроприводі електромобіля з суперконденсаторною батареєю 93

Описано дві структури схеми електроприводу електромобіля з акумуляторною і суперконденсаторної батареями. Для них складено комп'ютерні моделі. За моделями зроблено моделювання в стандартних міських циклах руху. Отримано часові залежності струмів і напруг. Для них розраховані значення витрати електроенергії і середньоквадратичних струмів якоря, акумуляторної батареї і суперконденсаторної батареї. Результати показують зменшення витрат електроенергії на 12…23% і середньоквадратичного струму акумуляторів на 3…18% за рахунок застосування суперконденсаторні батареї. Це збільшує дальність проїзду і подовжує термін службу акумуляторів.

Семиков А. В.

Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в электроприводе электромобиля с суперконденсаторной батареей

Описаны две структуры схемы электропривода электромобиля с аккумуляторной и суперконденсаторной батареями. Для них составлены компьютерные модели. По моделям произведено моделирование в стандартных городских циклах движения. Получены временные зависимости токов и напряжений. Для них рассчитаны значения расхода электроэнергии и среднеквадратичных токов якоря, аккумуляторной батареей и суперконденсаторной батареи. Результаты показывают уменьшение расхода электроэнергии на 12…23% и среднеквадратичного тока аккумуляторов на 3…18% за счёт применения суперконденсаторной батареи. Это увеличивает дальность проезда и продляет срок службу аккумуляторов.

Semikov A. V.

Computer simulation of electromagnetic processes at the electric drive of electric vehicle with supercapacitor battery

The two structures of electric drive schemes of electric vehicle with battery and super-capacitor are described. Computer models for them is compiled. Simulation at the standard urban driving cycle by models is produced. The time dependence of currents and voltages are obtained. The values of electric energy consumption and RMS current anchors battery and supercapacitor are calculated for them. The results show a reduction of electricity consumption by 12…23% and RMS current battery by 3…18% due to the applica

Дерець О.Л., Садовой О.В.

Оптимізація за швидкодією режима «великого трикутника» релейної системи четвертого порядку методом n-і перемикань 96

На прикладі електроприводу з пружним зв'язком отримані аналітичні вирази максимального значення першої похідної швидкості та коефіцієнтів зворотних зв'язків релейної системи підпорядкованого регулювання для границь діапазону швидкості, у яких реалізується задана форма оптимальної за швидкодією перехідної траєкторії.

Дерец А.Л., Садовой А.В.

Оптимизация по быстродействию режима «большого треугольника» релейной системы четвёртого порядка методом n-і переключений

Применительно к электроприводу с упругой связью получены аналитические выражения максимального значения первой производной скорости и коэффициентов обратных связей релейной системы подчинённого регулирования для границ диапазона скорости, в которых реализуется заданная форма оптимальной по быстродействию переходной траектории.

Derets A.L., Sadovoy A.V.

Optimization in time domain of the "big triangle" operating mode of fourth-order sliding mode submissive cintrol system

Conformably to electric drive with elastic transmission was obtained analytical expressions for value of maximal velocity derivative and feedback gains for bounds of velocity range, witch provides realization of prescribed form of transient, optimal in time domain.

Петрушин В.С., Якімець А.М., Єноктаєв Р.М.

Багатоаспектне моделювання роботи регульованих асинхронних двигунів при різних законах частотного управління 101

Досліджено експлуатаційні характеристики регульованих асинхронних двигунів, як в статичних, так і в динамічних режимах з використанням математичних моделей асинхронних електроприводів с різними законами частотного керування. За допомогою запропонованих математичних моделей можливо здійснити обгрунтований вибір закону частотного управління, а також оптимізаційне проектування регульованих асинхронних двигунів для цього закону.

Петрушин В.С., Якимец А.М., Енокгаев Р.Н.

Многоаспектное моделирование работы регулируемых асинхронных двигателей при разных законах частотного управления

Исследованы эксплуатационные характеристики регулируемых асинхронных двигателей, как в статических, так и в динамических режимах с использованием математических моделей асинхронных электроприводов с различными законами частотного управления. С помощью предложенных математических моделей возможно осуществить обоснованный выбор закона частотного управления, а также оптимизационное проектирование регулируемых асинхронных двигателей для этого закона.

Petrushin V., Yakimets A., Yenoktaiev R.

Multidimensional modeling of asynchronous motors regulated under different laws frequency control

We studied the performance of the regulated asynchronous motors, both in static and dynamic modes using mathematical models of asynchronous electric c various laws frequency control. With the proposed mathematical models it is possible to implement an informed choice of the law of frequency management and optimization design of controlled asynchronous motors for the law.

Тверд М., Копчак Б. Л.

Самоналагодження параметрів регулятора швидкості електромеханічної системи з мікропроцесорним керуванням методом рою частинок 107

Запропоновано підходи до самоналагодження цифрового як дробового, так і цілочисельного ПІД-регулятора швидкості електромеханічної системи методом рою частинок за використання цілої перехідної функції бажаної стандартної дробової форми або за її характерними точками і показано їх придатність для практичної реалізації у перетворювачах частоти типу MFC710 за використання комп'ютера або спеціальної опції програмованого логічного контролера.

Запропонований алгоритм самоналагодження дробового ПІД-регулятора за використання характерних точок перехідної функції бажаної стандартної дробової форми і функції якості J прискорює цей процес і забезпечує його задовільну точність.

Тверд М., Копчак Б. Л.

Самоналадка параметров регулятора скорости электромеханической системы с микропроцессорным управлением методом роя частиц

Предложены подходы к самоналадке цифрового как дробного, так и целочисленного ПИД-регулятора скорости электромеханической системы методом роя частиц с использованием целой переходной функции желаемой стандартной дробной формы или ее характерных точек и показано их пригодность для практической реализации в преобразователях частоты типа MFC710 с использованием компьютера или специальной опции программируемого логического контроллера.

Предложенный алгоритм самоналадки дробного ПИД-регулятора путем использования характерных точек переходной функции желаемой стандартной дробной формы и функции качества J ускоряет этот процесс и обеспечивает его удовлетворительную точность.

Twerd M., Kopchak B.

Self-tuning of parameters of speed controller of electromechanical system with microprocessor control using particle swarm optimization

Approaches to self-tuning of digital fractional or integer speed PID-controllers of EMS by particle swarm optimization by using a transition function of desired standard fractional form or its characteristic points have been proposed. Their suitability for practical implementation in the frequency converters of type MFC710 by using computer or a special option of a programmable logic controller has been shown.

The proposed algorithm of fractional PID-controller self-tuning by using characteristic points of transition function of a desired standard fractional form and J quality function speeds up the process and ensures its satisfactory accuracy.

Худяєв О. А., Поленок В. В., Голобородько С. В.

Структурно-алгоритмічна схема ітераційного двоканального електропривода подачі з двома гвинтовими парами та урахуванням процесу різання 111

Отримано лінійну математичну модель процесу різання (ПР) для усталених режимів подачі робочого органу (РО) верстата при механообробці (фрезеруванні) виробу. Показано, що оператор ПР представляє собою добуток операторів сили подачі РО та швидкості пружного зміщення РО, які визначають статику й динаміку пружної механічної системи РО-різець. Отримано лінійний диференціальний оператор 3-го порядку моделі еталонного (умовного) компенсатора ПР. Побудовано структурно-алгоритмічну схему ітераційного двоканального електропривода подачі з двома гвинтовими парами та СПР-налаштуванням каналів, яка враховує як компенсацію негативного динамічного взаємовпливу каналів за навантаженням, так і компенсацію статики й динаміки ПР у режимах механообробки.

Худяев А. А., Поленок В. В., Голобородько С. В.

Структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального электропривода подачи с двумя винтовыми парами и учетом процесса резания

Получена линейная математическая модель процесса резания (ПР) для установившихся режимов подачи рабочего органа (РО) станка при механообработке (фрезеровании) изделия. Показано, что оператор ПР представляет собой произведение операторов силы подачи РО и скорости упругого смещения РО, определяющих статику и динамику упругой механической системы РО-резец. Получен линейный дифференциальный оператор 3-го порядка модели эталонного (условного) компенсатора ПР. Построена структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального электропривода подачи с двумя винтовыми парами и СПР-настройкой каналов, учитывающая как компенсацию негативного динамического взаимовлияния каналов по нагрузке, так и компенсацию статики и динамики ПР в режимах механообработки.

Khudiayev A., Polenok V., Goloborodko S.

Algorithmic diagram of iterative two-channel electric drive of feed with two screw-nut pairs And cutting process inclusion

Cutting process (CP) linear mathematical model for steady modes of machine-tool working organ (WO) feed in mechanical working (milling) of workpiece is received. It is shown that the operator of CP is an operators product of WO feed force and speed of WO elastic displacement defining statics and dynamics of elastic mechanical system WO-cutter. The 3rd order linear differential operator model of standard (conditional) compensator of CP is obtained. Algorithmic diagram of iterative two-channel electric drive of feed with two screw-nut pairs and slave adjustment of channels, including both the compensation of negative dynamic interconnection of channels by load and compensation of CP statics and dynamics in mechanical working modes is constructed.

Толочко О.І.

Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета matlab з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання simscape.....118

Розроблено віртуальні фізичні моделі дводвигунної системи «механічний вал», складеної з двох асинхронних двигунів, та двомасової електромеханічної системи на базі асинхронного двигуна в середовищі додатку simscape пакета matlab з використанням блоків електричних машин бібліотеки simpowersystems та механічних блоків бібліотеки foundation library. Наочно продемонстровано доцільність застосування таких моделей для дослідження систем керування складними електромеханічними об‘єктами на базі електродвигунів змінного струму.

Стяжкін В. П., Подейко П.П.

Оптимальне керування електротехнологічною установкою з виробництва базальтового супертонкого волокна.....124

Проведено аналіз впливу основних технологічних параметрів процесу виробництва базальтового супертонкого волокна на продуктивність установки, якість волокон і питомі енерговитрати.

Запропоновано концепцію формування ядра АСУТП виробництва БСТВ з контурами регулювання температури та рівня розплаву, температури фільерних пластин, швидкості обертання витяжних валків і FUZZY LOGIC контролером, які реалізують оптимальне управління за критеріями - продуктивності установки і якості волокна.

Розв'язана задача формування струмової системи живлення фільєр, яка нівелює негативну дію змін опору фільєри внаслідок флуктуацій, що виникають при формуванні розплаву і змін характеристик електричної мережі.

Стяжкин В. П., Подейко П.П.

Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна

Проведен анализ влияния основных технологических параметров процесса производства базальтового супертонкого волокна на производительность установки, качество волокон и удельные энергозатраты.

Предложена концепция формирования ядра АСУТП производства БСТВ с контурами регулирования температуры и уровня расплава, температуры фильерных пластин, скорости вращения вытяжных валков и FUZZY LOGIC контроллером, реализующим оптимальное управление по критериям – производительности установки и качеству волокна. Решена задача формирования токовой системы питания фильер, которая нивелирует отрицательное действие изменений сопротивления фильеры вследствие флуктуаций, возникающих при формировании расплава и изменений характеристик электрической сети.

Styazhkin V., Podeyko P.

Optimal control of electrical and technological installation of the basalt superthin fiber production

The influence of the main technological parameters of the production process basalt superthin fiber on plant productivity, the quality of the fibers and the specific energy consumption was analyzed.

The formation concept of the BSTF manufacturing process control hard core with melt temperature and melt level, nozzle plates temperature, speed suction rolls control loops and FUZZY LOGIC controller providing optimal control by productivity and fiber quality criteria was presented. The formation problem of the nozzles current system supply, which eliminates the negative effect of changes in nozzle plates resistance due to fluctuations occurring the melt formation and electrical network characteristics changes was solved.

Сінчук О. М., Михайличенко Д. А.

Дослідження перехідних процесів при запуску синхронного електричного двигуна на базі замкнутої системи регулювання.....128

При проектуванні систем запуску синхронних двигунів необхідно вирішувати задачі які пов'язані з розробкою адекватної математичної моделі двигуна, оцінкою та вибором найбільш привабливого для конкретного випадку способа формування вихідних форм кривих струму та напруги широтно-імпульсного перетворювача, синтезом системи регулювання і аналізом перехідних процесів в електротехнічному комплексі керованого пуску.

У роботі проведен аналіз перехідних процесів при керуванні пуском синхронного двигуна з використанням замкненої системи регулювання на базі моделі широтно-імпульсного перетворювача і математичної моделі синхронного двигуна яка побудована в координатах струм статора та потокощеплення статора. Також наведені графіки споживання електроенергії в системі з трапецієдальною і синусоїдальною фазною напругою.

Синчук О. Н., Михайличенко Д. А.

Исследование переходных процессов при пуске синхронного электрического двигателя на базе замкнутой системы регулирования

При проектировании систем запуска синхронных двигателей необходимо решать задачи связанные с разработкой адекватной математической модели двигателя, оценкой и выбором наиболее подходящего для конкретного слючая способа формирования выходных форм кривых тока и напряжения широтно-импульсного преобразователя, синтезом системы регулирования и анализом переходных процессов в электротехническом комплексе управляемого пуска.

В работе проведен анализ переходных процессов при управлении пуском синхронного двигателя с использованием замкнутой системы регулирования на базе модели широтно-импульсного преобразователя и математической модели синхронного двигателя построенной в координатах тока статора и потокосцепления статора. Также приведены графики потребления электроэнергии в системе с трапецеидальным фазным напряжением и в системе с синусоидальным фазным напряжением.

Sinchuk O., Mikhaylichenko D.

Study of the process of starting synchronous electric motor on the basis of closed-loop control system

When designing systems starting of synchronous motors it is necessary to solve the problems associated with the development of adequate mathematical models of the engine, evaluation and selection of the most suitable for a particular sluca the method of forming the output forms of the curves of current and voltage to pulse width converter, the synthesis system of regulation and analysis of transient processes in electrical complex managed start-up. In work the analysis of transients, control of starting of synchronous motor using a closed system of regulation based on the model of the PWM Converter and the mathematical model of the synchronous motor constructed in the coordinates of the stator current and stator flux linkage. Also shows graphs of power consumption in the system with trapezoidal phase voltage and in the system with a sinusoidal phase voltage.

Кузнецов В.В.,Ніколенко А. В., Іващенко В.П.

Розробка імовірнісної моделі цехової електричної мережі.....132

Розроблений стохастичний генератор випадкових змін напруги в електромережах промислових підприємств, що дозволяє вирішувати різні завдання енергоефективності асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором за наявності відхилень показників якості електроенергії від нормованих.

Кузнецов В.В., Николенко А. В., Иващенко В.П.

Разработка вероятностной модели цеховой электрической сети

Разработан стохастический генератор случайных изменений напряжений в электросетях промышленных предприятий, позволяющий решать различные задачи энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при наличии отклонений показателей качества электроэнергии от нормируемых.

Kuznetsov V., Nikolenko A., Ivashchenko V.

Development of structure of generator of casual changes of tensions is in electric networks of industrial enterprises

The stochastic generator of casual changes of tensions is worked out in the electric systems of industrial enterprises, allowing to decide the different tasks of energy's efficiency of asynchronous engines with a shortcircuited rotor at presence of deviations of quality's indexes of electric power from rationed.

Приймак Б. І.

Властивості асинхронного електроприводу з максимізацією момента у зоні високих швидкостей ротора.....142

Робота присвячена дослідженню властивостей векторно-керованого асинхронного електропривода з максимізацією момента на високих швидкостях ротора. Отримано аналітичний вираз для визначення межової швидкості, що розділяє зони номінального та оптимального потокозчеплення ротора. Досліджено питання залежності межової швидкості від максимального струму та впливу активного опору статора на точність її визначення.

Приймак Б. И.

Свойства асинхронного электропривода с максимизацией момента в зоне высоких скоростей ротора

Работа посвящена исследованию свойств векторно-управляемого асинхронного электропривода с максимизацией момента на высоких скоростях ротора. Получено аналитическое выражение для определения граничной скорости, что разделяет зоны номинального и оптимального потокосцепления ротора. Исследован вопрос зависимости граничной скорости от максимального тока и влияния активного сопротивления статора на точность ее определения.

Pryymak B.

Properties of induction motor drive with torque maximizing in zone of high rotor speed

The work is devoted to research of properties of vector-controlled induction motor drive with torque maximizing in high rotor speed. Is received an analytical expression for determining the boundary speed, that separates zone of nominal and optimal flux linkage of rotor. Is investigated the question of boundary speed depending on the maximum current and impact stator active resistance to the accuracy of its determination.

Морозов Д.І., Руднєв Є.С., Шевченко І.С.

Аналітичний метод розрахунку пускових опорів в ланцюзі ротора асинхронного двигуна 147

В статті математично доведено, що враховуючи нелінійність механічної характеристики асинхронного двигуна спрощеною формулою Клоса, можливо вивести зв'язок значень моментів перемикання при ступінчатому пуску. Наведені методики аналітичного розрахунку опорів для нормального і форсованого пуску враховуючи нелінійність механічних характеристик.

Морозов Д.И., Руднев Е.С., Шевченко И.С.
Аналитический метод расчета пусковых сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя
В статье математически доказано, что учитывая нелинейность механической характеристики асинхронного двигателя упрощенной формулой Клосса, возможно найти связь между значениями моментов переключения при многоступенчатом пуске. Приведены методики аналитического расчета сопротивлений для нормального и форсированного пуска учитывая нелинейность механических характеристик.
Morozov D., Rudnev E., Shevchenko I.
Analytical method of calculation starting resistance in a rotor of the asynchronous motor
In article it is mathematically proved that considering nonlinearity of the mechanical characteristic of the asynchronous motor the simplified Klos's formula, it is possible to find communication between values of the moments of switching at multistage start-up. Techniques of analytical calculation of resistance for the normal and forced start-up are given considering nonlinearity of mechanical
Сінчук О.М., Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А.
Дослідження систем бездатчикового векторного керування асинхронними двигунами з ковзним режимом при роботі на низькій кутовій швидкості 150
У статті представлено новий спосіб бездатчикової оцінки кутової швидкості та потокозчеплення ротора асинхронного двигуна для систем векторного керування. У таких системах точність непрямого виміру змінних стану залежить від точності визначення параметрів схеми заміщення машини. При роботі на низьких швидкостях зміни активного опору статора по відношенню до початкового значення, що використовується при налаштуванні системи керування, суттєво впливає на показники якості керування. Представлена система складається зі спостерігача з ковзним режимом та адаптивної системи з задаючою моделлю, що дозволяє з необхідною точністю виконувати ідентифікацію змінних стану системи. Шляхом математичного моделювання доведено стійкість системи при роботі з низькою кутовою швидкістю.
Сиінчук О.Н., Осадчук Ю.Г., Козакевич И.А.
Исследование систем бездатчикового векторного управления асинхронными двигателями со скользящим режимом при работе на низкой угловой скорости
В статье представлено новый способ бездатчиковой оценки угловой скорости и потокосцепления ротора асинхронного двигателя для систем векторного управления. В таких системах точность косвенного измерения переменных состояния зависит от точности определения параметров схемы замещения машины. При работе на низких угловых скоростях изменение активного сопротивления статора по отношению к начальному значению, которое используется при настройке системы управления, существенно влияет на показатели качества управления. Представленная система состоит из наблюдателя со скользящим режимом и адаптивной системы с задающей моделью, которая позволяет с необходимой точностью выполнять идентификацию переменных состояния системы. Путем математического моделирования доказано устойчивость системы при работе с низкой угловой скоростью.
Sinchuk O., Osadchuk Y., Kozakevich I.
Research of sensorless vector control system of asynchronous motors with sliding mode at low speed
The article presents a new method for sensorless flux and speed identification of the induction motor vector control systems. In such systems, the accuracy of the indirect measurement of the state variables is dependent on the accuracy of determining the parameters of the equivalent circuit of the machine. At low speed change in resistance with respect to the initial value that is used for control system setting significantly affects the quality of control performance. The proposed system consists of a sliding mode observer and the model reference adaptive system, which allows to perform the required accuracy to identify the state variables of the system. By mathematical modeling the stability of the system was proved at low speed.
Задорожній М.О., Задорожня І.М.
Синтез параметрів астатичної системи автоматичного керування двомасовими електроприводами з заданим ступенем стійкості та мінімальною коливальністю 155
У статті пропонується синтезувати параметри ЕМС, властивості якої можна сформувати в залежності від динамічних властивостей окремих підсистем. При реалізації заданого ступеня стійкості в ЕМС сили пружного зв'язку компенсуються силами інерційного і стає можливим реалізувати мінімальну коливальність електроприводу. При оптимальному електромеханічному зв'язку в ЕМС істотно розширюється діапазон можливих оптимальних параметрів при синтезі САУ, що полегшує реалізацію демпфуючих властивостей електроприводу при пружних механічних коливаннях.
Задорожний Н.А., Задорожняя И.Н.
Синтез параметров астатической системы автоматического управления двухмассовыми электроприводами с заданной степенью устойчивости и минимальной колебательностью
В статье предлагается синтезировать параметры ЭМС, свойства которой можно сформировать в зависимости от динамических свойств отдельных подсистем. При реализации заданной степени устойчивости в ЭМС силы упругой связи компенсируются силами инерционной и становится возможным реализовать минимальную колебательность электропривода. При оптимальной электромеханической связи в ЭМС существенно расширяется диапазон возможных оптимальных параметров при синтезе САУ, что облегчает реализацию демпфирующих свойств электропривода при упругих механических колебаниях.
Zadorozhny N., Zadorozhnyaya I.
The synthesis parameters astatic system of automatic control for two-mass electrical drive with a specified degree of stability and minimal vibration
In the article are proposes to synthesize electromechanical system properties which can be formed depending on the dynamic properties of the individual subsystems. In implementing the limit damping forces in the system are compensated by the elastic coupling inertia and it becomes possible to realize a local extremum damping action of the drive. At optimal electromechanical coupling in EMC significantly expanded the range of possible optimum parameters for the synthesis of ACS, which facilitates the implementation of the damping properties of the actuator in elastic mechanical vibrations.
Обруч І. В., Хорєва О. В.
Нова модель двомасової електромеханічної системи в узагальнених параметрах 160
У статті розглянута нова модель двомассової електромеханічної системи в узагальнених параметра. Проведена перевірка адекватності отриманих результатів

Обруч И. В., Хорева А. В.

Новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах

В статье рассмотрена новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах. Произведена проверка адекватности полученных результатов

Obruch I., Khoreva A.

New model two-mass electromechanical systems in generalized parameters

The article describes a new model of a two-mass electromechanical system with generalized parameters. Inspect the adequacy of the results

Рябенький В.М., Ушкаренко О.О., Язід Джамал Ісмаїл Аль-шайх

Модель для дослідження суднових електроенергетичних систем в аварійних і динамічних роботи 164

В статті виконано розробку моделі суднової електроенергетичної системи і дослідження її роботи в аварійних і динамічних режимах. Представлені результати моделювання короткого замикання в джерелі напруги, на лінії передачі напруги, і безпосередньо на навантаженні. Розроблена модель дозволяє вирішувати завдання визначення струмів короткого замикання і пускових струмів потужних споживачів електроенергії, наприклад, асинхронних двигунів, а також використовуватися для виконання найбільш обгрунтованого вибору заходів по оптимізації якості електроенергії.

Рябенький В.М., Ушкаренко А.О., Язид Джамал Исмаил Аль-шайх

Модель для исследования судовых электроэнергетических систем в аварийных и динамических режимах работы

В статье выполнена разработка модели судовой электроэнергетической системы и исследование её работы в аварийных и динамических режимах. Представлены результаты моделирования короткого замыкания в источнике напряжения, на линии передачи напряжения, и непосредственно на нагрузке. Разработанная модель позволяет решать задачи определения токов короткого замыкания и пусковых токов мощных потребителей электроэнергии, например, асинхронных двигателей, а также использоваться для осуществления наиболее обоснованного выбора мероприятий по оптимизации качества электроэнергии.

Ryabenkiy V., Ushkarenko A., Yazid Djamal Ismail Al-shaih

The model for investigation of ship's power systems in emergency and dynamic modes of work

In the article the model of ship's power system and research of its work in emergency and dynamic modes are considered. The results of simulation of short-circuit in the voltage source, the voltage on the transmission line, and directly in the load are represented. The developed model allows to solve the problem of determining short-circuit and inrush current major power consumers such as induction motors, and also used for the most informed choice of measures to optimize power quality.

Алексієвський Д.Г.

Визначення передавальної функції ланки аеродинамічного перетворення електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.....168

У статті розглядається нелінійна математична модель ланки аеродинамічного перетворення електромеханічної системи ВЕУ на базі аеродинамічного мультиплікування. Проводиться лінеаризація цієї моделі та визначається передавальна функція цієї ланки.

Алексеевский Д.Г.

Определение передаточной функции звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием

В статье рассматривается нелинейная математическая модель звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ВЭУ на базе схемы с аэродинамическим мультипликатором. Проводится линеаризация этой модели и определяется передаточная функция данного звена.

Alekseevskiy D.

Determination of the transfer function of the aerodynamic conversion unit of electromechanical system for wind power plant with aerodynamic multiplication

The article presents the non-linear mathematical model of aerodynamic conversion unit of electromechanical system for wind power plant of based with aerodynamic multiplication. Held linearization of the model and is determined by the transfer function of this unit.

Морозов Д.І., Шевченко І.С.

Асинхронні режими безколекторного двигуна постійного струму на базі явнополюсної синхронної машини оберненої конструкції.....173

Показано, що електромагнітний момент безколекторного двигуна постійного струму можна аналізувати аналогічно як у явнополюсної синхронної машини традиційної конструкції. В загальному випадку момент має чотири складові: асинхронний, синхронний, реактивний, динамічного гальмування. Приведені вирази для розрахунку кожної складової з врахуванням активного опору обмотки якоря. Шляхом моделювання одержано значення кожної складової моменту в асинхронному режимі і проаналізовано вплив на них частоти напруги живлення та швидкості обертання ротора.

Морозов Д.И., Шевченко И.С.

Асинхронные режимы бесколлекторного двигателя постоянного тока на базе явнополюсной синхронной машины обращенной конструкции

Показано, что электромагнитный момент бесколлекторного двигателя постоянного тока можно проанализировать по аналогии с явнополюсной синхронной машиной традиционной конструкции. В общем случае момент имеет четыре составляющие: асинхронный, синхронный, реактивний и динамического торможения. Приведены выражения для расчета каждой составляющей с учетом активного сопротивления обмотки якоря. Моделированием получено и значение каждой составляющей момента в асинхронном режиме и поведен анализ влияния на их уровень частоты питающего напряжения и скорости вращения ротора.

Morozov D., Shevchenko I.

Asynchronous modes of brushless DC motor based on the inverse design salient-pole synchronous machine

Electromagnetic torque brushless DC motor can be analyzed as the conventional design salient-pole synchronous machine. The torque has four components: asynchronous, synchronous, reactive and dynamic braking. Expressions for the determination of each component based on the active resistance of the armature winding are given. By modeling the value of each component of the time in asynchronous mode, and behavioral analysis of the impact on its level frequency of voltage and rotor speed.

Чермалих В. М., Чермалих О. В., Майданський І. Я.
Дослідження динаміки та енергетичних характеристик стрічкових конвеєрів з регульованим ЕП.....180
Розглянуті питання дослідження технологічних режимів роботи стрічкових конвеєрів із застосуванням частотно-регульованого електроприводу за допомогою комбінованої імітаційної моделі, яка містить віртуальну, структурну й математичну складові. В якості основного фактора управління прийнято оптимальне енергоспоживання конвеєрною установкою за рахунок регулювання швидкості в залежності від продуктивності конвеєра таким чином, щоб підтримувати постійним погонне навантаження на стрічці. При цьому забезпечується незмінним статичне навантаження електроприводу. Отримано діаграми протікання динамічних процесів при різних технологічних режимах роботи конвеєра, а також графічні залежності миттєвих значень енергетичних характеристик, зокрема повної споживаної потужності, її складових, коефіцієнтів потужності й корисної дії для варіантів постійної швидкості конвеєра та в разі застосування регульованого електроприводу. Надана кількісна порівняльна оцінка для обох варіантів.

Чермалых В. М., Чермалих А. В., Майданский И. Я.
Исследование динамики и энергетических характеристик ленточных конвейеров с регулируемым ЭП
Рассмотрены вопросы исследования технологических режимов работы ленточных конвейеров с применением частотно-регулируемого электропривода с помощью комбинированной имитационной модели, содержащей виртуальную, структурную и математическую составляющие. В качестве основного фактора управления принято оптимальное энергопотребление конвейерной установкой за счет регулирования скорости в зависимости от производительности конвейера таким образом, чтобы поддерживать постоянной погонную нагрузку на ленте. При этом статическая нагрузка электропривода остается неизменной. Получены диаграммы протекания динамических процессов при различных технологических режимах работы конвейера, а также графические зависимости мгновенных значений энергетических характеристик, в частности полной потребляемой мощности, ее составляющих, коэффициентов мощности и полезного действия для вариантов постоянной скорости конвейера и в случае применения регулируемого электропривода. Предоставлена количественная сравнительная оценка обоих вариантов.

Chermalyh V., Chermalyh A., *Majdanskij* ***I.***
Study of the dynamics and energy characteristics belt conveyors **with regulated electric drive**
The problems of the study of technological modes of belt conveyors with variable frequency drive using the combined simulation model, containing virtual, mathematical and structural components. As the main factor of the optimum management of energy consumption conveyor system by adjusting the speed depending on the performance of the conveyor so as to maintain a constant linear load on the belt. This provides a constant static load of the drive. Obtained flow chart of dynamic processes at different technological modes of operation of the conveyor, as well as a graph of the instantaneous values of the energy characteristics, in particular the total power consumption of its components, power factor and efficiency for constant conveyor speed, and in the case of regulated electric. Provided quantitative comparative evaluation of both options.

Чорний О.П., Сидоренко В.М., Артеменко А.М.
Режими роботи багатодвигунного тягового електроприводу кар'єрних електровозів 185
Виконаний аналіз стану механічного, електромеханічного обладнання кар'єрного електровозного транспорту, а також рейкових шляхів. Показано, що з причини відхилення параметрів тягових двигунів після ремонту, в багатодвигунному електроприводі електровоза, відбувається нерівномірний розподіл навантаження між двигунами, перегріву більш навантажених двигунів і виходу їх з ладу. Нерівномірний розподіл навантаження призводить до проковзування і боксування, в результаті чого пошкоджуються також рейкові шляхи і колеса електровоза. Розрахована ймовірність комплектації електроприводу двигунами з найбільшим розкидом параметрів. Для цього випадку виконаний розрахунок механічних характеристик багатодвигунного електроприводу. Отримано залежність розподілу навантаження між двигунами. Зроблено висновок про необхідність синтезу систем управління тяговим електроприводом з функціями самоконтролю та аналізу, що забезпечить підвищення ефективності роботи тягових електродвигунів кар'єрних електровозів.

Черный А.П., Сидоренко В.Н., Артеменко А.Н.
Режимы работы многодвигательного тягового электропривода карьерных электровозов
Выполнен анализ состояние механического, электромеханического оборудования карьерного электровозного транспорта, а также рельсовых путей. Показано, что по причине отклонения параметров тяговых двигателей после ремонта, в многодвигательном электроприводе электровоза, происходит неравномерное распределение нагрузки между двигателями, перегреву более нагруженных двигателей и выходу их из строя. Неравномерное распределение нагрузки приводит к проскальзываниям и буксованиям, в результате чего повреждаются также рельсовые пути и колеса электровоза. Рассчитана вероятность комплектации электропривода двигателями с наибольшим разбросом параметров. Для этого случая выполнен расчет механических характеристик двухдвигательного электропривода. Получена зависимость распределения нагрузки между двигателями. Сделан вывод о необходимости синтеза систем управления тяговым электроприводом с функциями самоконтроля и анализа, что обеспечит повышение эффективности работы тяговых электродвигателей карьерных электровозов.

Chornyi O., Sydorenko V., Artemenko A.
Operation mode of multimotor traction electric drive of opencast mine electric locomotives
The analysis of the state of mechanical, electro-mechanical equipment of opencast mine electric locomotive transportation and railway lines is made. It is shown that due to deviations of the parameters of traction engines after repair, the drive in multi-engine locomotive, there is an uneven distribution of the load between the engines overheat more loaded engines and their failure. The uneven distribution of the load leads to slippage, resulting in damaged rail tracks and wheels and electric. The probability of a complete set of electric motors with the largest spread of the parameters is calculated. In this case calculations the mechanical characteristics of the twin-engine drive is made. The dependence of the load between the engines is derived. The conclusion about the need for the synthesis of electric traction control systems with self-monitoring and analysis, which will improve the efficiency of electric traction electric motors of opencast mine electric locomotive is made.

Ребедак О.О., Задорожній Н.А., Верешко В.П., Бакан С.А.

Особливості роботи багатодвигунних електроприводів кранів металургійних електричних ливарних.....190
У статті розглянуто систему вирівнювання моментів багатодвигунових електроприводів кранів КМЕЛ 470+100+20т та КМЕЛ 450+100+20т Алчевського металургійного комбінату на прикладі чотирьохдвигунового механізму головного підйому. Показано недоліки класичних систем «ведучий-відомий», а також дані рекомендації для практичного застосування запропонованої альтернативної системи синхронізації. Описано особливості технічної реалізації даної системи на базі обладнання фірми Siemens.

Ребедак О.А., Задорожний Н.А., Верешко В.П., Бакан С.А.

Особенности работы многодвигательных электроприводов кранов металлургических электрических литейных
В статье рассмотрена система выравнивания моментов многодвигательных приводов кранов КМЭЛ 470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т Алчевского металлургического комбината на примере четырехдвигательного механизма главного подъема. Показаны недостатки классических систем «ведущий-ведомый», а так же даны рекомендации для практического применения предложенной альтернативной системы синхронизации. Описаны особенности технической реализации данной системы на базе оборудования фирмы Siemens.

Rebedak O., Zadorozhny N., Vereshko V., Bakan S.

The multi-electricdrive work features of the electric steel casting cranes
In the article reviewed the multi-motor drives alignment moment system of cranes CSEC 470+100+20t and CSEC 450+100+20t Alchevsk Metallurgical Plant as an example four-motor main hoist mechanism. The drawbacks of classical systems "master-slave", as well as recommendations for the practical application of the proposed alternative synchronization system. Describes the features the technical implementation of the system based on equipment from Siemens.

Клепіков В. Б., Гончар О. С., Семіцков О. В., Моисеєв О. ЬН., Касторний П. М., Тимощенко А. В., Пшеничников Д. О., Ковтун В. В., Банєв Є. Ф., Хорєва О. В.

З досвіду створення електроприводу електромобіля з суперконденсаторним накопичувачем енергії.....195
Розроблено електропривод електромобіля, що забезпечує в гальмівних режимах повернення енергії в суперконденсаторну батарею, у зв'язку з відкриттям на кафедрі «АЕМС» НТУ «ХПІ» спеціалізації «Комп'ютеризовані системи електромобілів». Створено електромобіль з вищевказаним електроприводом на базі автомобіля «Ланос» та визначено шляхи вирішення науково-технічних проблем при створенні електромобіля.

Клепиков В. Б., Гончар А. С., Семиков А. В., Моисеев А. Н., Касторный П. М., Тимощенко А. В., Пшеничников Д. А., Ковтун В. В., Банев Е. Ф., Хорева А. В.

Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии
Разработан электропривод электромобиля, обеспечивающий в тормозных режимах возврат энергии в суперконденсаторную батарею, в связи с открытием на кафедре «АЭМС» НТУ «ХПИ» специализации «Компьютеризированные системы электромобилей». Создан электромобиль с вышеуказанным электроприводом на базе автомобиля «Ланос» и определены пути решения научно-технических проблем при создании электромобиля.

Klepikov V., Gonchar A., Semikov A., Moiseev A., Kastorny P., Timoshchenko A., Pshenichnikov D., Kovtun V., Banev E., Horeva A.

From the experience of the creation of electric vehicle electric drive with supercapacitor energy storage
Electric drive which provides energy recovery into supercapacitor battery at the brake mode is designed in connection with the specialty "Computerized systems of electric vehicles" foundation on the department "AEMS" NTU "KhPI". The electric vehicle with electric drive based on "Lanos" is created and the ways of solving the science and technical problems in creating of electric vehicle are determined.

Шамардіна В.М., Лемешко С.М., Яровий Г. І.

Система вирівнювання коефіцієнтів тяги по осях тепловоза 199
У роботі на прикладі маневрового тепловоза розглядається електромеханічна система поосьового регулювання дотичній сили тяги з функцією вирівнювання коефіцієнтів тяги і превентивним підвищуванням антибоксувальних властивостей. Розроблено систему регулювання з перерозподілом потужності дизель-генераторної установки між тяговими електродвигунами (ТЕД) з урахуванням нерівномірності осьових навантажень колісних пар на рейки і розкиду електромагнітних характеристик ТЕД, що знаходяться в одній локомотивній секції. У поїзному режимі роботи визначений максимальний діапазон регулювання керованих випрямлячів тягових двигунів, які знаходяться потенційно в найбільш сприятливих і несприятливих умовах зчеплення.

Шамардина В.Н., Лемешко С.М., Яровой Г.И.

Система выравнивания коэффициентов тяги по осям тепловоза
В работе на примере маневрового тепловоза рассматривается электромеханическая система поосного регулирования касательной силы тяги с функцией выравнивания коэффициентов тяги и превентивным повышением противобоксовочных свойств. Разработана система регулирования с перераспределением мощности дизель-генераторной установки между тяговыми электродвигателями (ТЭД) с учетом неравномерности осевых нагрузок колесных пар на рельсы и разброса электромагнитных характеристик ТЭД, находящихся в одной локомотивной секции. В поездном режиме работы определен максимальный диапазон регулирования управляемых выпрямителей тяговых двигателей, находящихся потенциально в наиболее благоприятных и неблагоприятных условиях сцепления.

Shamardina V., Lemeshko S., Iarovyi G.

System of traction coefficients alignment on axles
In this work is considered individual axle traction control that is conferred the traction coefficients alignment function by the example of a switching diesel locomotive and it preventively improves anti-skid properties. It was developed control system with redistribution of the diesel-generator set power between traction motors (TM) taking into account irregularity of axles load from wheel pairs to rails and dispersion of electromagnetic characteristic TM that is in the same locomotive section. In the train operating mode was defined maximal regulation range of controlled traction rectifiers between motors, those are located in potential most auspicious and most unfavourable adhesion conditions.

Гузов Е. С., Сінчук І. О., Чорна В. О., Сменова Л. М.

Розробка безсенсорного способу захисту тягових електричних двигунів рудничних електровозів від перегріву 204
В статті наведені результати досліджень з оцінки відомих способів та методів контролю температури нагріву тягових елект-

ричних двигунів постійного струму рудничних електровозів. Показано, що не дивлячись на різноманіття систем контролю та захисту двигунів від перегріву при їх функціонуванні в комплексі тягового електрообладнання електромеханічних систем електровозів, їх застосування не завжди доречно через недосконаліть та складність конструкції та значних масогабаритних показників. Запропонований авторський спосіб безконтактного непрямого контролю температури тягових електричних двигунів постійного струму.

Гузов Э. С., Синчук И. О., Черная В. О., Сменова Л. Н.

Разработка безсенсорного способа защиты тяговых электрических двигателей рудничных электровозов от перегрева

В статье приведены результаты исследований по оценке известных способов и методов контроля температуры нагрева тяговых электрических двигателей постоянного тока рудничных электровозов. Показано, что несмотря на многообразие систем контроля и защиты двигателей от перегрева при их функционировании в комплексе тягового электрооборудования электромеханических систем электровозов, их применение не всегда приемлемо в виду несовершенства и сложности конструкции и значительных весогабаритных показателей. Предложен авторский способ бесконтактного косвенного контроля температуры тяговых электрических двигателей постоянного тока.

Guzov E., Sinchuk I., Cherna V., Smenova L.

Development sensorless way to protect the electric motor traction mine electric locomotives overheating

The article presents the results of surveys of known methods and techniques of control of heating temperature traction electric motors direct current electric mine. It is shown that despite the diversity of systems of control and protection of motors from overheating during their operation in complex electromechanical systems of electric traction locomotives, their use is not always acceptable in mind the imperfections and complexity and significant weight and dimensional parameters. The author's method for non-contact temperature indirect control of traction electric motor direct current.

Любарський Б. Г., Буряковський С. Г., Маслій Ар. С., Маслій Ан. С.

Дослідження роботи електропривода стрілочного переводу на базі лінійного двигуна.....209

У статті розглянуті питання вдосконалення конструкції електроприводу стрілочного переводу. Запропоновано математичну модель лінійного електромеханічного перетворювача, а також проведено дослідження її роботи при різноманітних характерах навантаження.

Любарский Б. Г., Буряковский С. Г., Маслий Ар. С., Маслий Ан. С.

Исследование работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя

В статье рассмотрены вопросы совершенствования конструкции электропривода стрелочного перевода. Предложена математическая модель линейного электромеханического преобразователя, а также проведено её исследование при различных характеристиках нагрузки.

Lyubarskiy B., *Buryakovskiy S.,* ***Masliy Ar., Masliy An.***

Research of the work of the electric drive turnouts based on a linear motor

The article deals with the issues of improving the structure of the electric turnouts. It proposes a mathematical model of linear electromechanical transducer and conducts her research at various characteristics of the load.

Зачепа Ю. В.

Умови гарантованого збудження асинхронного генератора автономного формованого джерела.....214

У роботі запропонований метод визначення параметрів системи стабілізації частоти обертання дизель-генераторної установки з забезпеченням умов гарантованого збудження асинхронного генератора. Отримана аналітична залежність по визначенню статичної похибки регулювання частоти обертання двигуна внутрішнього згоряння у функції параметрів асинхронного генератора і його ємнісної системи збудження дозволяє визначити мінімально-допустиме значення частоти обертання приводного двигуна, яке повинен забезпечити відповідний регулятор, для запобігання зриву генерації при підключенні навантаження.

Зачепа Ю. В.

Условия гарантированного возбуждения асинхронного генератора автономного формируемого источника

В работе предложен метод определения параметров системы стабилизации частоты вращения дизель-генераторной установки с обеспечением условий гарантированного возбуждения асинхронного генератора. Полученное аналитическое выражение по определению статической ошибки регулирования частоты вращения двигателя внутреннего сгорания в функции параметров асинхронного генератора и его емкостной системы возбуждения позволяет определить минимально-допустимое значение частоты вращения приводного двигателя, которое должен обеспечить соответствующий регулятор, для предотвращения срыва генерации при подключении нагрузки.

Zachepa Iu.

Terms guaranteed excitation induction generator autonomous formed source

In paper proposes a method for determining the parameters of the system stabilization speed diesel generator set conditions ensuring a guaranteed asynchronous generator excitation. The resulting analytical expression to determine the static error of speed control the internal combustion engine as a function of the parameters of the asynchronous generator and the capacitive excitation system to determine the minimum allowable value of the rotational speed of the drive motor, which should ensure an appropriate control, to prevent the generation breakdown by the connected load.

Ноженко В. Ю., Родькін Д. И., Ченчевой В. В.

Особливості пуску зарезонансних вібраційних машин з дебалансними віброзбуджувачами 218

Розглянуто вібраційну машину з дебалансними віброзбуджувачами зарезонансного типу. Зазначено основні недоліки такої вібромашини при прямому пуску. За допомогою математичного моделювання проведено дослідження пуску та проходження резонансної зони при використанні приводних двигунів різної потужності. Визначено закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів вібраційної машини на проходженні резонансної зони за допомогою методу планування експерименту.

Ноженко В. Ю., Родькин Д. И., Ченчевой В. В.

Особенности пуска зарезонансных вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями

Рассмотрена вибрационная машина с дебалансными вибровозбудителями зарезонансного типа. Отмечены основные недостатки такой вибромашины при прямом пуске. С помощью математического моделирования проведены исследования пуска

и прохождения резонансной зоны при использовании приводных двигателей разной мощности. Определены закономерности влияния конструктивно-технологических параметров вибрационной машины на прохождении резонансной зоны с помощью метода планирования эксперимента.

Nozhenko V., Rodkin D., Chenchevoy V.

Features zarezonansnyh start vibrating machines with debalanced vibration exciters

A vibration machine of above resonance type with unbalance exciters is examined. Marked major shortcomings such vibration machine at start. Study start and passing resonance zone when using the drive motors of different power are carried by mathematical modelling. Laws of influence design and technological parameters of vibrating machine to pass the resonance zone are defined by the method of experiment planning.

Лімонов Л. Г.

Нова серія електродвигунів змінного струму фірми сіменс 224

У статті розглянуто основні технічні та конструктивні особливості нової серії електродвигунів трифазного змінного струму. Електродвигуни нової серії можуть бути використані для регульованих частотних електроприводів різних промислових механізмів.

Лимонов Л. Г.

Новая серия электродвигателей переменного тока фирмы сименс

В статье рассмотрены основные технические и конструктивные особенности новой серии электродвигателей трехфазного переменного тока. Электродвигатели новой серии могут быть использованы для регулируемых частотных электроприводов различных промышленных механизмов.

Limonov L.

Siemens AC motors new series

The article describes the main technical and design features of the new series electric motors three-phase alternating current. Electric motors of the new series can be used for adjustable frequency electric drives of various industrial machinery.

Клепіков В.Б., Коротаєв П.А.

Особливості пуску електроприводів насосної станції після аварійного відключення 228

Виконано моделювання процесу пуску електроприводів насосної станції водопостачання. Показана можливість усунення кидків тиску при прямих пусках електроприводів з урахуванням хвилевих процесів електромеханогідравличної системи з декількома насосами, працюючими на єдину систему водопостачання.

Клепиков В.Б., Коротаев П.А.

Особенности пуска электроприводов насосной станции после аварийного отключения

Выполнено моделирование процесса пуска электроприводов насосной станции водоснабжения. Показана возможность устранения бросков давления при прямых пусках электроприводов с учетом волновых процессов электромеханогидравлической системе с несколькими насосами, работающими на единую систему водоснабжения.

Klepikov V., Korotaiev P.

After an emergency shutdown pump station electric drives start-up features

Modeling of water supply pump station electric drives start-up process is executed. Possibility of pressure throws elimination at electric drives direct start-up taking into account wave processes is shown to electromechanohydraulic system with several pumps working for uniform system of water supply.

Шокарев Д.А. Федотов В.А.

Исследование макетного образца тягового асинхронного электропривода рудничного контактно-аккумуляторного электровоза 234

Создание нового типа рудничного электровоза контактно-аккумуляторного, универсального по требуемым параметрам и эффективного по структуре, вида тягового электрического привода: IGBT-инвертор – асинхронный является важной задачей, которая позволит повысить энергоэффекивность работы электропривода и электробезопасность работы горнорабочих. В работе проведен анализ результатов испытание макетного образца тягового асинхронного привода рудничного контактно-аккумуляторного электровоза является важной задачей на этапе подготовки опытного образца.

Шокарьов Д.А. Федотов В.А.

Дослідження макетного зразка тягового асинхронного електропривода рудничної контактно-акумуляторного електровозу

Створення нового типу рудничного електровоза контактно-акумуляторного, універсального, за необхідними параметрами та ефективного за структурою, виду тягового електричного приводу: IGBT-інвертор - асинхронний є важливим завданням, яке дозволить підвищити енергоефекивних роботи електроприводу і електробезпека роботи гірників. У роботі проведено аналіз результатів випробування макетного зразка тягового асинхронного приводу рудничного контактно-акумуляторного електровоза є важливим завданням на етапі підготовки дослідного зразка.

Shokarov D., Fedotov V.

Research of the model sample of the traction asynchronous electric drive of the miner contact and accumulator electric locomotive

Creation of a new type of a miner electric locomotive contact and accumulator, universal in the demanded parameters and effective on structure, a type of the traction electric drive: The IGBT inverter – asynchronous is an important task which will allow to raise the energy efficiency of the operation of the electric drive and electrical safety of the work of miners. In the article the analysis of results is carried out test of a model sample of the traction asynchronous drive of a miner contact and accumulator electric locomotive is an important task at a stage of preparation of a prototype.

Блінцов В.С., Волянський С.М.

Удосконалення автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата 238

Удосконалено математичну модель РКК ПА шляхом обліку втрат гальмівного гідродинамічного моменту. Розроблено узагальнену структурну схему САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА, на основі якої синтезовано закони керування по стабілізації кутової швидкості обертання, упора ГГ ПА та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі. Синтезовано структури адаптивного ПІД-регулятора й нечіткого регулятора РКК ПА на базі БАД, які ґрунтуються на отриманих законах керування. Розроблено, створено випробувано, впроваджено у вироб-

ництво й в навчальний процес спеціалізований моделюючий комплекс для дослідження ефективності САК електроприводами будь-якого роду струму, до складу якого входить метрологічно атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1». Розроблено та експериментально досліджено на СМК САК РКК на базі БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими регуляторами.

Блинцов В.С., Волянский С.М.

Усовершенствование автоматического управления движительно-рулевым комплексом подводного аппарата

Усовершенствована математическая модель движительно-рулевого комплекса (ДРК) подводного аппарата (ПА) путем учета потерь тормозного гидродинамического момента. Разработана обобщенная структурная схема системы автоматического управления (САУ) ДРК на базе бароразгруженного асинхронного двигателя (БАД) при горизонтальном прямолинейном движении ПА, на основе которой синтезированы законы управления по стабилизации угловой скорости вращения, упора гребного винта ПА и скорости перемещения ПА при его горизонтальном прямолинейном движении. Синтезированы структуры адаптивного ПИД-регулятора и нечеткого регулятора ДРК ПА на базе БАД, основывающиеся на полученных законах управления. Разработан, создан, испытан, внедрен в производство и учебный процесс специализированный моделирующий комплекс для исследования эффективности САУ электроприводами любого рода тока, в состав которого входит метрологически аттестованное учебно-исследовательское лабораторное средство «Стенд испытательный СВ-1». Разработана и экспериментально исследована на СМК САУ ДРК на базе БАД при горизонтально прямолинейном движении ПА с синтезированными регуляторами.

Blintsov V, Volyansky S.

Improvement of automatic control by the motive-steering complex of submarine vehicle

Ggeneralized structure of the system of automatic control (SAC) is improved by the motive-steering complex of submarine vehicle (SV) by the account of losses of brake hydrodynamic moment. Using this structure, the laws of management of the SAC are synthesized by the motive-steering complex of SV on stabilizing of angulator of rotation, support of screw-propeller of SV and speed of moving of SV at his rectilineal platforming. The structures of adaptive PID-regulator and fuzzy regulator of motive-steering complex of SV are synthesized, that are base on the got laws of management.

Worked out, created tested, applied in industry and in an educational process a designing complex is specialized for research of efficiency of the SAC by the electric drive of any sort of current in the complement of that the metrology attested educational-research laboratory means enter “Stand proof-of-concept SP-1”. Worked out and the SAC are experimentally investigational on him by a motive-steering complex at the platforming of SV with the synthesized regulators.

Кравцов А. А., Купріянов А.А., Лімонов Л. Г., Потапов С. В., Сінельников В. В.

Автоматизований електропривод літючої пили в системі мірного різа.....244

Електромеханічна система летючої пили призначена для розрізання рухомого прокату на мірні частини заданої довжини. У статті описані апробовані авторами принципи побудови схем управління електроприводів комплексу летючої пили і алгоритми цифрової мікропроцесорної системи мірного різу прокату.

Кравцов А. А., Куприянов А.А., Лимонов Л. Г., Потапов С. В., Синельников В. В.

Автоматизированный электропривод летучей пилы в системе мерного реза

Электромеханическая система летучей пилы предназначена для разрезания движущегося проката на мерные части заданной длины. В статье описаны апробированные авторами принципы построения схем управления электроприводов комплекса летучей пилы и алгоритмы цифровой микропроцессорной системы мерного реза проката.

Обруч І. В., Кутовий Ю. М.

Нейромережева система керування електроприводу електровозу арп14 з урахуванням пружності кінематичних зв'язків.....248

Представлена нейромережева система керування двохмасової електромеханічної системи електроприводу рудникового акумуляторного електровоза. Застосування такої системи дозволить уникнути роботу даного приводу у режимі фрикційних автоколивань, знизити навантаження на кінематичні ланцюги передач, підвищити надійність роботи електроприводу

Обруч И. В., Кутовой Ю. Н.

Нейросетевая система управления электропривода электровоза арп14 с учетом упругости кинематических связей

Представлена нейросетевая система управления двухмассовой электромеханической системы электропривода рудничного аккумуляторного электровоза. Применение такой системы позволит избежать работы данного привода в режиме фрикционных автоколебаний, снизить нагрузки на кинематические цепи передач, повысить надежность работы электропривода

Obruch I., Kutovoj Ju.

Neural network control system electric drive locomotives arp14 in view of elastic kinematic constraints

Presented neural network control system two-mass electromechanical system battery electric mine locomotive. The use of such a system will prevent the operation of this drive in frictional self-oscillations, reduce the load on the kinematic chain of transmission, improve the reliability of the electric drive

Сінчук О.М., Сьомочкин А.Б., Федотов В.О.

Оцінка впливу факторів на граничну величину ударного зусилля у зчіпному пристрою при переміщенні пари «електровоз-вагонетка» за різних способів управління електровоза 251

Стаття присвячена вирішенню задачі мінімізації пружних ударів зчіпних пристроях рудничних поїздів залізорудних шахт. Основна ідея роботи полягає в кількісній оцінці декількох факторів (ривка вхідного впливу, зусилля рушання, початкового зазору в зчіпному пристрої і маси вагонетки) на перехідні процеси пари «електровоз-вагонетка». У ході обчислювальних експериментів, реалізованих на базі теорії планування експериментів, була виведена функція відгуку ударного зусилля в зчепленні у функції величини зазначених факторів. У статті наведені результати математичного моделювання пари «електровоз-вагонетка», функція відгуку, яка дозволила визначити .подальший напрямок досліджень з мінімізації ударів у зчіпці і поліпшенню якості управління системою.

Синчук О.Н., Сёмочкин А.Б., Федотов В.А.

Оценка влияния факторов на предельную величину ударного усилия в сцепном устройстве при перемещении пары «электровоз-вагонетка» при различных способах управления электровозом

Статья посвящена решению задачи минимизации упругих ударов сцепных устройствах рудничных поездов железорудных шахт. Основная идея работы заключается в количественной оценке нескольких факторов (рывка входного воздействия, уси-

лия трогания, начального зазора в сцепном устройстве и массы вагонетки) на переходные процессы пары «электровоз-вагонетка». В ходе вычислительных экспериментов, реализованных на базе теории планирования экспериментов, была выведена функция отклика ударного усилия в сцепке в функции величины указанных факторов. В статье приведены результаты математического моделирования пары «электровоз-вагонетка», функция отклика, которая позволила определить.дальнейшее направление исследований по минимизации ударов в сцепках и улучшению качества управления системой

Synchuk O, Syomochkin A, Fedotov V.

Analysis of key factors affecting the magnitude of the impact force within the coupling assembly during the movement of "locomotive-carriage" couple in various control modes.

This article describes a solution to minimise the elastic shock reaction with automatic couplers used on locomotives for the transportation of iron ore. The fundamentals for this solution are derived using a quantitate analysis from a number of various factors (i.e. input force on the motor, torque of starting movement, initial clearance within coupling assembly, mass of the carriage, etc.) which are related to the transitional processes created within the "locomotive-carriage" coupling. A customisable impact force recall function within the coupling assembly was derived from an experimental analysis which is based on international concepts of experimental design. This article presents the results of mathematical modelling of "locomotive-carriage" couple and the recall function also helping in determining the future direction of research in minimising the elastic shock within automatic couplers and more effective control of the system.

Шкурпела О.О., Яцько С.І., Тукалов І.О.

Аналіз схеми електропередачі модернізованого тепловоза чмеЗм з двома силовими установками. 257

В роботі виконаний аналіз силових схем тягових електропередач, що застосовуються у тепловозах з двома силовими установками. Отримана модель оптимальної схеми тягової електропередачі для модернізованого тепловозу ЧМЕЗМ з двома силовими установками. Дослідження отриманої моделі дозволили з'ясувати особливості роботи тепловоза з двома силовими установками.

Shkurpela A., Yatsko S., Tukalov I.

Analysis of the rower transmission scheme of the upgraded locomotive chme3m with two power units.

In the work carried out of power shemes of traction electricity transmissions for locomotives with two power units. The model of optimum traction power schemes for the upgraded locomotive CHME3M with two power units was obtained. Research of received model allowed to find out the features in work of the locomotive with two power units.

Сівьякова Г. А., Лімонов Л. Г.

Підвищення надійності промислових електроприводів вигляді резервування.....260

Розглянуто питання підвищення експлуатаційної надійності промислових електроприводів через їх резервування. Наведені методи та конкретні приклади схемо технічних рішень резервування для регульованих електроприводів різноманітних механізмів, які можуть бути використані для рушення питань резервування електроприводів постійного та змінного струму. Ці рішення застосовані у розробках регульованих електроприводів у практичній діяльності.

Сивякова Г.А., Лимонов Л.Г.

Повышение надежности промышленных электроприводов посредством резервирования

Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной надежности промышленных электроприводов посредством их резервирования. Описаны методы и конкретные примеры схемотехнических решений резервирования для регулируемых электроприводов различных механизмов, которые могут использоваться для решения задачи резервирования электроприводов постоянного и переменного тока. Эти решения использованы при разработке регулируемых электроприводов в практической деятельности.

Sivyakova G., Limonov L.

Improve the reliability of industrial electric by reservation

The article deals with observation of the issues of increasing the service reliability of industrial electric drive through their reservation. The methods are described, as well as certain examples of circuit reservation solutions for controlled electric drives of different mechanisms that can be used to solve the problem of AC and DC drives' reservation. These solutions are used in the development of controlled electric drives in practice.

Матусевич О. О.

Методологічні підходи підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій на основі безперервного вдосконалення fmea 265

Запропоновані теоретичні підходи і методичне забезпечення вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення якості і ефективності системи технічного обслуговування і ремонту устаткування тягових підстанцій електрифікованих залізниць в процесі експлуатації. З метою підвищення надійності електропостачання залізниць і зниження аварійності силового електроустаткування проведено дослідження методу аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Проведений аналіз основних методів розрахунку критичності порушення операції технічного обслуговування і ремонту пристроїв тягових підстанцій електрифікованих залізниць.

Запропонована методика FMEA процесу технічного обслуговування і ремонту електроустаткування тягових підстанцій електрифікованих залізниць спрямована на підвищення надійності роботи устаткування і досягнення оптимальної експлуатації його протягом усього життєвого циклу а також зниження витрат на експлуатацію силового устаткування за рахунок безперервного вдосконалення системи обслуговування.

Матусевич А. А.

Методологические подходы повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонта тяговых подстанций на основе непрерывного совершенствования fmea

Предложены теоретические подходы и методическое обеспечение решения актуальной научно-технической проблемы повышения качества и эффективности системы технического обслуживания и ремонта оборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в процессе эксплуатации.

С целью повышения надежности электроснабжения железных дорог и снижения аварийности силового электрооборудования проведено исследование метода анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Проведен анализ основных методов расчета критичности нарушения операции технического обслуживания и ремонта устройств тяговых подстанций электрифицированных железных дорог.

Предложенная методика FMEA процесса технического обслуживания и ремонта электрооборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог направлена на повышение надежности работы оборудования и достижения оптимальной эксплуатации его в течение всего жизненного цикла а также снижения расходов на эксплуатацию силового оборудования за счет непрерывного совершенствования системы обслуживания.

Босий Д.О.

Облік втрат електроенергії в системах тягового електропостачання 270

В статті розглянуте питання складності обліку втрат електричної енергії в системах тягового електропостачання через відсутність автоматизованих способів та стохастичний характер навантаження.

Автоматизована система обліку втрат повністю виключає людський фактор і дозволить співвіднести витрачену електроенергію між витратами на перевезення і обслуговування перевізного процесу. Запропонована система обліку втрат в тяговій мережі складається з спеціальних вимірювальних пристроїв з бездротовою передачею даних.

Проведені розрахунки показали, що запропонована система дозволяє досягти точності в 1,0 – 2,5 % при розташуванні приладів від 1 до 2 км.

Босый Д.О.

Учет потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения

В статье рассмотрен вопрос сложности учета потерь электрической энергии в системах тягового электроснабжения ввиду отсутствия автоматизированных способов и стохастический характер нагрузки.

Автоматизированная система учета потерь полностью исключит человеческий фактор и позволит соотнести затраченную электроэнергию между расходами на перевозки и обслуживание перевозочного процесса. Предложенная система учета потерь в тяговой сети состоит из специальных измерительных устройств с беспроводной передачей данных.

Проведенные расчеты показали, что предложенная система позволяет достичь точности в 1,0 – 2,5 % при размещении приборов от 1 до 2 км.

Bosiy D.

Power losses metering in the traction power supply systems

The article discusses the difficulty of accounting losses of electric energy in the traction power supply systems due to lack of automated methods and the stochastic nature of the traction load.

Automated accounting losses system completely eliminate the human factor and allow to correlate the energy expended between the cost of transport and maintenance of the transportation process. The proposed system of accounting losses in the traction network consists of special measuring devices with wireless data transmission.

The calculations showed that the proposed system can achieve the accuracy of 1.0 – 2.5 % while placing the devices from 1 to 2 km.

Осадчий В. В.

Визначення вібраційного моменту окремого дебалансу регульваного віброзбуджувача 274

Підвищення енергоефективності віброагрегатів можливе шляхом використання керованих вібраційних машин. Регульований дебалансний віброзбуджувач, що вигідно відрізняється ефективністю енергоперетворення від електромагнітного, у суто механічному виконанні не отримав належного розвитку зважаючи на складність кінематичних зв'язків. В той же час змінювання взаєморозташування дебалансів, які обертаються, що є основою регулювання збурення, може бути реалізоване засобами керованого електропривода.У процесі регулювання механічна потужність приводних двигунів окремих дебалансів змінюється не пропорційно до отриманої амплітуди збурення, що ускладнює вибір двигунів та силових перетворювачів. Отже встановлення аналітичних залежностей, що визначають вимоги до електропривода регульованого віброзбуджувача, є актуальною задачею. Отримано аналітичні залежності моменту та потужності приводного двигуна дебаланса від параметрів та режиму роботи регульованого віброзбуджувача. Вказані залежності можуть бути використані при виборі елементів електропривода.

Осадчий В. В.

Определение вибрационного момента отдельного дебаланса регулируемого вибровозбудителя

Повышение энергоэффективности виброагрегатов возможно путем применения управляемых вибрационных машин. Регулируемый дебалансный вибровозбудитель, выгодно отличающийся массогабаритными и стоимостными показателями от электромагнитного, в чисто механическом исполнении не получил должного развития ввиду сложности кинематических связей. В то же время заданное взаимное расположение вращающихся дебалансов, являющееся основой регулирования возмущающей силы, может быть достигнуто средствами автоматизированного электропривода. В процессе регулирования механическая мощность приводных двигателей отдельных дебалансов изменяется не пропорционально полученной амплитуде возмущающей силы, что осложняет выбор двигателей и силовых преобразователей. Поэтому установление зависимостей, определяющих требования к электроприводу регулируемого вибровозбудителя, является актуальной задачей. Получены аналитические зависимости момента и мощности приводного двигателя дебаланса от параметров и режима работы регулируемого вибровозбудителя. Указанные зависимости могут быть использованы при выборе элементов электропривода.

Osadchiy V.

The vibratory torque of separate unbalance of adjustable vibro-exciter

Improving the energy efficiency of vibrating units is possible through the usage of adjustable vibratory drives. Adjustable unbalanced vibroexciter, which is cheaper and have more efficient dimensional and weight-related characteristics than the electromagnetic vibratory drive has, was not paid an appropriate attention due to the complexity of the kinematic connections. At the same time mutual position of rotating unbalances, which is the basis in regulation of the disturbing force, can be controlled by means of automated electric drives. With regulation, the mechanical power of the drive motors of individual unbalances not varies proportionally in relation to the resulting amplitude of the disturbing force. It complicates choice of engines and power converters. Therefore, the detection of dependencies that define the requirements for the electric drive of adjustable exciter is an important task. In the article is published analytical formulas which describing the dependence of torque and power of the driving motor of the unbalance on the parameters and operation mode of adjustable vibration exciter. These formulas, can be used while selecting elements of drive.

Сінчук О.М., Бойко С.М.

Моделювання режимів роботи вітрової мініелектростанції на базі комбінованого контролера при функціонуванні в умовах залізорудних шахт 277

Актуальним, для впровадження відновлюваних джерел електричної енергії, є вітчизняні підприємства гірничо-

металургійної галузі, особливо у вигляді вітрових мініелектростанцій. Між тим, для досягнення достатньої ефективності функціонування вітрових мініелектростанцій необхідне створення відповідної конструкції комплексу та алгоритму його керування, що в свою чергу можливо лише при моделюванням реальних режимів роботи за конкретних умов експлуатації. Моделювання режимів роботи вітрової мініелектростанції в умовах підземних виробок залізорудних шахт, показало що запропонована система керування на базі комбінованого контролера з використанням адаптованої системи автоматичного керування зкорегована із врахуванням мікроклімату підземних виробок.

Синчук О.Н., Бойко С.Н.

Моделирование режимов работы ветровой миниэлектростанции на базе комбинированного контроллера при функционировании в условиях железорудных шахт

Актуальными, для внедрения возобновляемых источников электрической энергии, являются отечественные предприятия горно-металлургической отрасли, особенно в виде ветровых миниэлектростанций. Между тем, для достижения достаточной эффективности функционирования ветровых миниэлектростанций необходимо создание соответствующей конструкции комплекса и алгоритма его управления, что в свою очередь возможно лишь моделированием реальных режимов работы при конкретных условиях эксплуатации. Моделирование режимов работы ветровой миниэлектростанции в условиях подземных выработках железорудных шахт, показало, что предложенная система управления на базе комбинированного контроллера с использованием адаптированной системы автоматического управления функционирует с учетом микроклимата подземных выработок.

Sinchuk O., Boiko S.

Modeling of operation modes of wind mini electrical power stations on the basis of the combined controller when functioning in terms of iron ore mines

Relevant to the implementation of renewable electric energy, are domestic enterprises of mining industry, especially in the form of wind minipower plant. Meanwhile, to achieve a sufficient efficiency of functioning of the wind mini power stations it is necessary to create an appropriate design of complex algorithm and its management, which in turn is possible only if the simulation of the real modes of specific conditions. Modeling of operation modes of wind mini electrical power stations in the conditions of underground mining of iron ore mines, have shown that the proposed control system on the basis of the combined controller using an adapted system of automatic control koregoan subject to the microclimate of the underground workings.

Сінчук І.О., Омельченко О.В., Федотов В.О.

Аналіз умов та режимів функціонування тягових електромеханічних систем рудникових контактних електровозів в умовах залізорудних шахт.....283

У статті наведено осцилограми параметрів тягового двигуна контактного електровоза при навантажувально-розвантажувальних операціях і при русі по головним виробкам, проведено їх аналіз. Для поліпшення показників функціонування тягової електромеханічної системи запропоновані модифікації існуючих схем і розробки нових на базі асинхронних двигунів.

Синчук И.О., Омельченко О.В., Федотов В.А.

Анализ условий и режимов функционирования тяговых электромеханических систем рудничных контактных электровозов в условиях железорудных шахт

В статье приведены осциллограммы параметров тягового двигателя контактного электровоза при погрузочно-разгрузочных операциях и при движении по главным выработкам, проведен их анализ. Для улучшения показателей функционирования тяговой электромеханической системы предложены модификации существующих схем и разработки новых на базе асинхронных двигателей.

Sinchuk I., Omelchenko O., Fedotov V.

Analysis of the conditions and modes of operation of the traction electromechanical systems of electric contact of mine in terms of iron ore mines

The article presents the waveforms parameters of the traction motor electric contact during loading and unloading operations and during movement of the main workings, the results of their analysis. To improve the functioning of the traction Electromechanical systems proposed modification of existing schemes and development of new on the basis of induction motors.

Пересунько І. І., Антоненко А. О.

Вплив відхилення напруги живильної мережі на роботу асинхроного електроприводу на гірничорудних підприємствах 288

Стаття присвячена вирішенню проблем електропостачання гірничих підприємств, забезпечення оптимальної надійності в схемах, забезпечення електроприймачів (ЕП) необхідною якістю живлячої напруги у всіх режимах роботи старого і нового гірничотранспортного обладнання і, крім того, використовуєма система електропостачання повинна бути економічно найбільш вигідна. Забезпечення рівня надійності електропостачання реалізується, в тому числі, за рахунок підтримання показників якості електроенергії живильної мережі. Необхідно звернути увагу на роботу найбільш поширених типів електричних двигунів в умовах конкретного залізорудного комбінату з урахуванням зміни значення показників якості електроенергії. У цьому випадок найбільш масовими є асинхронні електродвигуни. У статті розглянуто вплив відхилень напруги на роботу електропривода в межах від 10 % до + 10% на характеристику асинхронного електродвигуна.

Пересунько И. И., Антоненко А.О.

Влияние отклонения напряжения питающей сети на работу асинхроного электропривода в горнорудных предприятиях.

Статья посвящена решению проблем электроснабжения горных предприятий, обеспечения оптимальной надежности в схемах, обеспечение электроприемников (ЭП) необходимым качеством питающего напряжения во всех режимах работы старого и нового горнотранспортного оборудования и, кроме того, используемая система электроснабжения должна быть экономически наиболее выгодна. Обеспечение надёжности уровня электроснабжения реализуется, в том числе, за счёт подержания показателей качества электроэнергии питающей сети. Необходимо обратить внимание на работу наиболее распространённых типов электрических двигателей в условиях конкретного железорудного комбината с учётом изменения значения показателей качества электроэнергии. В данном случай наиболее массовыми является асинхронные электродвигатели.

В статье рассмотрено влияние отклонений напряжения на работу электропривода в пределах от – 10 % до + 10% на характеристику асинхронного электродвигателя.

Peresunko I., Antonenko A.

The influence of the deviation of the voltage of operation of the asynchronous electric drive with the mining companies.

The article is devoted to solving problems in power mining enterprises, optimum reliability in circuits providing power consumers the required quality of the supply voltage in all modes of operation of old and new mining and transport equipment and, in addition, the power supply system must be cost effective. The reliability level of power supply is implemented, including, at the expense of maintaining the power quality of the supply network. It is necessary to pay attention to the work of the most common types of electric motors in terms of the specific iron ore plant to reflect the changes in the values of the power quality. In this case the mass is asynchronous motors. In this paper, the influence of voltage fluctuations on the operation of the actuator in the range from – 10% to + 10% of the characteristic of the induction motor.

Вінниченко Д. В., Назарова Н. С.

Розробка принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів 292

Розроблено принцип керування вихідним середньоквадратичним струмом інвертора напруги з послідовним резонансним контуром для забезпечення оптимальних режимних параметрів синтезу нановуглецю. Вперше отримано закон регулювання вихідного середньоквадратичного струму за допомогою зміни частоти розрядних імпульсів. Проведено математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти шляхом зміни частоти комутації ключів інвертору.

Винниченко Д. В., Назарова Н. С.

Разработка принципов управления режимными параметрами электротехнической системы для электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов

Разработан принцип управления выходным среднеквадратичным током инвертора напряжения с последовательным резонансным контуром для обеспечения оптимальных режимных параметров синтеза наноуглерода. Впервые получен закон регулирования выходного среднеквадратичного тока путем изменения частоты разрядных импульсов. Проведено математическое моделирование выходного тока в окрестности резонансной частоты при изменении частоты коммутации ключей инвертора.

Vinnichenko D., Nazarova N.

The development of the electrotechnical system's regime parameters control principles for electric synthesis of carbon nanomaterials

The output rms current of the voltage inverter with series-resonant circuit for optimal regime parameters of the synthesis of nanocarbon control principle was developed. The output rms current regulating law by varying the frequency of the discharge pulses was obtained. The mathematical modeling of the output current near the resonant frequency varying the inverter switches' frequency was conducted.

Элементы автоматизированного электропривода

Сьомін А.О.

Вибір частоти дискретизації при знятті експериментальних даних у задачі ідентифікації параметрів схеми заміщення АД 299

Обґрунтовано необхідність вибору частоти дискретизації при знятті експериментальних даних з метою подальшої ідентифікації параметрів схеми заміщення АД. Показано, що крок дискретизації суттєво впливає на точність визначення амплітуди і фази гармоніки ШІМ-модульованого сигналу напруги. Результати для різних частот опорної пилкоподібної напруги практично збігаються, якщо розглядати в якості незалежної змінної число вимірювань, що припадають на період опорного напруги.

Сёмин А.А.

Выбор частоты дискретизации при снятии экспериментальных данных в задаче идентификации параметров схемы замещения АД

Обоснована необходимость выбора частоты дискретизации при снятии экспериментальных данных с целью дальнейшей идентификации параметров схемы замещения АД. Показано, что шаг дискретизации существенно влияет на точность определения амплитуды и фазы гармоники ШИМ-модулированного сигнала напряжения. Результаты для различных частот опорного пилообразного напряжения практически совпадают, если рассматривать в качестве независимой переменной число измерений приходящихся на период опорного напряжения.

Syomin A.

Adoption of the sampling frequency for experimental data receiving in the problem of parameters identification of induction motor equivalent circuit

The necessity of adoption of the sampling frequency for experimental data receiving in the problem of parameters identification of induction motor equivalent circuit is substantiated. It is shown that sampling frequency affects significantly the accuracy of harmonic amplitude and phase determination of PWM voltage signal. The results for different frequencies of the reference ramp is almost identical if number of measurements during the period of the reference voltage is considered as an independent variable.

Паліс С., Плюгін В.Є., Маслєнников А.М.

Застосування генетичного алгоритму оптимізації в проектуванні електричних машин 303

У даній статті виконано порівняльний аналіз ефективності існуючих алгоритмів оптимізації. Розглянуто основні положення теорії генетичних алгоритмів. Досліджено можливість застосування генетичних алгоритмів в оптимальному проектуванні електричних машин. Наведено результати практичної реалізації класичного генетичного алгоритму при оптимізації асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Палис С., Плюгин В.Е., Масленников А.М.

Применение генетического алгоритма оптимизации в проектировании электрических машин

В данной статье выполнен сравнительный анализ эффективности существующих алгоритмов оптимизации. Рассмотрены основные положения теории генетических алгоритмов. Исследована возможность применимости генетических алгоритмов в оптимальном проектировании электрических машин. Приведены результаты практической реализации классического ге-

нетического алгоритма при оптимизации асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Palis S., Plugin V., Maslennikov A.

Genetic optimization algorithm application in electric machines design

The comparative analysis of existing optimization algorithms effectiveness is performed in the paper. The basic points of the genetic algorithms theory are considered. The possibility of the genetic algorithms application in optimal design of electric machines is examined. The results of the classical genetic algorithm practical implementation in optimization of induction motor with a squirrel-cage rotor are offered.

Диагностика элементов и узлов электромеханических систем

Гаврилець Г. О., Родькін Д. Й.

До задачі оцінювання віброактивності елементів електромеханічної системи 308

Розглянуто поняття віброактивності, як інформативного параметра для аналізу вібрації елементів електромеханічної системи. Показано, що чисельно віброактивність вузла системи визначається як відношення його вібраційної і механічної потужностей. Представлено математичний апарат, який дозволяє описати вібраційну потужність в площині її поширення і сумарну вібропотужність в трьох площинах.

Гаврилец Г. О, Родькин Д. И.

К задаче оценки виброактивности элементов электромеханической системы

Рассмотрено понятие виброактивности, как информативного параметра для анализа вибрации элементов электромеханической системы. Показано, что численно виброактивность узла системы определяется как отношение его вибрационной и механической мощностей. Представлен математический аппарат, позволяющий описать вибрационную мощность в плоскости ее распространения и суммарную вибромощность в трех плоскостях.

Havrylets H., Rodkin D.

On the problem of assessment of vibratory activity of elements electromechanical system

The vibration activity as the informative parameter for the analysis of vibration components of the electromechanical system is examined. Shown vibration activity of system node is defined as the ratio of its vibration power and mechanical power. Mathematical device that allows you to describe the power of vibration in the plane of its distribution and total power of vibration in three planes is defined.

Горкунов Б. М., Львов С. Г., Тищенко А. А., Ву Суан Вионг

Безконтактний контроль механічної напруги в циліндричних зразках диференційним електромагнітним перетворювачем.....312

В роботі розглянуто трансформаторний вихрострумовий перетворювач, включений за диференційною схемою, та запропоновано метод контролю механічної напруги в металевих циліндричних виробах в реальному часі. На основі наявності кореляційних зв'язків між електромагнітними характеристиками металів та їх структурним станом запропонований метод безконтактного контролю механічної деформації виробу. Обрано узагальнений нормований інформативний магнітний параметр і на його основі отримані основні функції перетворення для визначення прирощень відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності навантажуємого виробу щодо стандартного зразка. Показано перевагу диференційного методу в порівнянні з абсолютним, з точки зору збільшення чутливості контролю інформативних параметрів.

Горкунов Б. М., Львов С. Г., Тищенко А. А., Ву Суан Вьонг

Бесконтактный контроль механических напряжения в цилиндрических образцах дифференциальным электромагнитным преобразователем

В работе рассмотрен трансформаторный вихретоковый преобразователь, включенный по дифференциальный схеме, и предложен метод контроля механического напряжения в металлических цилиндрических изделиях в реальном времени. На основе наличия корреляционных связей между электромагнитными характеристиками металлов и их структурным состоянием предложен метод бесконтактного контроля механической деформации изделия. Выбран обобщенный нормированный информативный магнитный параметр и на его основе получены основные функции преобразования для определения приращений относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости нагружаемого изделия относительно стандартного образца. Показано преимущество дифференциального метода по сравнению с абсолютным, с точки зрения увеличения чувствительности контроля информативных параметров.

Gorkunov B., Lvov S., Tyshchenko A., Vu Suan Vuong

Non-contact control of the mechanical stresses in the cylindrical sample by differential electromagnetic converter

In work the transformer eddy current converter which is switched on differential to the scheme is considered and the control method of mechanical stress in metal cylindrical products in real time is offered. On the basis of existence of correlation communications between electromagnetic characteristics of metals and their structural state the method of non-contact control of mechanical deformation of a product is offered. The generalized rated informative magnetic parameter is chosen and on its basis the main functions of transformation for definition of increments of relative magnetic permeability and specific electric conductivity of the loaded product of rather standard sample are received. The advantage of the differential method in comparison with the absolute, from the point of view of increase in sensitivity of control of informative parameters is shown.

Гриб О.Г., Гапон Д.А., Сіротін Ю.О., Ієрусалімова Т.С., Дяченко О.В.

Моніторинг якості електроенергії на цифрових підстанціях 316

Електрична енергія використовується в усіх сферах життєдіяльності людини, володіє сукупністю специфічних властивостей і безпосередньо бере участь у створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. Кожен електроприймач призначений для роботи при певних параметрах електричної енергії: номінальній частоті, напрузі і т. п., тому для нормальної його роботи має бути забезпечено необхідну якість електричної енергії. Тому до якості електричної енергії пред'являються підвищені вимоги.

Гриб О.Г., Гапон Д.А., Сиротин Ю.А., Иерусалимова Т.С., Дяченко А.В.

Мониторинг качества электроэнергии на цифровых подстанциях

Электрическая энергия используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических

свойств и непосредственно участвует в создании других видов продукции, влияя на их качество. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальной частоте, напряжении и т. п., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое качество электрической энергии. Поэтому к качеству электрической энергии предъявляются повышенные требования.

Gryb O., Gapon D., Sirotin U., Ierusalimova T., Diachenko A.

Monitoring power quality in digital substations

Electrical energy is used in all spheres of human activity, has a combination of specific properties and is directly involved in the creation of other types of products, affecting their quality. Each receiver is designed to work under certain parameters of electrical energy: nominal frequency, voltage, etc., so for normal operation must be ensured the required quality of electrical energy. Therefore, the quality of electric power increased demands.

Левицький С. М., Проценко Д. П., Бартецький А. А.

Система діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти.....320

Розроблено математичну модель та структуру системи діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти з автономним інвертором напруги, яка дозволяє вчасно виявляти критичний стан робочого конденсатора та запобігати пошкодженням перетворювача частоти. Запропонована модель базується на обчисленні фактичного значення експлуатаційного коефіцієнту, що пов'язує фактичний термін напрацювання конденсатора на відмову з його номінальним значенням. Обчислення експлуатаційного коефіцієнту передбачає вимірювання напруги на обкладинках конденсатора, пульсуючого струму та температури конденсатора. Діагностичний висновок формується системою з врахуванням тривалості виходу експлуатаційного коефіцієнта за зону нечутливості за рахунок введення часової затримки та порівняння результатів обчислення коефіцієнту на початку та в кінці інтервалу затримки, а також із врахуванням знаку похідної коефіцієнту в часі, що дозволяє уникнути хибних висновків при короткочасних збуреннях.

Левицкий С. М., Проценко Д. П., Бартецкий А. А.

Система диагностирования конденсаторов цепи постоянного тока преобразователей частоты

Разработана математическая модель и структура системы диагностирования конденсаторов цепи постоянного тока преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения, которая позволяет своевременно выявлять критическое состояние рабочего конденсатора и предотвращать повреждение преобразователя частоты. Предложенная модель базируется на вычислении фактического значения эксплуатационного коэффициента, который связывает фактический срок наработки конденсатора на отказ с его номинальным значением. Вычисление эксплуатационного коэффициента предполагает измерение напряжения на обкладках конденсатора, пульсирующего тока и температуры конденсатора. Диагностический вывод формируется системой с учетом длительности выхода эксплуатационного коэффициента за зону нечувствительности за счет введения временной задержки и сравнения результатов вычисления коэффициента в начале и в конце интервала задержки, а также с учетом знака производной коэффициента во времени, что позволяет избежать ошибочных выводов при кратковременных возмущениях.

Levitskiy S., Protsenko D., Bartetskiy A.

The Diagnosis System for Capacitors of DC Circuits of Frequency Converter

The paper presents the mathematical model and the structure of diagnosis system for capacitors of DC circuits of frequency converters with self-excited voltage inverter, which allows to identify the critical operating state of the capacitor and to prevent damage of the frequency converter. The proposed model is based on the calculation of the actual values of the lifetime factor, which binds the actual capacitor's lifetime with its nominal value. Calculation of lifetime factor involves the measurement of the voltage on the capacitor plates, ripple current and temperature of the capacitor. The diagnostic conclusion generated by the system taking into account the duration of the lifetime factor overrange due to the input of time delay and compare the results of calculation of the lifetime factor at the beginning and at the end of the delay interval, as well as considering the sign of the derivative of the factor in time to avoid erroneous conclusions with short-term perturbations.

Коліушко Д.Г., Руденко С.С.

Інтерпретація результатів вертикального електричного зондування у вигляді чотирьохшарового геоелектричного напівпростору 324

Розроблена математична модель інтерпретації результатів зондування ґрунту установкою Веннера у вигляді чотирьохшарового ґрунту. Створена тестова програма для інтерпретації експериментальних кривих вертикального електричного зондування. Отримані результати дозволять підвищити точність розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв.

Колиушко Д.Г., Руденко С.С.

Интерпретация результатов вертикального электрического зондирования в виде четырехслойного геоэлектрического полупространства

Разработана математическая модель для интерпретации результатов зондирования грунта установкой Веннера в виде четырехслойного грунта. Создана тестовая программа для интерпретации экспериментальных кривых вертикального электрического зондирования. Полученные результаты позволят повысить точность расчета нормируемых параметров заземляющих устройств.

Koliushko D., Rudenko S.

Interpretation of the results of vertical electrical sounding in four-layered geoelectrical structure

A mathematical model for interpretation of the results Wenner sounding curves in four-layered geoelectrical structure has been developed. The test program for interpretation of experimental curves sounding has been created. The obtained results allow improving calculation accuracy of the standardized parameters of grounding.

Зачепа Н.В., Зачепа Ю.В., Сергієнко С.А.

Програмно–логічний комплекс для дослідження дизель–генераторних установок з асинхронними генераторами....330

В роботі розроблено програмно-логічний комплекс дизель-генераторної установки з асинхронним генератором в спеціалізованому пакеті прикладних програм LabView, що дозволяє проводити дослідження робочих режимів АГ з подальшим опрацювання результатів щодо аналізу якості генерованої електроенергії, розробки систем контролю, обліку та керування енергопроцесів. Планується вдосконалення комплексу для розв`язання задач з дослідження аварійних та позаштатних режимів роботи з метою створення інструменту для формування вимог та рекомендацій щодо способів та пристроїв захисту АГ.

Зачепа Н.В., Зачепа Ю.В., Сергиенко С.А.

Программно-логический комплекс для исследования дизель-генераторных установок с асинхронными генераторами
В работе разработан программно-логический комплекс дизель-генераторной установки с асинхронным генератором в специализированном пакете прикладных программ LabView, что позволяет проводить исследования рабочих режимов асинхронного генератора с дальнейшие обработкой результатов относительно анализа качества генерированной электроэнергии, разработки систем контроля, учета и управление энергопроцессов. Планируется совершенствование комплекса для решения задач по исследованию аварийных и внештатных режимов работы с целью создания инструмента для формирования требований и рекомендаций относительно способов и устройств защиты АГ.
Zachepa N. Zachepa I., Sergiyenko S.
Software logical complex for research diesel generator sets with asynchronous generators
This paper developed software and logical set of diesel generator asynchronous generator in specialized software packages LabView, which allows the study of operating modes of subsequent hypertension study to analyze the quality of results generated electricity, development of monitoring systems, accounting and control enerhoprotsesiv. Planned improvements for solving complex problems with a study of emergency and abnormal operating modes to create an instrument for the formation of the requirements and recommendations on how to protect devices and hypertension.
Коломієц В.В., Лутай С.М., Кобилянський Б.Б.
Вимірювач магнітного потоку системи діагностики електромагнітів 334
У статті описаний пристрій виміру магнітного потоку магнитоизмерительной системи, що забезпечує вимір з високою точністю.
Коломиец В.В., Лутай С.Н., Кобылянский Б.Б.
Измеритель магнитного потока системы диагностики электромагнитов
В статье описано устройство измерения магнитного потока магнитоизмерительной системы, обеспечивающей измерение с высокой точностью.
Kolomiyets V., Lutay S., Kobyliansky B.
The article describes a device measuring the magnetic flux measuring system capable of measuring with high precision.
Коломієц В.В., Лутай С.М., Кобилянський Б.Б.
Пристрій діагностування електромагнітів 336
У статті описано апаратна реалізація пристрою діагностики електромагнітів за формою вебер - амперної характеристики.
Коломиец В.В., Лутай С.Н., Кобылянский Б.Б.
Устройство диагностики электромагнитов
В статье описано аппаратная реализация устройства диагностики электромагнитов по форме вебер - амперной характеристики.
Kolomiyets V., Lutay S., Kobyliansky B.
In article it is described hardware realization of the device of diagnostics of electromagnets in a form weber - the ampere characteristic.

Энергетика и энергосбережение

Жемеров Г.Г., Тугай Д.В.
Уточнення універсальної формули для визначення сумарной потужності втрат в трифазних системах електропостачання.....339
Отримано уточнену універсальну формулу для розрахунку сумарної потужності втрат трифазних систем електропостачання як суми п'яти складових: мінімально можливих втрат; втрат, зумовлених реактивною потужністю; втрат, зумовлених пульсаціями миттєвої активної потужності; втрат, зумовлених протіканням струму в нульовому проводі; втрат, зумовлених взаємним впливом електромагнітних процесів в лініях і нульовому проводі. Формула справедлива для розрахунків сумарної потужності втрат у будь-якому режимі роботи трифазної системи електропостачання.
Жемеров Г.Г., Тугай Д.В.
Уточнение универсальной формулы для определения суммарной мощности потерь в трехфазных системах электроснабжения
Получена уточненная универсальная формула для расчета суммарной мощности потерь трехфазных систем электроснабжения как суммы пяти составляющих: минимально возможных потерь; потерь, обусловленных реактивной мощностью; потерь, обусловленных пульсациями мгновенной активной мощности; потерь, обусловленных протеканием тока в нулевом проводе; потерь, обусловленных взаимным влиянием электромагнитных процессов в линиях и нулевом проводе. Формула справедлива для расчетов суммарной мощности потерь в любом режиме работы трехфазной системы электроснабжения.
Zhemerov G., Tugay D.
The universal formula clarification to determine the total power losses in the three-phase energy supply systems
We have developed the universal relation for calculating the total power losses of the three-phase energy systems as a sum of five components: the lowest possible losses; losses due to reactive power; losses due to instantaneous active power pulsation; losses due to current flow in the neutral conductor; losses due to the mutual influence of electromagnetic processes in the lines and the neutral wire. The formula is valid for the calculation of total power losses in any operation mode three-phase energy supply system.
Сивокобиленко В.Ф., Ткаченко С.М., Деркачев С.В.
Способи виявлення асинхронних режимів в системах електропостачання з асинхронних і синхронних двигунами..344
Розглянуто відомі принципи виконання захисту синхронних двигунів від асинхронного режиму. Відзначено незадовільна робота захистів при асинхронному режимі збудженого турбодвигуна. Запропоновано новий критерій виявлення асинхронного режиму, який заснований на контролі співвідношення між активною та позитивною реактивною потужністю. На основі математичного моделювання вузла навантаження з асинхронними та синхронними двигунами показана ефективність запропонованого захисту від асинхронного режиму, що виникає по будь-якої причини.
Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., Деркачев С.В.

Способы выявления асинхронных режимов в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями

Рассмотрены известные принципы выполнения защиты синхронных двигателей от асинхронного режима. Отмечена неудовлетворительная работа защит при асинхронном режиме возбужденного турбодвигателя. Предложен новый критерий выявления асинхронного режима, основанный на контроле соотношения между активной и положительной реактивной мощностью. На основе математического моделирования узла нагрузки с асинхронными и синхронными двигателями показана эффективность предложенной защиты от асинхронного режима, возникающего по любой причине.

Sivokobylenko V., Tkachenko S., Derkachev S.

Methods of detecting an asynchronous condition in power supply systems with induction and synchronous motors

The known principles of implementation of the asynchronous condition protection of synchronous motors are shown in tis article. There was marked a dissatisfying performance of asynchronous condition protection of excited turbo motor. A new criterion for identifying asynchronous condition based on the control of the ratio between the active and positive reactive power are suggested in this paper. On the basis of mathematical simulation of the load node with induction and synchronous motors shows the effectiveness of the proposed anti-asynchronous condition protection, which occurs for any reason.

Деєв С. Г.

Енергозберігаюче керування електроприводом з синхронним двигуном.....348

У роботі розглянута робастний енергозберігаюча система керування синхронним електроприводом. Для забезпечення робастності використовуються комбіновані методи керування. Невизначеності зовнішніх впливів, механічних та електричних параметрів оцінюються і компенсуються за допомогою спостерігача невизначеності.

Деев С.Г.

Энергосберегающее управление электроприводом с синхронным двигателем

В работе рассмотрена робастная энергосберегающая система управления синхронным электроприводом. Для обеспечения робастности используются комбинированные методы управления. Неопределённости внешних воздействий, механических и электрических параметров оцениваются и компенсируются с помощью наблюдателя неопределённости.

Deyev S.

Energy saving control of electric drive with synchronous motor

The paper considers the robust energy-saving control system of a synchronous electric motor. To ensure the robustness of using combined methods of control. Uncertainties external influences, mechanical and electrical parameters are estimated and compensated with the help of an observer uncertainty.

Титюк В.К.

Шляхи вирішення завдання енергоресурсозберігання в теорії оптимальних електромеханічних систем керованого запуску.....352

Енергетично напружений характер процесу запуску обумовлює особливий характер взаємодії ЕМС з навколишнім техноценоз саме під час запуску. Для зниження взаємовпливу пускових процесів ЕМС і техноценоз застосовуються спеціалізовані пускові пристрої, що реалізують керований за-пуск ЕМС і теорія створення пускових ЕМС. Сучасна теорія пускових ЕМС, обмежена рамками тих-нічної моделі, не містить методів побудови оптимальних ЕМС, що забезпечують узгоджене з економічного метою виробничої системи управління процесом запуску. У роботі розглянуто питання створення оптимальних ЕМС керованого запуску, що забезпечують таке співвідношення між споживаною для здійснення запуску енергією і ресурсами, позитивним ефектом процесу запуску і його тривалістю, яке забезпечує максимально можливу величину створюваної в процесі запуску доданої вартості.

Тытюк В.К.

Пути решения задачи энергоресурсосбережения в теории оптимальных электромеханических систем управляемого запуска

Энергетически напряженный характер процесса запуска обуславливает особый характер взаимодействия ЭМС с окружающим техноценозом именно во время запуска. Для снижения взаимовлияния пусковых процессов ЭМС и техноценоза применяются специализированные пусковые устройства, реализующие управляемый запуск ЭМС и теория создания пусковых ЭМС. Современная теория пусковых ЭМС, ограниченная рамками технической модели, не содержит методов построения оптимальных ЭМС, обеспечивающих согласованное с экономической целью производственной системы управление процессом запуска. В работе рассмотрен вопрос создания оптимальных ЭМС управляемого запуска, обеспечивающих такое соотношение между потребляемыми для осуществления запуска энергией и ресурсами, положительным эффектом процесса запуска и его длительностью, которое обеспечивает максимально возможную величину создаваемой в процессе запуска добавленной стоимости.

Titjuk V.

Solution for problem of energy and resources saving in the theory of optimal electromechanical systems controlled launch

Launching of electromechanical system (EMS) is heavy-duty mode. It causes special character of interaction aspects between EMS and surrounding technocenose.

To reduce interference between EMS launching processes and technocenose commonly used specialized launchers, implementing a managed-launch of EMC and theory of EMS starting. The modern theory theory of EMS launching bounded with technical model, which did not contains methods for constructing optimal EMC, ensuring consistent with the enterprise economic purposes. The paper considers the issue of creating the optimal starting EMS providing such a relationship between the power consumption for the launch of energy and resources, the positive effect of the starting process and its duration, which provides the maximal possible added cost, created during the launching process.

Моісеєв О.М.

Енергоефективна турбоелектромеханічна система для газорозподільних станцій 356

Робота присвячена обгрунтуванню раціональної структури автономного джерела електроживлення для газотранспортних мереж.

Моисеев А.Н.

Энергоэффективная турбоэлектромеханическая система для газораспределительных станций

Работа посвящена обоснованию рациональной структуры автономного источника электропитания для газотранспортных се-

тей.

Moiseiev A.

Energyeffective to turboelectromechanics system for the gas-distributing stations

The paper is dedicated to research the justification of a rational structure of the autonomous power supply for the gas transmission networks

Черно О.О., Гуров А. П.

Оптимізація частоти коливань вібраційних установок з електромагнітним приводом за критерієм максимуму ККД 360

У статті проведено аналіз впливу параметрів електромагнітного приводу вібраційної установки на величину оптимальної частоти, що забезпечує максимальне значення ККД. Побудована регресійна модель, яка дозволяє визначити оптимальну частоту в залежності від жорсткості пружин вібратора, початкової величини повітряного зазору, амплітуди відносних коливань якоря і осердя, а також від вихідної потужності приводу. Запропонована модель може бути використана при керуванні частотою електромагнітного вібраційного приводу з метою забезпечення його максимальної енергетичної ефективності.

Черно А.А., Гуров А. П.

Оптимизация частоты колебаний вибрационных установок с электромагнитным приводом по критерию максимума КПД

В статье проведен анализ влияния параметров электромагнитного привода вибрационной установки на величину оптимальной частоты, обеспечивающей максимальное значение КПД. Построена регрессионная модель, которая позволяет определить оптимальную частоту в зависимости от жесткости пружин вибратора, начальной величины воздушного зазора, амплитуды относительных колебаний якоря и сердечника, а также от выходной мощности привода. Предложенная модель может быть использована при управлении частотой электромагнитного вибрационного привода с целью обеспечения его максимальной энергетической эффективности.

Cherno O., Hurov A.

Optimization of the oscillation frequency of the vibration device with electromagnetic drive according to the criterion of maximum energy efficiency

In this article the influence of the vibratory device electromagnetic drive parameters on the value of the optimal frequency, ensuring maximum efficiency, was analyzed. Regression model, which allows to determine the optimum frequency depending on the vibrator springs stiffness, the initial value of the air gap, the amplitude of the relative vibration of the armature and the core and the output power of the drive, was obtained. The proposed model can be used to control the vibrating frequency of the electromagnetic vibratory drive in order to ensure its maximum energy efficiency.

Сиченко В.Г.

Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму 364

Зростаючий дефіцит енергоресурсів обумовлює необхідність використання електричної енергії, отриманої від відновлювальних джерел. Інтеграція сонячних електростанцій в систему тягового електропостачання постійного струму може здійснюватися по декільком напрямкам. В статті приведені рекомендації по приєданню сонячних електростанцій до шин тягових підстанцій та розглянута структурна схема підсилення тягової мережі з використанням сонячної енергії. Показано, що в пропонованій системі нормований рівень напруги для швидкісного руху витримується, при цьому втрати електричної енергії зменшуються до 50 % при зменшенні витрат на тягу майже на 20 %.

Сыченко В.Г.

Интеграция солнечной энергетики в систему тягового электроснабжения постоянного тока

Растущий дефицит энергоресурсов обуславливает необходимость использования электрической энергии, полученной от нетрадиционных источников. Интеграция солнечных электростанций в систему тягового электроснабжения постоянного тока может осуществляться по нескольким направлениям. В статье приведены рекомендации по присоединению солнечных электростанций к шинам тяговых подстанций и рассмотрена структурная схема усиления тяговой сети с использованием солнечной энергии. Показано, что в предложенной системе нормируемый уровень напряжения для скоростного движения выдерживается, при этом потери электрической энергии уменьшаются до 50 % при уменьшении расходов на тягу почти на 20 %.

Sichenko V. G.

Integration of solar energy into the system of traction power supply of the direct current

The growing shortage of energy resources necessitates the use of electrical energy produced from non-traditional sources. The integration of solar power in DC traction power supply can be carried out in several directions. The paper provides recommendations for connection the solar power to the buses of the traction substations and considered a block diagram of the reinforcement of the traction network using solar energy. It is shown that the proposed system of normalized voltage level for high-speed traffic is maintained, with the loss of electric power is reduced to 50% while reducing the cost of thrust by nearly 20%.

Говоров П.П., Король О.В., Романова Т.І.

Підвищення ефективності знезараження води в системах водопостачання міст 369

У статті розглядаються питання підвищення енергоефективності знезараження води в системах водопостачання міст, що базується на використанні ультрафіолетових світлодіодних джерел світла та виконанні системи електропостачання на постійно-змінним струмом. Запропоновано ряд схем живлення постійно-змінного струму й визначено найбільш ефективні з них. Показано, що застосування симетрувального тиристорного регулятора напруги, у якості джерела постійного струму дозволяє регулювати напругу та симетрувати навантаження, при значному зменшенні втрат й витрат електроенергії, а також рівня вищих гармонічних складових струму і напруги в мережах, збільшені коефіцієнта потужності, надійності та електробезпеці прийнятих систем живлення.

Говоров Ф.П., Король О.В., Романова Т.И.

Повышение эффективности обеззараживания воды в системах водоснабжения городов

В статье рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности обеззараживания воды в системах водоснабжения городов, основанный на использовании ультрафиолетовых светодиодных источников света и выполнении системы электроснабжения на постоянно-переменном токе. Предложен ряд схем питания постоянно-переменнім током и определены наиболее эффективные из них. Показано, что применение симметрирующего тиристорного регулятора напряжения в качестве ис-

точника постоянного тока, позволяет регулировать напряжение и симметрировать нагрузки, при значительном уменьшении потерь и расхода электроэнергии, а также уровня высших гармонических составляющих тока и напряжения в сетях, увеличении коэффициента мощности, надежности и электробезопасности принятых систем питания.

Govorov P., Korol O., Romanova T.

Improving efficiency water disinfection in the city water supply system

The article deals with the energy efficiency of disinfection of water supply systems of cities, based on the use of UV LED light source and the power supply system to the ever-alternating current. A number of power supply circuits peremennim constant-current, and identify the most effective ones. It is shown that the use of balancing thyristor voltage regulator as a constant current source, allows you to adjust the voltage and symmetrize load, with a significant reduction of losses and energy consumption, as well as the level of the higher harmonic components of voltage and current in the networks, increasing the power factor, reliability and electrical systems adopted supply.

Калашніков В.І., Ткаченко С.М., Хижняк П.А.

Автономні мікрогрід-системи з відновлюваними джерелами енергії, як елемент концепції Smart Grid. Перспективи розвитку 374

Робота присвячена аналізу перспектив розвитку інтелектуальних енергосистем концепції Smart Grid, а також автономних мікрогрід-систем з відновлюваними джерелами енергії. Дано докладний опис навчально-наукового центру «Smart Grid - ДонНТУ», що включає фізичні моделі відновлювальних джерел енергії Запропоновано алгоритм функціонування системи енергоменеджменту автономної мікрогрід-системи ключовою особливістю, якої є прогнозування енергії. У процесі проведення наукових досліджень по створенню як стаціонарних, так і мобільних автономних енергоустановок виявлений спектр необхідних подальших комплексних наукових та практичних досліджень.

Калашников В.И., Ткаченко С.Н., Хижняк П.А.

Автономные микрогрид-системы с возобновляемыми источниками энергии, как элемент концепции Smart Grid. Перспективы развития

Работа посвящена анализу перспектив развития интеллектуальных энергосистем концепции Smart Grid, а также автономных микрогрид-систем с возобновляемыми источниками энергии. Дано подробное описание учебно-научного центра «Smart grid - ДонНТУ», включающего физические модели возобновляемых источников энергии Предложен алгоритм функционирования системы энергоменеджмента автономной микрогрид-системы ключевой особенностью, которой является прогнозирование энергии. В процессе проведения научных исследований по созданию как стационарных, так и мобильных автономных энергоустановок выявлен спектр необходимых дальнейших комплексных научных и практических исследований.

Kalashnikov V., Tkachenko S., Khyzhnyak P.

Autonomous micro-grid system with renewable energy sources as an element of Smart Grid conception. Development prospects

The paper analyzes the development prospects of the intellectual energy systems of the Smart Grid conception, as well as autonomous microgrid systems with renewable energy sources. The detailed description of educational and scientific center «Smart grid - DonNTU" including physical models of renewable energy sources. An algorithm for the autonomous functioning of the energy management system microgrid key feature of which is the prediction of energy. In the course of research on the creation of both stationary and mobile autonomous power installations revealed the spectrum required further comprehensive scientific and practical research.

Білецький О.О., Щерба А.А., Супруновська Н.І.

Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей.....379

Дослідження проведено для вирішення питання підвищення енергетичних характеристик кіл аперіодичного заряду суперконденсатора від джерела постійної напруги при змінюваних початкових напругах. Виконано аналіз енергетично оптимальних режимів заряду суперконденсатора. Обгрунтовано врахування впливу ненульових початкових умов по напрузі на коефіцієнт передачі енергії. Визначені умови мінімізації втрат в колах аперіодичного заряду суперконденсаторів. Бібл. 16, рис. 2, табл. 2.

Белецкий О.А., Щерба А.А., Супруновская Н.И.

Энергетические характеристики цепей апериодического заряда суперконденсаторов от аккумуляторных батарей

Исследование проведено для решения вопроса повышения энергетических характеристик цепей апериодического заряда суперконденсатора от источника постоянного напряжения при изменяемых начальных напряжениях. Выполнен анализ энергетически оптимальных режимов заряда суперконденсатора. Обоснованный учет влияния ненулевых начальных условий по напряжению на коэффициент передачи энергии. Определены условия минимизации потерь в цепях апериодического заряда суперконденсаторов. Библ. 16, рис. 2, табл. 2.

Biletsky O., Shcherba A., Suprunovska, N.

Power characteristics of the circuits of aperiodic charge of the supercapacitors from the batteries

The study was conducted to resolve the issue of increasing the power characteristics of aperiodic charge of the supercapacitor from a DC voltage, at changing of its initial voltages. The analysis of energetically optimal regimes of charge of the supercapacitor was made. The account of influence of non-zero initial conditions of voltage on the coefficient of energy transfer is proved. The conditions to minimize losses in electrical circuits of aperiodic charge of the supercapacitors are found.

Силовая электроника

Л.Е. Бахнов Л.Е., Панасенко В.Н.

Блок выпрямительный полупроводниковый модернизированный для электровозов.....385

Рассмотрена конструкция, применение модернизированного блока для электровозов. Проведен сравнительный анализ с аналогичным по назначению блоком ОАО «Выпрямитель», РФ.

Илл.3. Библ. 3 назв.

Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В.

Верификация расчета элементов и качественных показателей работы системы электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром 394

Настоящая статья посвящена моделированию системы электропитания, содержащей несколько идентичных нелинейных нагрузок в виде автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией и силового активного фильтра, подключенного параллельно одной из них.

Губаревич В.Н., Маруня Ю.В.

Однофазний широкосмуговий LMC-фільтр на вході випрямляча з ємнісним навантаженням 398

На основі математичної та фізичної моделей проведено порівняльну оцінку основних показників пасивних фільтрів, які поліпшують електромагнітну сумісність однофазних випрямлячів, що мають ємнісних фільтр на виході, з мережею живлення. Зроблено аналіз роботи LMC-фільтра за наявності в його складі додаткової обмотки, магнітнозв'язанної з основними. Показано доцільність використання таких фільтрів спільно з активними коректорами форми струму. Бібл.3, рис. 7, табл.2.

Губаревич В.Н., Маруня Ю.В.

Однофазный широкополосный LMC-фильтр на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой

На основе математической и физической моделей произведена сравнительная оценка основных показателей пассивных фильтров, улучшающих электромагнитную совместимость однофазных выпрямителей, имеющих емкостных фильтр на выходе, с питающей сетью. Произведен анализ работы LMC-фильтра при наличии в его составе дополнительной обмотки, магнитносвязанной с основными. Показана целесообразность использования таких фильтров совместно с активными корректорами формы тока. Библ.3, рис. 7, табл.2.

Gubarevich V., Marunya Yu.

Single phase widely- bandpass LMC-filter on the input rectifier with capacitive load

The comparative evaluation of the main indicators of passive filters, which are improving the electromagnetic compatibility of single phase rectifier with capacitive filter on the output, with a power line was done. The comparative evaluation was based on the mathematical and physical models. The analysis of operation LMC-filter at presence in its composition the additional winding which connected magnetically with the main was done. The expediency of the use of such filters in conjunction with the active corrector of the current form is shown. References 3, figures 7, tables 2.

Ивахно В.В., Замаруев В.В., Стысло Б.А., Винников Д.В., Чуб А.И., Косенко Р.А.

Обратимый двухзвенный преобразователь постоянного напряжения с разделенной коммутацией и с неизменным знаком входного и выходного напряжений 402

В работе описана схема и алгоритм управления силовыми ключами двухзвенного преобразователя постоянного напряжения в постоянное с трансформаторной гальванической развязкой (DC-DC конвертор). Первичное звено представляет собой автономный инвертор тока по мостовой схеме на полевых транзисторах, вторичное – полумостовой автономный инвертор напряжения также на полевых транзисторах. Специальный алгоритм управления ключами преобразователя (алгоритм разделенной коммутации) обеспечивает естественное (в нулях напряжения) включение и мягкое (снабберное) выключение транзисторов инвертора напряжения и естественное (в нулях тока) выключение и мягкое включение транзисторов инвертора тока. Обосновано, что при использовании в качестве ключей инвертора тока четырехквадрантных ключей (встречно-последовательно соединенные полевые транзисторы), помимо снижения статических потерь в ключах инвертора тока и сохранении преимуществ разделенной коммутации в смысле практического отсутствия динамических потерь в ключах, преобразователь позволяет обеспечить передачу энергии также с выхода на вход без изменения знака среднего напряжения на входе инвертора тока. Представлены результаты имитационного моделирования процессов в пакете PSIM 9 для преобразователя с входным напряжением (30 – 15 В), выходным (300 – 350) В, мощностью 275 Вт с частотой преобразования 100 кГц, подтверждающие теоретические предпосылки.

Садовой О.В., Сохіна Ю.В.

Модифікований принцип симетрії в розв'язанні задач аналітичного конструювання регуляторів 408

Приведено розв'язання задач аналітичного конструювання оптимальних регуляторів на основі концепций обернених задач динаміки та модифікації принципу симетрії. Встановлені однозначні зв'язки між параметрами об'єкта керування, видом і ваговими коефіцієнтами інтегральних функціоналів, прямими показниками якості процесів керування та функціями Ляпунова синтезованих замкнених електромеханічних систем. Структура і параметри законів оптимального керування визначаються в результаті розв'язання алгебраїчних рівнянь, а не граничних задач чи матричних рівнянь Ріккаті.

Садовой А.В., Сохина Ю.В.

Модифицированный принцип симметрии в решении задач аналитического конструирования регуляторов

Приведено решение задач аналитического конструирования оптимальных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и модификации принципа симметрии. Установлены однозначные связи между параметрами объекта управления, видом и весовыми коэффициентами интегральных функционалов, прямыми показателями качества процессов управления и функциями Ляпунова синтезированных замкнутых электромеханических систем. Структура и параметры законов оптимального управления определяются в результате решения алгебраических уравнений, а не граничных задач или матричных уравнений Риккати.

Sadovoy A., Sokhina Y.

The modified principle of symmetry in the task analytical designing of optimal regulators

The task analytical designing of optimum regulators on the basis of updating a principle of symmetry is performed. Relationship between controlled object's parametres, a kind and weight coefficients integrated functional, direct quality control processes index and Lyapunov's functions of the synthesised closed electromechanical systems are established. The structure and parametres of laws of optimum control are defined as a result of the decision of the algebraic equations, instead of boundary problems or matrix equations Rikkati.

Щур В.І.

Система керування енергопотоками в когенераційній автономній вітроенергоустановці 414

Задля покращення енергоефективності та зменшення питомої вартості автономних малопотужних вітроустановок (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання, що працюють на індивідуального споживача, запропонована когенераційна ВЕУ, яка має електричний і тепловий генератори. Останній за посередництвом регульованого магнітного поля перетворює механічну енергію в теплоту, яка накопичується в бойлері та використовується в побуті. У даній роботі розроблена та досліджена за

допомогою комп'ютерного симулювання дворівнева система керування енергопотоками в такій когенераційній ВЕУ. Запропонована система забезпечує повне корисне використання доступної для ВЕУ енергії вітру з максимально потужністю, рівною сумі потужностей двох генераторів, має пріоритет прямого використання та нагромадження електричної енергії, а також здійснює енергетичний менеджмент акумуляторних батарей.

Щур В.И.

Система управления энергопотоками в когенерационной автономной ветроэнергоустановке

С целью улучшения энергоэффективности и уменьшения удельной стоимости автономных маломощных ветроустановок (ВЭУ) с вертикальной осью вращения, работающих на индивидуального потребителя, предложена когенерационная ВЭУ, которая имеет электрический и тепловой генераторы. Последний посредством регулируемого магнитного поля превращает механическую энергию в теплоту, которая накапливается в бойлере и используется в быту. В данной работе разработана и исследована путем компьютерного симулирования двухуровневая система управления энергопотоками в такой когенерационной ВЭУ. Предложенная система обеспечивает полное полезное использование доступной для ВЭУ энергии ветра с максимальной мощностью, равной сумме мощностей двух генераторов, имеет приоритет прямого использования и накопления электрической энергии, а также осуществляет энергетический менеджмент аккумуляторных батарей.

Shchur V.

Control System of Energy Flows in Autonomous Cogeneration Wind Turbine

To improve energy efficiency and reduce the unit cost of autonomous low-power wind turbines (WT) with vertical axis of rotation, working on individual consumer, was proposed cogeneration WT, which has electric and heat generators. The last one converts mechanical energy into heat through an adjustable magnetic field. The accumulated heat energy is stored in the boiler and can be used in everyday life. In this paper we developed and investigated by computer simulation two-level management system of energetic flows in cogeneration WT. The proposed system provides maximum effective usage of available wind energy for such WT with a maximum capacity equal to the sum of powers of two generators. Also a benefit of such WT is a possibility of directly using or accumulating of electrical energy, performing energy management of the batteries in the same time.

Семененко Ю.О.

Комбінований активний фільтр послідовного типу з імпульсною системою керування при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження 420

У статті приведені результати аналізу динамічних процесів комбінованого активного фільтра послідовного типу при формуванні зворотного зв'язку за струмом навантаження, що застосовується для поліпшення якості електричної енергії на виході тягової підстанції постійного струму. Для аналізу динамічних властивостей комбінованого активного фільтра послідовного типу було розглянуто його структурну та еквівалентну схему, а також схему сигнального графу. В запропонованій схемі фільтра компенсація пульсуючої складової здійснюється за рахунок внесення в коло пасивної ланки напруги компенсації, яка формується каналом зворотного зв'язку системи автоматичного регулювання. Проаналізувавши рівняння для визначення пульсуючої напруги на шунті, було зроблено висновки, що збільшення контурного коефіцієнта передачі зменшує пульсуючу складову на навантаженні.

Проведений аналіз динамічних властивостей комбінованого активного фільтра показав, що його застосування доцільно для покращення якості електричної енергії на виході тягової підстанції та тяговій мережі постійного струму. Це все відбувається за рахунок компенсації гармонійних складових напруги та струму в широкому діапазоні частот, чим й досягається необхідний рівень електромагнітної сумісності тягової мережі із суміжними електроустановками.

Семененко Ю.А.

Комбинированный активный фильтр последовательного типа с импульсной системой управления при формировании обратной связи по току нагрузки

В статье приведены результаты синтеза динамических процессов комбинированного активного фильтра последовательного типа при формировании обратной связи по току нагрузки, применяется для улучшения качества электрической энергии на выходе тяговой подстанции постоянного тока. Для анализа динамических свойств комбинированного активного фильтра последовательного типа были рассмотрены его структурная и эквивалентная схема, а также схема сигнального графа. В предложенной схеме фильтра компенсация пульсирующей составляющей осуществляется за счет внесения в цепь пассивного звена напряжения компенсации, которое формируется каналом обратной связи системы автоматического регулирования. Проанализировав уравнение для определения пульсирующего напряжения на шунте, были сделаны выводы, что увеличение контурного коэффициента передачи уменьшает пульсирующую составляющую на нагрузке.

Проведенный анализ динамических свойств комбинированного активного фильтра показал, что его применение целесообразно для улучшения качества электрической энергии на выходе тяговой подстанции и тяговой сети постоянного тока. Это все происходит за счет компенсации гармонических составляющих напряжения и тока в широком диапазоне частот, чем и достигается необходимый уровень электромагнитной совместимости тяговой сети со смежными электроустановками.

The results of the synthesis of dynamic processes of combined active filter series type in the formation of the current feedback load is applied to improve the quality of electrical energy output DC traction substation. To analyze the dynamic properties of the combined active filter series type were considered its structure and equivalent circuit diagram of the signal as well as a graph. In the proposed scheme, the filter compensation ripple at the expense of making the circuit of the passive link voltage compensation, which is formed channel feedback automatic control system. After analyzing the equation to determine the ripple voltage on the shunt, it was concluded that the increase in the loop gain reduces the ripple at the load.

The analysis of the dynamic properties of the combined active filter shown that its use is suitable for improving the quality of electrical power output and traction substation DC traction network. It all happens at the expense of compensation of harmonic components of voltage and current in a wide frequency range, and this is achieved the required level of electromagnetic compatibility with adjacent traction network installations.

Кіпенський А.В., Король Є.І.

Аналіз на координатній площині регулювальних характеристик імпульсних перетворювачів постійної напруги з регуляторами за вхідним збуренням 425

В роботі проведено порівняльний аналіз регулювальних характеристик імпульсних перетворювачів з широтно-імпульсним методом регулювання постійної напруги та мікропроцесорними системами імпульсного керування, що містять регулятори за вхідним збуренням різних типів.

Аналіз характеристик виконано графоаналітичним методом з використанням координатної площини.

Кипенский А.В., Король Е.И.

Анализ на координатной плоскости регулировочных характеристик импульсных преобразователей постоянного напряжения с регуляторами по входному возмущению

В работе проведен сопоставительный анализ регулировочных характеристик импульсных преобразователей с широтно-импульсным методом регулирования постоянного напряжения и микропроцессорными системами импульсного управления, содержащими регуляторы по входному возмущению различных типов.

Анализ характеристик выполнен графоаналитическим методом с использованием координатной плоскости.

Kipenskyi A., Korol I.

The analysis between controlling characteristics of pulsed DC voltage converters and input disturbance regulators on the coordinate plane

The paper presents the comparative analysis between regulation characteristics of pulsed DC voltage converters with the pulse-width modulation method of the DC voltage regulation and microprocessor-based impulse control systems containing regulators for input disturbance of different types. The analysis of characteristics is performed with the help of semigraphical method using the coordinate plane

Плахтій О.А.

Аналіз енергетичних характеристик активного трифазного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності при роботі з постійною частотою модуляції 430

Активні трифазні випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності мають суттєві переваги перед діодними та тиристорними випрямлячами, вони дозволяють реалізувати коефіцієнт потужності близький до одиниці, форму фазних струмів близьку до синусоїди, а також двонаправлену передачу потужності. Важливою складовою даного типа перетворювача є його система керування. Більшість існуючих систем керування основані на гістерезисній модуляції. Вагомим недоліком її є висока і змінна в часі частота комутації. У статті представлена система автоматичного керування активного трифазного випрямляча з двосторонньою широтно-імпульсною модуляцією. Перевагою ШІМ є можливість завдання і регулювання частоти модуляції, до зумовлює зниження динамічних втрат в IGBT ключах, до веде до збільшення КПД перетворювача.

Плахтий А.А.

Анализ энергетических характеристик активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности при работе с постоянной частотой модуляции

Активные трехфазные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности обладают рядом преимуществ по сравнению диодными и тиристорными выпрямителями, они позволяют реализовать коэффициент мощности близкий к единице, форму входных фазных токов близкую к синусоиде, а также двунаправленную передачу энергии. Важной составляющей преобразователя является система управления. Большинство существующих систем управления основаны на гистерезисной модуляции. Существенным ее недостатком является высокая и переменная во времени частота коммутации. В статье представлена система управления активного трехфазного выпрямителя с двусторонней широтно-импульсной модуляцией. Данный тип модуляции обладает рядом преимуществ в сравнении с гистерезисной модуляцией, а именно задание и регулирование частоты коммутации, что обуславливает снижение динамических потерь в IGBT ключей и повышение КПД преобразователя.

Plakhtiy A.

Analysis of energy characteristics of three phase active rectifier with power factor correction with pulse width modulation

Three phase active rectifiers with power factor correction have several advantages in comparison with diode and thyristor rectifier, they implement unity power factor, sinusoidal phase currents as well as bidirectional power transmission. An important component is the active rectifier control system. The majority of existing control systems are based on hysteresis modulation. A significant its drawback is a high and variable switching frequency. The article presents the control system of the active three-phase rectifier based on pulse-width modulation. This type of modulation has several advantages in comparison with a hysteresis modulation: setting and adjustment of the switching frequency, which leads to reduction of dynamic losses in IGBT keys and increasing of converter efficiency.

Ламанов С.Л., Перетятко Ю.В., Бєлянін Р.В.

Використання регульованого магнітного зв'язку в індукційних установках з напівпровідниковим послідовним резонансним однокомірковим інвертором 435

Підтверджено ефективність використання регульованого магнітного зв'язку між контурами індукційного навантаження та напівпровідникового резонансного інвертора для гальванічної розв'язки навантаження від промислової мережі електроживлення та узгодження інвертора з навантаженням при зміненні його активного опору. Бібл. 8, рис. 7, табл. 1

Ламанов С.Л., Перетятко Ю.В., Белянин Р.В.

Использование регулированной магнитной связи в индукционных установках с полупроводниковым последовательным резонансным однозвенным инвертором

Подтверждена эффективность использования регулированной магнитной связи между контурами индукционной нагрузки и полупроводникового резонансного инвертора для гальванической развязки нагрузки от промышленной сети электропитания и согласования инвертора с нагрузкой при изменении его активного сопротивления. Бібл. 8, рис. 7, табл. 1.

Lamanov S., Peretyatko Yu., Belyanin R.

Use of the controlled magnetic coupling in induction installations with semi-conductor series resonant single-link inverter

Efficiency of use of the controlled magnetic coupling between contours of induction load and the semi-conductor resonant inverter for a galvanic decoupling of load from an industrial power network and for inverter with load at change of its ohmic resistance is confirmed. References 8, Figures 7, Table 1.

Омельченко О.В., Козлов В.С.

Силовий активний фільтр із системою екстремального регулювання 439

Стаття присвячена модернізації способу управління силовим активним фільтром (САФ). Основна ідея роботи полягає у застосування методів екстремального керування для синтезу нової цифрової системи керування САФ. В ході практичних дослідів було встановлено, що існує деякий рівень напруги на ємності в ланці постійного струму САФ, якому відповідає найкраща з точки зору показників якості електроенергії (ПЯЕ) робота коректора. Використовуючи вищенаведений факт за-

пропоновано нову систему керування з екстремальним регулятором та варіанти цільових функцій, мінімізуючи (максимізуючи) які досягається налаштування САФ на оптимальний з точки зору ПЯЕ режим роботи.
В статті наведено результати фізичного моделювання САФ із системою керування, заснованою на запропонованому математичному апараті, які підтверджують працездатність останнього.

Омельченко А.В., Козлов В.С.

Силовой активный фильтр с системой экстремального регулирования

Статья посвящена модернизации способа управления силовым активным фильтром (САФ). Основная идея работы заключается в применении методов экстремального управления для синтеза новой цифровой системы управления САФ. В ходе практических экспериментов было установлено, что существует некоторый уровень напряжения на ёмкости в звене постоянного тока САФ, которому соответствует наилучший с точки зрения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) режим работы корректора. Используя вышеприведенный факт, предложена новая система управления с экстремальным регулятором и варианты целевых функций, минимизируя (максимизируя) которые достигается настройка САФ на оптимальный с точки зрения ПКЭ режим работы.
В статье приведены результаты физического моделирования САФ с системой управления, основанной на предложенном выше математическом аппарате, которые подтверждают работоспособность последнего.

Omel'chenko A., Kozlov V.

Power active filter with extremum-seeking control system

The article is dedicated to the modernization of the controlling method for the power active filter (PAF). The basic idea is to use extremum seeking control methods for the synthesis of a new digital control system for PAF. In the course of practical experiments, it was found that there is some level of voltage of the DC-link PAF capacitor which allows to use PAF in the best regime in terms of power quality indexes. Using the above fact it was proposed a new control system with extreme regulator and various target functions for the last one.
The article contains the results of physical modeling of PAF with new control system based on the proposed mathematical apparatus to confirm the efficiency of the last one.

Щербак Я.В., Ивакина К.Я., Панченко В.В.

Імпульсна модель випрямляча із двосторонньою широтно-імпульсною модуляцією в режимі безперервного струму443

В роботі розглянуті динамічні властивості випрямляча з регулюванням середнього значення вихідної напруги за допомогою двосторонньої широтно-імпульсної модуляції. Динамічні характеристики досліджені шляхом виділення інформаційної складової вихідної координати при безкінечно малих приростах керуючого діяння з подальшим розкладом її, з застосуванням методу узагальненого диференціювання, в ряд Тейлора. Одержані аналітичні залежності, що установлюють зв'зок між приростами вхідного діяння і вихідної напруги.. Установлено, що для безкінечно малих приростів вхідного діяння випрямляч з двохсторонньою широтно-імпульсною модуляцією являє собою амплітудно - імпульсний модулятор другого роду зі змінними величинами статичного та динамічного коефіцієнтів передачі. Бібл. 10, рис.3.

Щербак Я.В., Ивакина Е.Я., Панченко В.В.

Импульсная модель выпрямителя с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией в режиме непрерывного тока

В работе рассмотрены динамические свойства выпрямителя с регулированием среднего значения выходного напряжения с помощью двухсторонней широтно-импульсной модуляции. Динамические характеристики исследованы путем выделения информационной составляющей выходной координаты при бесконечно малых приращениях управляющего воздействия с дальнейшим разложением, с применением метода обобщенного дифференцирования, в ряд Тейлора. Получены аналитические зависимости, устанавливающие связь между приращениями входного воздействия и выходного сигнала.. Установлено, что для бесконечно малых приращений входного воздействия выпрямитель с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией представляет собой амплитудно - импульсный модулятор второго рода с переменными значениями статического и динамического коэффициентов передачи.Полученная импульсная модель позволяет анализировать динамические процессы систем регулирования с выпрямителем управляемым с помощью ШИМ. Библ.10, рис.3.

Shcherbak Y., Ivakin C., Panchenko V.

V work the dynamic properties of the rectifier to regulate the average value of the output voltage with double sided PWM. The dynamic characteristics are studied by extracting the information component of the output coordinate with the infinitely small increments of control action with the further expansion, using the method of generalized differentiation, Taylor series. Analytical dependences of establishing a link between the impact of incremental input and output .. It is established that for infinitesimal increments input rectifier with two way effects pulse width modulation is amplitude - pulse modulator second order with variable coefficients of static and dynamic impulse peredachi.Poluchennaya model allows us to analyze the dynamic processes control systems with rectifier controlled via PWM. Bibl.10, Figure 3.

Кушнір А. П., Оксентюк В. М., Стефанович Т. О., Щербовських С. В.

Модель надійності для аналізу причин непрацездатності системи повороту платформи пожежного автопідйомника449

Запропоновано математичну модель надійності системи повороту платформи, яка призначену для аналізу причин непрацездатності такої системи. Модель адекватно враховує вплив зміни навантаження елементів системи залежно від стану приводу. Зміну навантаження формалізовано динамічним деревом відмов, а ймовірнісні характеристики визначені за марковською моделлю. Одержані результати є основою для розроблення заходів щодо підвищення надійності досліджуваної системи.

Кушнир А. П., Оксентюк В. Н., Стефанович Т. А., Щербовських С. В.

Модель надежности для анализа причин неработоспособности системы поворота платформы пожарного автоподъемника

Предложено математическую модель надежности системы поворота платформы, предназначенную для анализа причин неработоспособности такой системы. Модель адекватно учитывает влияние изменения нагрузки элементов системы в зависимости от состояния привода. Изменение нагрузки описано динамическим деревом отказов, а вероятностные характеристики определены на основе марковской модели. Полученные результаты являются основой для разработки мероприятий по повышению надежности исследуемой системы.

Kushnir A., Oksentyuk V. Stefanovych T., Shcherbovskykh S.

Reliability model for failure cause analysis of platform rotating system for fire autolift

A mathematical reliability model for platform rotating system for failure cause analysis is suggested. The model adequately takes into account load-sharing effect of system component depending on drive state. Load-sharing are formalized by dynamic fault tree and probability characteristics are calculated based on Markov model. Obtained results can be the basis for recommendation developing for reliability improving of the system.

Ягуп В.Г., Ягуп К.В.

Електроживлення асинхронного двигуна в системі з силовим активним фільтром, що керований за оптимізаційним алгоритмом 453

*Р*озглядається система електропостачання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання здійснюється за допомогою силового активного фільтра. З використанням моделі системи електропостачання та системи автоматичної стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі реалізований пошук оптимальних умов компенсації реактивної потужності при заданих умовах роботи асинхронного двигуна

Ягуп В.Г., Ягуп Е.В.

Электропитание асинхронного двигателя в системе с силовым активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму

Рассматривается система электроснабжения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Компенсация реактивной мощности в системе электроснабжения осуществляется при помощи силового активного фильтра. С использованием модели системы электроснабжения и системы автоматической стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе реализован поиск оптимальных условий компенсации реактивной мощности при заданных условиях работы асинхронного двигателя

Yagup V., Yagup E.

Power supply in the system of asynchronous engines with the power active filter ruled over optimization algorithm

Power supply system of the asynchronous squirrel cage induction motor is considered. Power factor correction in the power supply system is carried out by means of an active filter circuit. Using the model of power supply system and the system of automatic stabilization of voltage on the storage capacitor implemented the search for optimal conditions for reactive power compensation for given operating conditions, of the induction motor

Супруновська Н.І., Щерба А.А., Іващенко Д.С., Білецький О.О.

Залежність енергоефективності ланцюгів розряду суперконденсаторів на лінійне активне навантаження від умов переривання розрядних струмів 458

Досліджено процеси розряду конденсаторів, як з лінійною, так і з нелінійною, залежною від напруги ємністю на активне навантаження, опір якого залишається незмінним. Встановлено закономірності впливу тривалості розрядного процесу на енергетичні характеристики (енергію втрат і коефіцієнт корисної дії (ККД) при передачі енергії в навантаження) таких ланцюгів. Визначено умови зменшення втрат електроенергії й збільшення ККД її передачі в навантаження від лінійного й нелінійного суперконденсатора. Бібл. 14, рис. 2, табл. 2.

Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А.

Зависимость энергоэффективности цепей разряда суперконденсаторов на линейную активную нагрузку от условий прерывания разрядных токов

Исследованы процессы разряда конденсаторов, как с линейной, так и с нелинейной, зависящей от напряжения емкостью на активную нагрузку, сопротивление которой остается неизменным. Установлены закономерности влияния длительности разрядного процесса на энергетические характеристики (энергию потерь и коэффициент полезного действия (КПД) при передаче энергии в нагрузку) таких цепей. Определены условия уменьшения потерь электроэнергии и увеличения КПД ее передачи в нагрузку от линейного и нелинейного суперконденсатора. Библ. 14, рис. 2, табл. 2.

Suprunovska N., Shcherba A., Ivashchenko D., Beletsky O.

Dependence of power efficiency on interruption conditions of discharge currents at supercapacitor discharge on the linear resistive load

The processes of discharge of capacitors with both linear and non-linear, voltage-dependent capacitance on the the active load, the resistance of which remains invariable are investigated. The regularities of influence of discharge process duration on power characteristics (energy of losses and efficiency factor (EF) at an energy transfer in load) such circuits are determined. The conditions of decrease of the electric power losses and increase of EF its transfer to load from the linear and nonlinear supercapacitor are defined.

Бєлоха Г.С., Самчелєєв Ю.П., Дрючин В.Г.

Вплив дестабілізуючих факторів на роботу джерел живлення з релейним керуванням 463

У роботі розглядається вплив зовнішніх і внутрішніх збурень на роботу джерел живлення з релейним керуванням. Отримано графіки залежностей THD вхідного струму від зміни параметрів системи.

Белоха Г.С., Самчелеев Ю.П., Дрючин В.Г.

Влияние дестабилизирующих факторов на работу источников питания с релейным управлением

В работе рассматривается влияние внешних и внутренних возмущений на работу источников питания с релейным управлением. Получены графики зависимостей THD входного тока от изменения параметров системы.

Belokha G., Samcheliev Yu., Dryuchin V.

Influence of the destabilizing factors in the operation of the source supply with a relay control

The paper examines the influence impact of external and internal disturbances in the power supply operation with relay control. Obtained dependence of THD input current from changing system parameters.

Панкова О.О.

Аналіз ефективності роботи електромеханічної системи веу при зміні швидкості вітрового потоку 467

Аналізується ефективність роботи електромеханічної системи ВЕУ при поривчастому характері швидкості вітрового потоку. Отримано графік залежності виробки від динамічного моменту при різній тривалості пориву вітру. Встановлено існування оптимального динамічного моменту для певної тривалості пориву вітру. У результаті порівняльного аналізу двох алгоритмів керування електромеханічною системою ВЕУ виявлено, що не доцільне використання моменту генератора в руховому режимі при розгоні.

Панкова О.О.

Анализ эффективности работы электромеханической системы вэу при изменении скорости ветрового потока
Анализируется эффективность работы электромеханической системы ВЭУ при порывистом характере скорости ветрового потока. Получен график зависимости выработки от динамического момента при разной длительности порыва ветра. Установлено существование оптимального динамического момента для определенной длительности порыва ветра. В результате сравнительного анализа двух алгоритмов управления электромеханической системой ВЭУ выявлено, не целесообразность использования момента генератора в двигательном режиме при разгоне.

Pankova O.

Performance analysis of electromechanical systems of wind turbines when the speed of the wind flow
We analyze the efficiency of the electromechanical system the wind turbine at gusty nature of the speed of the wind flow. Received a graph of the dynamic development of the moment when a gust of wind of varying duration. The existence of an optimum dynamic torque for a particular duration of a gust of wind. A comparative analysis of the two control algorithms electromechanical system wind turbine revealed without the usefulness of the time generator in motor mode during acceleration.

Саратовський Р.М., Ушаков В.І., Ушаков Д.В.

Аналіз результатів моделювання режимів роботи багатокоміркового джерела живлення для індукційного нагріву 471
Розглядаються результати дослідження на імітаційній моделі динамічних режимів роботи багатокоміркового джерела живлення для установок індукційного нагріву. Наведено аналіз результатів моделювання роботи джерела живлення в режимі стабілізації вихідної напруги при різкому зменшенні і збільшенні вхідної напруги живлення, при зміні сигналу завдання та при зміні параметрів навантаження

Саратовский Р.Н., Ушаков В.И., Ушаков Д.В.

Анализ результатов моделирования режимов работы многоячейкового источника питания для индукционного нагрева
Рассматриваются результаты исследования на имитационной модели динамических режимов работы многоячейкового источника питания для установок индукционного нагрева. Приведен анализ результатов моделирования работы источника питания в режиме стабилизации выходного напряжения при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения, при изменении сигнала задания и при изменении параметров нагрузки

Saratovskyy R., Ushakov V., Ushakov D.

Modeling results analysis modes multicell power supply for induction heating
The results of the study on the simulation model of dynamic modes multicell power supply for induction heating. The analysis of the results of simulation of the power supply mode of output voltage stabilization with a sharp decrease and increase in the input voltage, changing the frequency reference and change the parameters of the load.

Діденко В.О., Бондаренко О.Ф.

Якість функціонування системи керування гідроприводом механізму хитання кристалізатора МБЛЗ.....477
Проведена оцінка показників якості функціонування системи керування гідроприводом механізму хитання кристалізатору МБЛЗ на основі його математичної моделі. Виконано аналіз факторів, що впливають на ці показники та визначено найбільш вагомі. Отримано залежність впливу цих факторів на показники якості, що дозволяє визначити межі працездатного стану таких систем. Обгрунтовано та сформульовано вимоги до точності підтримки амплітуди закону руху кристалізатора МБЛЗ даними системами.

Диденко В.А., Бондаренко А.Ф.

Качество функционирования системы управления гидроприводом механизма качания кристаллизатора МНЛЗ
Проведена оценка показателей качества функционирования системы управления гидроприводом механизма качания кристаллизатора МНЛЗ на основе его математической модели. Выполнен анализ факторов, которые влияют на эти показатели и определены наиболее значимые. Получено зависимость влияния этих факторов на показатели качества, что позволяет определить границы работоспособного состояния таких систем. Обосновано и сформулировано требования к точности поддержания амплитуды закона движения кристаллизатора МНЛЗ такими системами.

Didenko V., Bondarenko O.

The quality of functioning control system for hydraulic drive of mold oscillation mechanism
The quality parameters of the control system for hydraulic drive mould oscillation mechanism are estimated on base her mathematical model. The analysis of the factors that influence on these parameters are made. The most important parameters are identified. The dependence of influence this factors on quality parameters are obtained. It is determines the limits of operating state of such systems. The accuracy requirements of amplitude waveform of mold movement of such systems are grounded and formulated.

Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Король О.В.

Підвищення надійності роботи вольтододавальних трансформаторів з електронним управлінням у складі ESS.....481
У статті розглянуті питання підвищення надійності роботи вольтододавальних трансформаторів з електронним управлінням, які використовуються в якості активних елементів ESS, і виконують функції автоматичної корекції параметрів режиму електричних мереж. На основі аналізу електромагнітних процесів розроблені схеми та математичні моделі трансформатора в квазіусталених режимах, а також визначено умови надійної роботи електронних елементів в цих умовах. Запропоновано шляхи підвищення надійності роботи трансформаторів із включенням тиристорів в ланцюзі його первинної обмотки.

Говоров Ф.П., Говоров В.П., Король О.В.

Повышение надежности работы вольтодобавочных трансформаторов с электронным управлением в составе ESS
В статье рассмотрены вопросы повышения надежности работы вольтодобавочных трансформаторов с электронным управлением, которые используются в качестве активных элементов ESS, и выполняют функции автоматической коррекции параметров режима электрических сетей. На основе анализа электромагнитных процессов разработаны схемные и математические модели трансформатора в квазиустановившихся режимах, а также определены условия надежности работы электронных элементов в этих условиях. Предложены пути повышения надежности работы трансформаторов с включением тиристоров в цепи его первичной обмотки.

Govorov P., Govorov V., Korol O.

Improving the rebiability work booster transformers with electronic control in part of ESS
The paper deals with improving the reliability of booster transformers with electronic control, which are used as active elements of ESS, and perform the automatic correction mode parameters of electric networks. Based on the analysis of electromagneyic proc-

esses designed circuit and transformer mathematical models in guasi-steady conditions, as well as the conditions identified reliable operation of electronic components in these conditions. Ways of improving the reliability of transformers connected thyristors in the chain of its primary winding.

Щерба М.А.

Вплив характеру розподілу вологи у ЗПЕ ізоляції кабелів на електрофізичні процеси її деградації 485

Проведено розрахунок і аналіз розподілу електричного поля в локальному об'ємі зшитої поліетиленової ізоляції біля "хмари" близько розташованих мікровключень. Обґрунтовано, що дроблення мікровключень призводить до збільшення розмірів "хмари" вздовж поля, зростання величини сумарного напруженого об'єму ізоляції, появи багатьох областей з пульсуючими тисками і напруженостями поля близькими до своїх максимальних значень. Враховувалися нелінійні властивості полімерної ізоляції в сильних електричних полях, а саме залежності її питомої провідності від напруженості електричного поля. Це дозволяє врахувати зростання густини струму провідності в діелектрику, його локальні перегріви, погіршення електричної і механічної міцності, і як наслідок зменшення ресурсу поліетиленової ізоляції. Бібл. 20, рис. 3.

Щерба М.А.

Влияние характера распределения влаги в СПЭ изоляции кабелей на электрофизические процессы ее деградации

Проведен расчет и анализ распределения электрического поля в локальном объеме сшитой полиэтиленовой изоляции вблизи "облака" близко расположенных микровключений. Обосновано, что дробление микровключений приводит к увеличению размеров "облака" вдоль поля, росту величины суммарного напряженного объема изоляции, появлению множества областей с пульсирующими давлениями и напряженностями поля близкими к своим максимальным значениям. Учитывались нелинейные свойства полимерной изоляции в сильных электрических полях, а именно зависимости ее удельной проводимости от напряженности электрического поля. Это позволяет учесть рост плотности тока проводимости в диэлектрике, его локальные перегревы, ухудшение электрической и механической прочности, и как следствие уменьшение ресурса полиэтиленовой изоляции. Библ. 20, рис. 3.

Shcherba M.

The influence of moisture distribution in the XLPE cable insulation on electrophysical process of its degradation

The calculation and analysis of electric field distribution in the local volume of cross-linked polyethylene insulation near the "cloud" of closely spaced micro-inclusions were made. It was proved, that fragmentation of micro-inclusions increases the "cloud" size along the field, total tensed volume size, leads to the appearance of many areas with pulsating pressure and field tension close to their maximum values. We took into account nonlinear properties of polymeric insulation in strong electric fields, namely the dependence of the electric field specific conductivity. This allows you to take into account the conductivity current density increase in dielectric, its local overheating, deterioration of the electrical and mechanical strength, and as a result reduce of the polyethylene insulation resource

Павлов Г. В., Обрубов А. В., Вінниченко І. Л.,

Перетворювач частоти на основі резонансного інвертора з нелінійним регулюванням 490

Розроблено спосіб нелінійного управління резонансним інвертором, що входить до складу дволанкового перетворювача частоти. Визначені комутаційні послідовності основних та додаткових ключів інвертора. Розроблено алгоритм управління резонансним інвертором. Проведено імітаційне моделювання резонансного інвертора з нелінійним регулюванням, що здійснюється за запропонованим алгоритмом.

Павлов Г. В., Обрубов А. В., Винниченко И. Л.,

Преобразователь частоты на основе резонансного инвертора с нелинейніым управлением

Разработан способ нелинейного управления резонансным инвертором, входящим в состав двухзвенного преобразователя частоты. Определены коммутационные последовательности основных и дополнительных ключей инвертора. Разработан алгоритм управления резонансным инвертором. Проведено имитационное моделирование резонансного инвертора с нелинейным регулированием, которое осуществляется по предложенному алгоритму.

Pavlov G., Obrubov A., Vinnichenko I.

Frequency converter based on the resonant inverter with non-linear control

A method af a resonant inverter, as a part of the frequency converter, non-linear control was developed. The switching sequence for basic and additional keys of the inverter was defined. The algorithm of the resonant inverter control was designed. A simulation of the resonant inverter with a nonlinear control, performed by using the proposed algorithm, was conducted.

Мустафа Г.М., Гусев С.И., Ершов А.А., Луганская И.Б.

Модульные многоуровневые преобразователи для симметрирования и фильтрации сетевого напряжения в окрестности тяговой подстанции переменного тока 495

Рассматриваются вопросы использования опытного образца активного фильтра, выполненного по схеме многоуровневого модульного преобразователя напряжения (ММС), для обеспечения симметрирования и фильтрации напряжения на шинах подстанции, питающей тяговые подстанции железной дороги переменного тока. Приведены результаты испытаний опытного образца активного фильтра. Рассмотрена методика и результаты расчёта несимметрии и искажений на шинах 110 кВ ПС «Сковородино» при действии АФСУ на базе ММС.

Mustafa G., Gusev S., Ershov A., Luganskaya I.

Modular multilevel converters for balancing and filtering of the mains voltage in the vicinity of traction substation ac.

Questions of use of a prototype of the active filter executed according to the scheme of the modular multilevel converter (MMS) for balancing and a filtration of voltage on tires of the substation feeding traction substations of the railroad of alternating current are considered. Results of tests of a prototype of the active filter are given. The technique and results of calculation of asymmetry and voltage waveform distortion on tires of 110 kV of PS "Skovorodino" under operation of the active filter on the basis of a MMS is considered.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеевский Дмитрий Геннадиевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Электронных систем Запорожской государственной инженерной академии, г. Запорожье; e-mail: signald@mail.ru
В 1993 г. закончил Запорожский индустриальный институт по специальности "Промышленная электроника". Работал в должности инженера КБ "Электроавтоматика" (г. Запорожье) в области разработки систем энергоснабжения космических аппаратов. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Электромеханическая система ВЭУ на базе сверхсинхронного вентильного каскада". Имеет более 60 научных публикаций. Направление научной работы - электромеханические системы ветроэнергетических установок с переменной угловой скоростью вращения

Анищенко Николай Васильевич,
к.т.н., доцент, проф. НТУ «ХПИ», кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», 70-76-445, e-e-mail: annikolay@yandex.ru
В 1982 г. окончил ХПИ, в 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию, с 1994 – доцент

Антоненко Андрій Олегович
ДВНЗ «Криворізький національний університет», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті.
drunia90@mail.ru
Закінчив Криворізький технічний університет в 2013 році за спеціальністю «Електричний транспорт» (роки навчання: 2008-2013). У 2013 р. поступив до аспірантури ДВНЗ «Криворізький національний університет» за спеціальністю «Електротехнічні комплекси та системи».

Артеменко Артем Николаевич
старший преподаватель кафедры Системы автоматического управления и электропривод, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., Украина, 39600. Тел(0536)3-11-47
E-mail: a.m.artemenko@gmail.com

Бакан Сергей Аркадьевич
Место работы: ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», конструкторско-производственный центр «НКМЗ-Автоматика».
Должность: главный конструктор АСУ ТП.
Адрес предприятия: ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»,
Адрес электронной почты: bakan@nkmz.donetsk.ua

Балтер Ян Семенович
Место работы: АО НПП «Укрэлетекс», г.Харьков
Должность: главный специалист.
Адрес электронной почты: ianbalt@mail.ru

Банев Евгений Фёдорович
В 2007 году с отличием закончил магистратуру кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Энергосберегающий электропривод эскалатора метрополитена с фаззи-управлением».
Старший преподаватель кафедры АЭМС НТУ «ХПИ».

Барский Виктор Алексеевич
Окончил ХПИ в 1957 г. по специальности «Электрические машины и аппараты».
В 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Раздельное управление реверсивными автоматизированными электроприводами».
В 1990 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Реверсивные системы соизмеримой мощности».
С 1957 г. по 1960 г. и 1963 г. по 1980 г. работал на ХЭМЗе и в НИИ ХЭМЗ в должностях старшего инженера, руководителя группы, заведующего лабораторией, заведующего отделом.
С 1960 г. по 1963 г. УГПИ «Тяжпромэлектропроект», старший инженер.
С 1980 г. по 2000 г. Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент, затем профессор, руководитель межкафедральной НИЛ.
С 2000 г. по настоящее время – Международный Консорциум «Энергосбережение». Председатель Правления – Главный конструктор, доктор технических наук, профессор

Бартецький Андрій Анатолійович
Місце роботи: Україна, Вінниця, Вінницький національний технічний університет
Посада: асистент кафедри, аспірант.
E-mail: bartetskyy@gmail.com
Аспірант кафедри Електромеханічні системи автоматизації в промисловості і на транспорті, асистент.
У 2008 р вступив до Вінницького національного технічного університету, інститут електроенергетики та електромеханіки, факультет електромеханіки, електроспоживання та енергетичного менеджменту, за напрямом підготовки 6.050702 – Електромеханіка.
У 2012 р. закінчив бакалаврат за вказаною спеціальністю отримав диплом бакалавра з електромеханіки. Тема БДР : «Розробка мікропроцесорного пристрою плавного пуску асинхронного двигуна». Керівник роботи – к.т.н., Проценко Д. П.
В 2013 році закінчив магістратуру спеціальності 8.05070204 – електромеханічні системи автоматизації та електропривод, та отримав диплом магістра електромеханіки. Тема роботи " Модель та засіб діагностування гальмівних кіл перетворювача частоти ". Науковий керівник – к.т.н., доцент Левицький С.М
З 2014 року навчаюсь в аспірантурі з відривом від виробництва Вінницького національного технічного університету за спеціальністю 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи. Тема дисертації "Методи та засоби діагностування гальмівних кіл частотно-керованих асинхронних електроприводів".

Бахнов Леонид Евгеньевич
родился г. Днепропетровске.
После окончания школы и службы в армии в 1960 году поступил в Харьковский политехнический институт. В 1965 году окончил обучение по специальности «промышленная электроника». С 1972 года работает в Государственном предприятии «Научно-исследовательский институт «ХЕМЗ». В 1989 году защитил кандидатску диссертацию по специальности «электрические и полупроводниковые преобразователи» (05.09.12) Автор 83 научных публикаций, в т.ч. 38 авторских свидетельств и патентов

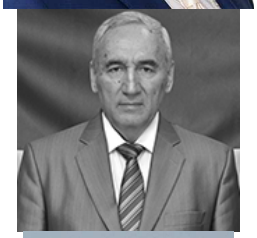
Белецкий Олег Александрович
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», аспирант, ассистент кафедры теоретической электротехники, E-mail: biletsky27@gmail.com
В 2011 году с отличием закончил факультет электроэнергетики и автоматики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». С 2012 года работает ассистентом и обучается в аспирантуре на кафедре теоретической электротехники НТУУ «КПИ».

Белов Н.С.
соискатель кафедры «Автоматизация энергосистем», НТУ «ХПИ»

Белоха Галина Сергеевна
Старший преподаватель кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета. В 2010 году окончила магистратуру Донбасского государственного технического университета по специальности «Электронные системы»

Білянін Роман Володимирович
начальник виробництва ПАТ "Завод "Південкабель", м. Харків.
У 2004 р. у НТУ "ХПІ" отримав диплом спеціаліста за спеціальністю "Обладнання для обробки металів тиском", у 2010 р. у цьому ж вузі здобув кваліфікацію інженера-електрика за спеціальністю "Техніка і електрофізика високих напруг".
Наукові інтереси – моделювання та оптимізація енергетичних процесів у технологічних лініях промислового виготовлення кабельно-провідникової продукції ПАТ "Завод "Південкабель".

Благодір Віталій Олегович
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу,
пр. Перемоги, 37,
м. Київ, Україна, 03056,
v.blagodir@kpi.ua

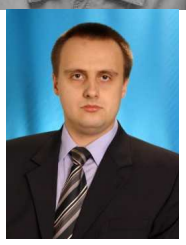


Блинцов Владимир Степанович,
д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры электрооборудования судов и информационной безопасности Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова,
заведующий кафедрой электрооборудования судов и информационной безопасности,
проректор по научной работе Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова,
тел.: (0512) 431174
E-mail: volodymyr.blintsov@nuos.edu.ua

Боднар Денис Олександрович
Студент 6-го курсу кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ».

Бойко Сергій Миколайович
кандидат технічних наук (2014 р.), старший викладач кафедри «Систем електропостачання та енергетичного менеджменту» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Автор 57 наукових праць, у т.ч. 4 підручників, навчальних посібників і монографій.
E-mail: bsn1987@i.ua

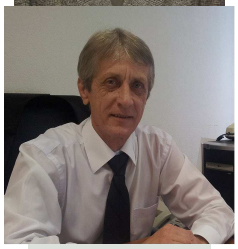
Бондаренко Олександр Федорович
канд. техн. наук, доц., докторант каф. промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056



Босий Дмитро Олексійович
доцент кафедри «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДІІТ), кандидат технічних наук, доцент.
ел. пошта: dake@i.ua
Автор більше 50 наукових робіт, 1 монографії та більше 40 навчально-методичних робіт, 4 патентів на винаходи. Коло наукових інтересів: якість електричної енергії, режими напруги і компенсація реактивної потужності в системах тягового електропостачання постійного та змінного струму.

Бур'ян Сергій Олександрович
Доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода (АЕМС-ЕП) Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" (НТУУ "КПІ").
E-mail: SBuryan18@gmail.com
Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ». Закінчив НТУУ «КПІ» за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» - магістр електромеханіки у 2008 році. З 2008 року і понині працює асистентом кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, 2008 рік – член міжнародного товариства IEEE. Має близько 30 наукових публікацій. У 2013 році захистив кандидатську дисертацію. Основна тематика досліджень – енерго- та ресурсозбереження в електромеханічних системах автоматизації насосних установок водопостачання. Викладає дисципліни «Автоматизація технологічних процесів, установок і комплексів», «Автоматизовані системи управління технологічними процесами» та «Теорія керування процесами».

Буряковский Сергей Геннадьевич
Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, к.т.н., доцент кафедры «АСЭТ».
Украина, Харьков, 61050, площадь Фейербаха, 7
sergbyr@i.ua

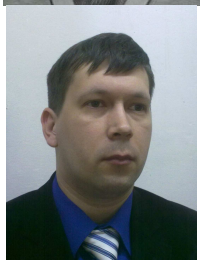


Верешко Виктор Петрович
Место работы: ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», конструкторско-производственный центр «НКМЗ-Автоматика».
Должность: начальник конструкторско-производственного центра «НКМЗ-Автоматика».
Адрес предприятия: ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»,
Адрес электронной почты: vereshko@nkmz.donetsk.ua.

Винников Дмитрий Валерьевич
проф. Таллиннского технического университета, Эстония
получил степень специалиста, магистра и доктора технических наук в электротехнике в Таллиннском Техническом Университете в 1999, 2001 и 2005 года соответственно. Сейчас он возглавляет Группу силовой электроники на кафедре электротехники Таллиннского Технического Университета. Д. Винников является соавтором более 150 опубликованных статей в области силовой электроники, а также нескольких патентов и полезных моделей в этой области. Его научные интересы включают: импульсные преобразователи, моделирование силовых систем, прикладное проектирование силовых преобразователей и систем управления, а также внедрение и разработка систем
dmitri.vinnikov@ieee.org

Винниченко Ирина Леонидовна
в 2012 г. закончила Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, магистр, аспирант НУК по специальности «Полупроводниковые преобразователи электроэнергии».
Основное направление научной деятельности: резонансные источники питания.
E-mail: nil_sound@mail.ru

Вінниченко Дмитро Валерійович
1986 р.н., Україна, закінчив Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, магістр, молодший науковий співробітник відділу імпульсних електротехнічних систем інституту імпульсних процесів та технологій НАН України (пр. Жовтневий 43-а, м. Миколаїв, 54018, Україна), аспірант інституту електродинаміки НАН України. Основний напрямок наукової діяльності - моделювання перехідних процесів в високовольтних генераторах імпульсних струмів, наноматеріали та нанотехнології, резонансні джерела живлення електротехнічних систем.
e-mail: vdvvvs@inbox.ru



Волянский Роман Сергеевич
кандидат технических наук, доцент. Место работы: Днепродзержинский государственный технический университет, доцент кафедры электромеханики.
Рабочий телефон +38(0569)55-20-05, e-mail voliansky@ua.fm

Волянский Сергей Михайлович,
преподаватель кафедры электрооборудования судов и информационной безопасности Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова,
E-mail: ffogres@yandex.ru

Ву Суан Выонг
магистр кафедры «Промышленной и биомедицинской электроники» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»,
Украина, 61002 Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: vuxuanvuong@gmail.com

Гаврилец Галина Олеговна
Ассистент кафедры «Системы автоматического управления и электропривод» Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.
В 2007 году закончила Кременчугский государственный политехнический университет по специальности «Системы управления и автоматики» и работает на должности асистента.
Тел. (05366) 3-11-47, e-mail: galgv@bk.ru

Гапон Дмитрий Анатольевич
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация энергосистем».
Закончил Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Основное направление научной деятельности – методы контроля качества электрической энергии и электропотребления

Говоров Владлен Филиппович
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, научный сотрудник научно-исследовательской части, vladlen_govorov@mail.ru.
Основные направления работы: энергореновация объектов социально-культурного и бьювого назначения.
Автор более 25 научных публикаций, участник всеукраинских и международных научно-технических конференций по светотехнике и электроэнергетике.

Говоров Филипп Парамонович
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, профессор кафедры «Электроснабжение городов», руководитель Центра энергоэффективных технологий, govorov_fp@mail.ru.
Автор более чем 700 публикаций, 25 патентов, 50 научно-технических разработок, является членом ряда специализованных ученых советов, академик Академии наук высшего образования Украины, академик Академии наук Сербской Республики.
Основные направления деятельности: «Комплексная оптимизация параметров и режимов систем электроснабжения и освещения городов», «Автоматизация режимов систем электроснабжения и освещения городов»

Голобородько Станислав Вадимович
магистрант кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (2015 г.)
(ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина),
e-mail: sen_59@mail.ru)

Гончар Александр Сергеевич
В 2010 г закончил магистратуру кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». В 2008/2009 1 семестр проходил включенное обучение в университете Отто фон Герике (Магдебург, Германия). 2011-2014 - года аспирант кафедры «АЭМС», с 2014 г. – стажер-преподаватель НТУ «ХПИ»

Горкунов Борис Митрофанович
д.т.н., проф. кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»,
Украина, 61002 Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Гриб Олег Герасимович
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Доктор технических наук, профессор, зав. кафедры «Автоматизация энергосистем». Закончил Украинский заочный политехнический институт. Основное направление научной деятельности – контроль и регулирование качества электрической энергии и электропотребления

Губаревич Владимир Николаевич
Специалист в области силовой преобразовательной технике, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института электродинамики НАН Украины. Автор 145 научных работ, в том числе 2 монографий и 40 авторских свидетельств. Область научных интересов: исследование и разработка систем электроснабжения новых прогрессивных технологических процессов и установок.

Гузов Эдуард Семенович
Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и на транспорте Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», ул. XXII Партсъезда, 11, 50027, г. Кривой Рог, e-mail: speet@ukr.net
Направление научных исследований – системы управления рельсового шахтного транспорта.

Гуров Анатолій Петрович
професор кафедри автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
т. (0512) 44-15-84, e-mail: Angur45@mail.ru.
В 1968 році закінчив Миколаївський кораблебудівний інститут за спеціальністю "електрообладнання суден". Кандидат технічних наук з 1979 року. Дисертацію захистив 15.05.1979 р. у спеціалізованій раді при Севастопольському приладобудівному інституті. У 1980 р. отримав вчене звання доцента. У 2003 р. отримав вчене звання професора. Основні етапи трудової та науково-педагогічної діяльності: МКІ, 1968-1971 рр. – асистент кафедри ЕМ та СЕС; 1971-1974 рр. – аспірант; 1974 р. – асистент кафедри електрообладнання суден; 1974-1977 рр. – старший викладач кафедри електрообладнання суден; 1977-1980 рр. – старший викладач кафедри автоматики; 1980-1999 рр. – доцент кафедри автоматики; з 1999 р. – т.в. та в.о. завідуючого кафедрою автоматики; з 2001 р. –професор кафедри автоматики.
Має близько 100 наукових праць, підготував 5 кандидатів технічних наук.

Гусев Станислав Иванович
Образование: Электромеханический факультет Московского энергетического института. Год окончания: 1972 г. Работа: Федеральное государственное унитарное предприятие
"Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина" (ФГУП ВЭИ) Ведущий научный сотрудник Ученая степень: В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию по вопросам создания трансформаторных генераторов высокого напряжения для ускорителей прямого действия. gusev-si@inbox.ru

Деев Сергей Георгиевич
старший преподаватель кафедры ЭПА, ЗНТУ
E-mail: sgd1968@mail.ru

Дерец Александр Леонидович
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Электротехники и электромеханики Днепродзержинского государственного технического университета, р.тел. (80569) 55-20-05, р.адр. г.Днепродзержинск, ул.Днепростроевская, 2, ald_dstu@i.ua
В 1993г. окончил Днепродзержинский индустриальный институт (в настоящее время - ДГТУ) по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Работал в научно-исследовательском секторе кафедры ЭПП ДГТУ (1993-1997). К.т.н (1997), тема диссертации «Разработка и исследование оптимальных по точности и быстродействию систем управления электроприводами с низкой чувствительностью к нестационарности объекта управления». Старший преподаватель (1997), доцент (1999) кафедры Электрооборудования ДГТУ (с 2012 года – кафедра электротехники и электромеханики).
Публикации: более 60 научных работ, 1 монография, 2 учебных пособия

Деркачев Сергей Владимирович
Аспирант Донецкого национального технического университета. Закончил электротехнический факультет Донецкого национального технического университета в 2013 г. С декабря 2013 г. является аспирантом кафедры «Электрические станции» ДонНТУ.
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)
E-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Діденко Віктор Олександрович
аспірант каф. промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056

Дрючин Виктор Гаврилович
Доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета, кандидат технических наук. Окончил в 1970 г. году энергетический факультет Ульяновского политехнического института. В 1975 г. В Ленинградском политехническом институте защитил диссертацию на тему: «Исследование системы программного регулирования скорости электропривода с учетом неидеальности источника питания» направление научной деятельности: разработка и исследование систем управления электромеханическими объектами

Дяченко Александр Васильевич
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Аспирант кафедры «Автоматизация энергосистем». Закончил Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова. Основное направление научной деятельности – качество электроэнергии в электрических сетях

Еноктаев Р.Н.
магистр ОНПУ

Ершов Александр Михайлович
Образование: 2004-2010 ГОУ ВПО Московский Энергетический Институт МЭИ (ТУ) Кафедра Инженерной Теплофизики, где:в 2008 г. защитил диплом бакалавра - Тема диплома бакалавра: «Экспериментальная установка по исследованию теплообмена при свободно-конвективном течении воздуха (создание системы автоматизации проведения эксперимента)»; в 2010 г. защитил диплом магистра- Тема магистерской диссертации: «Исследование пристеночной структуры турбулентности (восстановление законсервированного экспериментального стенда, создание системы автоматизации проведения
Работа: Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина" (ФГУП ВЭИ) Ведущий инженер программист gmm-mail@yandex.ru

Жемеров Георгий Георгиевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Промышленная и биомедицинская электроника" НТУ"ХПИ", zhemerov@gmail.com

Задорожний Николай Алексеевич
к.т.н. доц., доцент
Работает на кафедре «Электромеханические системы автоматизации» в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) в городе Краматорске Донецкой области в должности доцента.
В 1974 году окончил Харьковский политехнический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». В 1976 году поступил в аспирантуру по специальности 05.09.03 – электрооборудование в ХПИ. В 1982 году успешно защитился. С 1983 года трудится в Краматорском индустриальном институте (ныне ДГМА), активно занимается учебно-методической и научной деятельностью, стоял у истоков открытия специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» в ДГМА. Имеет более 80 опубликованных научных и методических трудов, в том числе патентов и авторских свидетельств. Направление научных исследований – электромеханические системы металлургических машин, оптимизация электроприводов машиностроительных и металлургических машин с компенсацией упругих связей.4nd@list.ru 06264-1-68-93

Задорожняя Инна Николаевна
к.т.н., доц., доцент
Работает на кафедре «Электромеханические системы автоматизации» (ЭСА) в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) в городе Краматорске Донецкой области в должности доцента.
В 2004 году окончила ДГМА по специальности «Информационные технологии проектирования» с присвоением степени магистра компьютерных наук и поступила в аспирантуру на дневную форму обучения, развивая далее тему научных исследований магистерской работы.
В 2010 году защитила кандидатскую диссертацию по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.
С 2004 года работала на кафедре ЭСА в должности ассистента, с 2010 – в должности старшего преподавателя, с 2012 – в должности доцента с присвоением в 2014 году ученого звания «доцент», активно занимаясь научной и учебно-методической работой.
Имеет более 35 опубликованных научных трудов, работает в рамках научно-исследовательских направлений кафедры со студентами.
Направление научных исследований – оптимизация параметров систем автоматического управления электроприводами технологических машин.
zadorozhnyaya_in@ukr.net
06264-1-68-93

Замаруев Владимир Васильевич
профессор каф. промышленной и биомедицинской электроники НТУ «ХПИ». Окончил Харьковский политехнический институт в 1982 г. Получил степень к.т.н. в области силовой электроники в1996 г. Автор более 150 научных трудов, патентов и авторских свидетельств в области силовой электроники. Сферой его научных интересов являются автономные преобразователи и разработка встраиваемых систем. Особое внимание уделяет алгоритмам управления специализированными системами, включающими как силовые преобразователи, так и альтернативные источники энергии

Зачепа Наталія Василівна
закінчила у 2007 році інститут електромеханіки, енергозбереження та комп'ютерних технологій Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського З 2014 року навчається в аспірантурі за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси і системи. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Україна, Полтавська обл., м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20, т. +38 (05366) 3-11-47, natali_2M@mail.ru

Зачепа Юрій Володимирович
у 2003 р. закінчив Кременчуцький державний політехнічний університет. В 2014 році захистив кандидатську дисертацію за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». З 2014 року – доцент кафедри систем автоматичного управління та електропривода. З 2015 року – заступник директора Інституту електромеханіки, енергозбереження та систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Україна, Полтавска обл., м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20, т. +38 (05366) 3-11-47, zip1981@ukr.net

Ивакина Екатерина Яковлевна
к.т.н., старший преподаватель кафедры электрического транспорта.
Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова
Адрес-61002. г.Харьков.
Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, ул. Революции, 12.
E-mail: ivakina_katya@mail.ru

Ивахно Владимир Викторович
Владимир Ивахно окончил Харьковский политехнический институт в 1980 г, получив диплом инженера электронной техники. Работал на каф. промышленной электроники ХПИ, окончил аспирантуру и в 1989 г. получил степень к.т.н. в области силовой электроники. Сейчас работает в должности профессора каф. промышленной и биомедицинской электроники НТУ ХПИ. Автор более 130 трудов, в т. ч. 15 патентов и авторских свидетельств в области силовой электроники. Сферой его научных интересов являются автономные преобразователи и коммутационные процессы в них, управление силовыми полупроводниковыми ключами, управление и регулирование преобразователей

Иващенко Валерий Петрович
Доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники. Первый проректор НМетАУ

Иващенко Дмитрий Сергеевич
инженер по разработке программного обеспечения, Amazon. com, Inc., Seattle, Washington, United States. E-mail: ivas-90@mail.ru
В 2013 году с отличием закончил магистратуру факультета информатики и вычислительной техники Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Опубликовал 23 научные работы. Область научных интересов – развитие методов анализа переходных процессов в электрических цепях.

Иерусалимова Татьяна Сергеевна
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Ассистент кафедры «Автоматизация энергосистем». Закончила Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Основное направление научной деятельности – развитие методов анализа электропотребления с учетом качества электрической энергии

Калашников Виктор Иванович
профессор, к.т.н., заведующий кафедрой «Системы программного управления и мехатроника», Лауреат Государственной премии в области образования. Окончил Донецкий политехнический институт в 1967 году по специальности «Электромеханика» и получил квалификацию «Инженер-электромеханик». Аспирант Магдебургского университета (1970-1973), кандидат технических наук (1973), доцент (1979), профессор кафедры «Систем программного управления» (1994) , заслуженный работник народного образования Украины (1996), с 1992 по 2010 годы – декан Немецкого Технического факультета. С 2010 года – заведующий кафедрой «Системы программного управления и мехатроники». Научная деятельность связана с исследованием в области частотно-регулируемого электропривода, а также исследованию использования возобновляемых источников энергии в рамках энергосистем концепции «Smart grid».
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (г. Красноармейск)

E-mail: svf1934@gmail.com

Кипенский Андрей Владимирович
Декан факультета интегральной подготовки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники, д.т.н., академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, Академии технологических наук Украины, Академии медико-технических наук РФ, член Украинской ассоциации инженеров электриков.
Область научных интересов: теория микропроцессорных систем импульсного управления и автоматического регулирования

Клепиков Владимир Борисович
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ». В 1961 г. окончил Харьковский политехнический институт по специальности «Электрификация промышленных предприятий». В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию в области промышленной электроники. С 1976 г. заведующий кафедрой «Электрификация промышленных предприятий» (в настоящее время «Автоматизированные электромеханические системы»). В 1989 г. защитил докторскую диссертацию « Динамика электромеханических систем с отрицательным вязким трением» в Московском энергетическом институте. Заслуженный деятель науки и техники Украины. Президент Украинской ассоциации инженеров-электриков. E-Mail: klepikov@kpi.kharkov.ua

Кобылянский Борис Борисович
1984 г.р. Украина, закончил 2007г. Украинскую инженерно педагогическую академию, ст. преподаватель, кандидат технических наук, кафедра ЭКТСУ Учебно научный профессионально педагогического института УИПА (84500.г.Артемовск ул.Артема 5). Основное направление научной деятельности – теория автоматического управления

Ковтун Вячеслав Владимирович
В 1987 г. окончил радиофизический факультет Харьковского государственного университета им. Горького по специальности «Космическая радиофизика»
Заведующий лабораториями кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»
Занимается теорией и практикой электроавтомобилестроения.

Козакевич Ігор Аркадійович
1986 р. народження, у 2008 р. закінчив Криворізький технічний університет (зараз ДВНЗ «Криворізький національний університет»). У 2013 р. закінчив аспірантуру без відриву від виробництва, з 2014 р. – старший викладач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті.

Козлов Владислав Сергійович
ДВНЗ «Криворізький національний університет», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті.
vskpost@yandex.ru.
Закінчив Криворізький технічний університет в 2012 році за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» (роки навчання: 2006-2011). З 2011 по 2012 рік працював інженером-конструктором ПАТ «Електрозавод». У 2012 р. поступив до аспірантури ДВНЗ «Криворізький національний університет» за спеціальністю «Електротехнічні комплекси та системи».

Колиушко Денис Георгиевич,
канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический ин-т». В 1996 г. окончил Харьковский государственный политехнический университет. Область научных исследований - диагностика заземляющих устройств объектов электроэнергетики. E-mail: den@kpi.kharkov.ua

Коломиец Валерий Витальевич
1965 г.р., Украина, Закончил 1986г. Днепропетровский государственный университет.кандидат технических наук, доцент кафедры ЭМС, руководитель Учебно научного профессионально педагогического института УИПА (84500.г.Артемовск ул.Артема, 5)
Основное направление научной деятельности – Математическое моделирование электромеханических системы.

Копчак Богдан Любомирович
Місце роботи Національний університет «Львівська політехніка», Інститут енергетики та систем керування, кафедра «Електричні машини і апарати» Посада к.т.н., доцент кафедри «Електричні машини і апарати», докторант Електронна пошта: kopchak@mail.ru
Закінчив Державний університет "Львівська політехніка" у 1999 році. У 2004 році захистив кандидатську дисертацію "Асинхронна автономна генераторна система з керованим збудженням" за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Займаюся науковою роботою за напрямками: - аналіз і синтез електромеханічних систем з дробовими інтегрально-диференційними ланками; - розроблення системи автоматичного керування напруги автономного асинхронного генератора; - ситуаційне керування вітроенергетичними установками; - мікропроцесорне керування електроприводами. Автор 50 наукових праць

Копытова Екатерина Анатольевна
канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры элетроники Днепродзержинского государственного технологического университета, kopytova@ukr.net. В 2014 г. защитила диссертацию на соискание научной степени кандидата технических наук. Научные интересы: системы автоматического управления, микроэлектроника и биосенсоры.

Король Евгений Игоревич
Доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», к.т.н., член-корреспондент Академии наук прикладной радиоэлектроники, член Международной ассоциации «Лазер и здоровье». Область научных интересов: разработка и исследование физиотерапевтических аппаратов и медицинских диагностических приборов с микропроцессорными системами импульсного управления

Король Ольга Викторовна
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, научный сотрудник научно-исследовательской части, oljana830804@mail.ru.
Основные направления работы: разработка эффективных осветительных установок и систем их диагностики. Автор более 20 научных публикаций, участник всеукраинских и международных научно-технических конференций по светотехнике и электроэнергетике

Коротаев Павел Алекссевич
Асистент кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». В 2009 году окончил кафедру АЭМС НТУ «ХПИ» по специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод».
E-Mail: pahan312@yandex.ru

Косенко Роман Анатольевич
асп. Черниговского Национального Технологического Университета и Таллиннского технического университета, Эстония;
получил степени специалиста и магистра электроники на кафедре промышленной электроники Черниговского Государственного Технологического Университета в 2011 и 2013 годах соответственно. Сейчас он учится в аспирантуре на кафедре электротехники Таллиннского Технического Университета и на кафедре биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем Черниговского Национального Технологического Университета. Его научные интересы включают проектирование и моделирование импульсных преобразователей для распределенных систем генерирования энергии. Р. Косенко является соавтором 4 статей и одной полезной модели
romankosenk@gmail.com

Кравцов Алексей Анатольевич
начальник сектора ЧАО «Тяжпромавтоматика»,
61072. Харьков, проспект Ленина,56, (057)758 64 88. E-mail: mail@tpa5.com.ua
Выпускник кафедры АЭМС НТУ ХПИ 2002г, инженер, ведущий инженер, начальник сектора ЧАО «Тяжпромавтоматика»

Крылов Денис Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Промышленная и биомедицинская электроника" НТУ"ХПИ", dskrylov@mail.ru

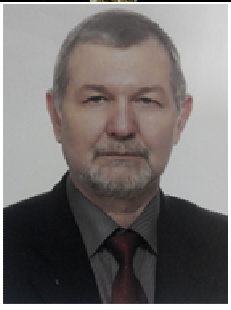
Кузнецов Борис Иванович
д.т.н., профессор, заведующий отделом проблем управления магнитным полем, ИТПМ НАН Украины, г. Харьков, ул. Индустриальная 19, E-mail: bikuznetsov@mail.ru.
Защитил докторскую диссертацию в 1990 году по синтезу структур и оптимизации многоканальных квазиитерационных систем управления. Лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники за 2000 год. Основное направление научной деятельности – синтез высокоточных систем управления электромеханических и электромагнитных систем.

Кузнецов Виталий Вадимович
доцент кафедры Электротехники и електропривода Национальной металлургической академии Украины.
В 1997 г. закончил Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта, по специальности "Электропривод и автоматизация промышленных процессов, комплексов и систем", и получил диплом специалиста электромеханики (с отличием), кандидат технических наук.
Автор и соавтор 35 научных и учебно-методических публикаций.
Контакты:
E-mail: wit_jane2000@mail.ru

Куприянов Андрей Анатольевич
инженер-программист ЧАО «Тяжпромавтоматика».
61072, Харьков, проспект Ленина,56, (057)758 64 88.
E-mail: mail@tpa5.com.ua
Выпускник УИПА 2009г, инженер-программист ЧАО «Тяжпромавтоматика»

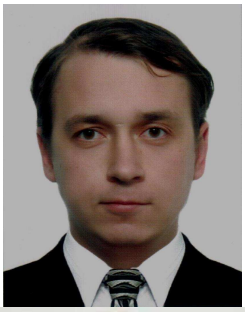
Кутовой Юрий Николаевич,
к.т.н., профессор, кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, ул. Фрунзе, 21,
В 1984 г. защищена диссертация на соискание звания кандидата технических наук на тему «Повышение тяговых свойств рудничных электровозов средствами электропривода», ДГИ, г. Днепропетровск
т. (057) 707-64-45

Кушнір Андрій Петрович
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, доцент кафедри електротехніки, промислової та пожежної автоматики, e-mail: kushnir2004@mail.ru. В 1999 р. завершив навчання у Національному університеті «Львівська політехніка» за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод». В 2003 р. закінчив аспірантуру. В 2005 р. захистив кандидатську дисертацію. З 2005 р. до 2007 р. працював на кафедрі електронного машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» на посаді асистента. З 2006 р. і дотепер працює на кафедрі електротехніки, промислової та пожежної автоматики Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на посаді доцента. Автор монографії та двох навчальних посібників, опублікував понад 45 наукових статей. Займається проблемами синтезу спостерігачів для електромеханічних систем, моделюванням динамічних процесів у системах автоматичного керування, автоматичними системами пожежної сигналізації та пожежогасіння.



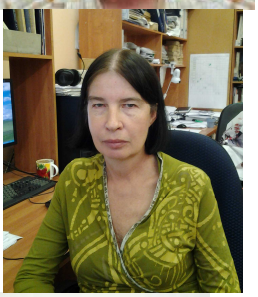
Ламанов Сергій Леонідович
молодший науковий співробітник Інституту електро-динаміки НАН України.
E-mail: fuko@ukr.net
У 1979 р. в ДонДТУ отримав диплом інженера за фахом "Електричні апарати". В 1979-2012 рр. працював у ДонДТУ на посадах м.н.с, ассистент, ст.н.с., ст. викладач, зав. науков. відділом, зав. науков. лабораторією, з 2015 р. працює на посаді мол. наук. співр. ІЕД НАН України.
Наукові інтереси – математичне моделювання та розрахунок електромагнітних процесів у технологічних установках індукційного нагрівання металів з використанням напівпровідникових резонансних інверторів

Левицький Сергій Михайлович
Місце роботи: Україна, Вінниця, Вінницький національний технічний університет
Посада: доцент E-mail: levitskiy@vntu.edu.ua
Заступник завідувача кафедри «Електромеханічні системи автоматизації в промисловості і на транспорті» з виховної роботи, керівник лабораторії Schneider Electric у ВНТУ
В 2001 році закінчив ВДТУ та отримав диплом інженера-електромеханіка за фахом 7.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод". В 2009 році захистив кандидатську дисертацію «Система автоматичного керування трансформаторами з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги під навантаженням» за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. В 2011 році присвоєно вчене звання доцента кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті. Керівник міжуніверситетських комплексних дипломних проектів кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті зі створення систем віддаленого управління та моніторингу за технологічними процесами. Науковий напрямок досліджень – системи автоматичного та автоматизованого керування технологічними процесами, діагностика частотно-регульованого електроприводу.



Лемешко Сергей Михайлович
Старший научный сотрудник отдела тяговых электропередач ГП завод «Электротяжмаш» (г. Харьков).
Аспирант кафедры “Автоматизированные электромеханические системы” НТУ “ХПИ”.
тел.: +38(057)727-51-35;
e-mail: sergii.lemeshko@i.ua.

Лимонов Леонид Григорьевич
канд. техн. наук, главный специалист отдела ЧАО «Тяжпромавтоматика».
61072, Харьков, проспект Ленина, 56, (057)75864 88.
E-mail: mail@tpa5.com.ua
Выпускник ОПИ 1958г, главный инженер проектов «Тяжпромэлектропроект», технический директор АО «ЭЛАКС», главный специалист отдела ЧАО «Тяжпромавтоматика»



Луганская Ирина Борисовна
Образование: МИЭМ
Год окончания: 1980 г.
Специальность: Прикладная математика
Работа:
Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина" (ФГУП ВЭИ)
Старший научный сотрудник

Лутай Сергей Николаевич
1973 г.р Украина, закончил 1999г. Украинскую инженерно педагогическую академию.
кандидат технических наук, доцент кафедры ЭКТСУ. Учебно научного профессионально педагогического института УИПА (84500.г.Артемовск ул.Артема 5). Основное направление научной деятельности - системы управления электроприводами

Львов Сергей Геннадиевич
к.т.н., доцент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»,
Украина, 61002 Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: lsg2@rambler.ru

Любарский Борис Григорьевич
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», д.т.н., профессор кафедры «Электрического транспорта и тепловозостроения», Украина г. Харьков, ул. Фрунзе 21
lboris19111972@mail.ru

Майданский Иван Ярославович,
ассистент кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами ИЭЭ НТУУ «КПИ». В 2003 году закончил магистратуру в институте энергосбережения и энергоменеджмента НТУУ «КПИ» по специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» получил квалификацию магистр-электромеханик. С 2003 по 2006 прошел обучение в аспирантуре университета. Автор более 25 научных работ.
e-mail: ivanmaidansky@gmail.com
тел./факс: (+38044) 406-80-49

Маруня Юлия Васильевна
Специалист в области силовой преобразовательной технике, инженер I категории Института электродинамики НАН Украины. В 2011 году поступила в аспирантуру Института электродинамики НАН Украины. Тема диссертации «Силовые гибридные фильтры для систем децентрализованного электроснабжения», научный руководитель И.В. Волков.
Uweshka@mail.ru

Масленников Андрей Михайлович
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин, закончил в 2008 г. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электрические машины и аппараты»
e-mail: maslennikov@yandex.ua

Маслий Андрей Сергеевич
ООО «Укртранссигнал», инженер. Украина, Харьков, 61075, ул. Луи Пастера, 2 an_com@ukr.net

Маслий Артем Сергеевич
Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, к.т.н., старший преподаватель кафедры «АСЭТ». Украина, Харьков, 61050, площадь Фейербаха, 7. a.masliy@bk.ru

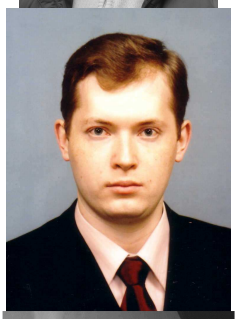
Матусевич Олександр Олександрович
доцент кафедри «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДІІТ), кандидат технічних наук, доцент, відмінник освіти України. Тел. (056) 793-19-17, эл. почта: al m0452@meta.ua
Автор більше 70 наукових робіт, 1 навчального посібника, 1 монографії та більше 50 навчально-методичних робіт. Коло наукових інтересів: наукові основи удосконалення системи технічного обслуговування силового електрообладнання тягового електропостачання, підвищення ефективності функціонування систем тягового електропостачання та діагностики обладнання, автоматизація системи технічного обслуговування та ремонту

Мехович Сергей Анатольевич
профессор НТУ «ХПИ»

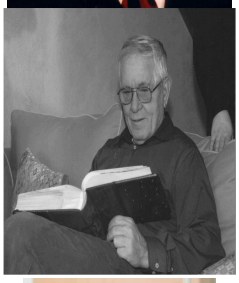
Мещанинов Сергей Карминович
родился в Днепропетровске в 1961 году. Доктор технических наук (2009), профессор кафедры электроники (2014), заведующий кафедры электроники Днепродзержинского государственного технологического университета, sergey.meshaninov@mail.ru. Автор свыше 120 научных работ, 4 монографий , 1-го научного открытия (диплом № 151, 2000 г). Научные интересы: надежность сложных технических систем, эниология, анализ психо-эмоционального состояния человека в сложных условиях современного производства, биометрия.

Михайличенко Дмитрий Анатольевич
Старший преподаватель кафедры СЭЭМ,
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
Украина, г. Кременчуг, ул. Первомайская 20,
E-mail: emdenn@mail.ru

Моисеев Александр Николаевич
В 2005 году окончил кафедру «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».
В 2012 защитил кандидатскую диссертацию.
Старший научный сотрудник кафедры АЭМС НТУ «ХПИ».
E-Mail: stariy_m@mail.ru



Морозов Дмитрий Иванович
доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета (г. Лисичанск), кандидат технических наук. В 2002г. закончил Донбасский горно-металлургический институт и получил квалификацию магистра-электромеханика. В 2006г. в Национальном техническом университете «ХПИ» защитил кандидатскую диссертацию. Соавтор изданных в 2014 году трех учебных пособий по дисциплине «Специальные вопросы теории электропривода».
E-mail: dimorozov2@yandex.ua



Мустафа Георгий Маркович
Образование: Высшее, Харьковский политехнический институт имени В.И. Ленина Год окончания: 1965 год
Ученая степень: Кандидат технических наук – 1973 год
Тема диссертации: Моделирование схем преобразовательной техники на аналоговых вычислительных машинах. Работа: Научно-исследовательский институт Харьковского электромеханического завода (НИИХЭМЗ), г.Харьков; 1966-1969 г.г. Завод «Электровыпрямитель», г. Саранск 1969-1971 г.г.
ВЭИ, г. Москва 1971 по настоящее время. Область профессиональных интересов: Теория цепей и систем; теория и техника статических преобразователей электрической энергии; теория и техника регулирования нелинейных нестационарных систем; мощные электроприводы переменного тока; статические преобразователи электро-энергетических сетей постоянного и переменного тока. gmm-mail@yandex.ru

Назарова Наталя Станіславівна
Україна, закінчила Миколаївський кораблебудівний інститут ім. адмірала С.О. Макарова, к.т.н., доцент, старший науковий співробітник відділу імпульсних електротехнічних систем інституту імпульсних процесів та технологій НАН України (пр. Жовтневий 43-а, м. Миколаїв, 54018, Україна). Основний напрямок наукової діяльності – системи керування генераторів імпульсних струмів.
e-mail: nazarovanataly@rambler.ru

Никитина Татьяна Борисовна
д.т.н., доцент, заведующая кафедрой общетехнических дисциплин Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, г. Харьков, ул. Петровского, 25,
E-mail: tatjana55555@gmail.com
Защитила докторскую диссертацию в 2012 году по многокритериальному синтезу робастного управления многомассовых электромеханических систем. Основное направление научной деятельности – синтез высокоточных систем управления электромеханических и электромагнитных систем.

Николенко Анатолий Васильевич
Заведующий кафедрой Электротехники и электропривода Национальной металлургической академии Украины, доцент, кандидат технических наук.
В 1979 г. закончил Днепропетровский металлургический институт, по специальности "Электротермические установки", инженер-электромеханик.
В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Оптимизация электрических параметров сверхмощных электроферросплавных печей".
Автор и соавтор 87 научных и учебно-методических публикаций.
Контакты:
E-mail: nikolenko_etep@mail.ru

Ноженко Виктория Юрьевна
Аспирантка кафедры «Системы автоматического управления и электропривод» Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.
В 2010 году закончила магистратуру Кременчугского государственного университета им. Михаила Остроградского по специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод». С 2012 года аспирантка кафедры «Системы автоматического управления и электропривод».
Тел. (05366) 3-11-47, e-mail: viktoriya_nozhenko@mail.ru

Обрубов Андрей Валерьевич
родился в 1970 г. В 1994 г. закончил Николаевский кораблестроительный институт. В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию. На данный момент является доцентом кафедры Компьютеризированных систем управления Института автоматики и электротехники НУК им. адм. Макарова. Основное направление научной деятельности: силовые преобразователи.
E-mail: andrii.obrubov@nuos.edu.ua

Обруч Игорь Владимирович,
ст. преподаватель, кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, ул. Фрунзе, 21,
Нейросетевые системы управления электроприводами
т. (057) 707-64-45, obruch@kpi.kharkov.ua

Оксентюк Віра Миколаївна
Національний університет «Львівська політехніка», директор спеціального конструкторського бюро електромеханічних систем, e-mail: vera_zhurkina@mail.ru.
В 2000 р. завершила навчання у Національному університеті «Львівська політехніка» за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод». З 2001 р. по 2004 р. навчалася в аспірантурі. З 2004 р. по 2007 р. працювала на посаді інженера держбюджетних тем «Критерій», «Оптимум», «Еплік». У 2007 р. захистила кандидатську дисертацію. З 2007 р. і дотепер працює в спеціальному конструкторському бюро електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка» на посадах молодшого наукового співробітника, наукового співробітника, в. о. директора та директора.
Автор понад 20 наукових публікацій, з них 19 статей у фахових виданнях.

Омельченко Олександр Володимирович
ДВНЗ «Криворізький національний університет», кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті. omelchenko84@ukr.net
1984 року народження. З 2001 р. по 2006 р. навчався у Криворізькому технічному університеті, закінчив магістратуру, з 2007 р. по 2011 р. навчався в аспірантурі, кандидат технічних наук (2014 р.).

Осадчий Володимир Володимирович
канд. техн. наук, доцент кафедри «Електропривод та автоматизація промислових установок» Запорізького національного технічного університету; 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64;
e-mail:w.osadchiy@gmail.com

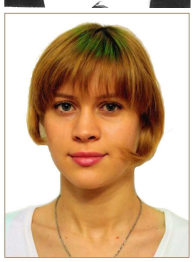
Осадчук Юрій Григорович
кандидат технічних наук, доцент, декан електротехнічного факультету ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Островерхов Николай Яковлевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
просп. Победы, 37, Киев, Украина, 03056
E-mail: ostroverkhov@ list.ru
закончил «Киевский политехнический институт» в 1985 г.

Павлов Геннадий Викторович
родился в Николаеве в 1958 г. В 1981 г. Закончил НКИ им. адм. С.О.Макарова, а в 1984 г. – аспирантуру этого ВУЗа. В 1985 г. в Киевском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию. После защиты диссертации работал младшим сотрудником НИЧ, с 1986 по 1998 г. — старшим преподавателем, доцентом кафедры электрооборудования судов НКИ. В 1989–1990 гг. проходил научную стажировку в Дельфтском технологическом университете (Нидерланды). С 1999 г. он возглавляет кафедру компьютеризированных систем управления УГМТУУ НУК. В 2001 г. в Институте электродинамики НАН Украины защитил докторскую диссертацию. В 2003 г. ему было присвоено звание профессора. В 2009 г. Геннадий Викторович назначен на должность директора института автоматики и электротехники НУК. Основное направление научной деятельности: преобразовательная техника, системы управления в электроэнергетике.
E-mail: pavlov.gv.nuk@gmail.com

Палис Стефан
доктор технических наук, профессор Магдебургского университета им. Отто фон Герике, Германия
e-mail: stefan.palis@ovgu.de

Панасенко Василий Николаевич
родился в г. Харькове.
Образование высшее, в 1993 году окончил Харьковский политехнический институт по специальности «промышленная электроника». Работал на различных должностях в ООО СКБ «Электротрансмаг», в Государственном научно-исследовательском центре железнодорожного транспорта. С 2011 года работает заместителем директора Государственного предприятия «Научно-исследовательский институт «ХЭМЗ»

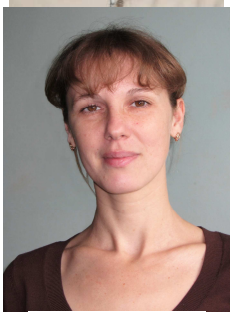


Панкова Ольга Олеговна
Студентка кафедры «Электронных систем» при Запорожской государственной инженерной академии.
Электронный адрес: bloxa2007@ukr.net

Панченко Владислав Вадимович
старший преподаватель кафедры автоматизированных систем электрического транспорта.
Украинский государственный университет железнодорожного транспорта.
Адрес-61050. г.Харьков.
Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, площадь Фейербаха,7

Пересада Сергій Михайлович
д.т.н., професор,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
завідуючий кафедрою автоматизації електромеханічних систем та електроприводу,
пр. Перемоги, 37,
м. Київ, Україна, 03056,
(044) 236-99-30,
sergei.peresada@gmail.com

Пересунько Игорь Игоревич
ГВУЗ «Криворожский национальный университет», аспирант кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте.
iperesynko@gmail.com
Окончил Криворожский технический университет в 2013 году по специальности «Электрический транспорт» (годы учебы: 2008-2013). В 2013 г. поступил в аспирантуру ГВУЗ «Криворожский национальный университет» по специальности «Электротехнические комплексы и системы».



Перетятко Юлія Вікторівна
к.т.н., доцент кафедри теоретичної електротехніки НТУУ "КПІ", м. Київ.
У 2004 р. у НТУУ "КПІ" отримала диплом магістра за спеціальністю "Техніка і електрофізика високих напруг", у 2008 р. захистила кандидатську дисертацію, у 2009 р. отримала звання Лауреата премії Президента України для молодих учених.
Наукові інтереси: моделювання електромагнітних процесів у неоднорідних середовищах і нелінійних електричних колах

Петросян Александр Михайлович
Акад. доктор, ассоциированный профессор
Место работы: Грузинский Технический Университет. Должн.: заместитель нач. уч. департамента «Технологии электропотребления» и главный специалист уч. центра «Шнейдер электрик-Теласи». Адрес: Груз.Техн.Университет, ул. Костава 77, г. Тбилиси, 0175, Грузия. E-mail: alik5686@yandex.com, a.petrosyan@gtu.ge Трудовая деятельность: Инженер-электрик, АО «Тбилприбор» (2007-2010); Руководитель проектов (проект-менеджер), ООО «LJM» (2010-по н.вр.); Приглашенный преподаватель департамента «Технологии электропотребления» (2011-2013 г.г.); Старший преподаватель департамента «Технологии электропотребления» (2013 – по н.вр.). - Автор 7 научных трудов, в том числе 1 патентов.

Петрушин Виктор Сергеевич
д.т.н., профессор, зав. каф. электрических машин Одесского национального политехнического университета. В 1968 г закончил электромеханический факультет Одесского политехнического института по специальности «Электрические машины и аппараты». Работал слесарем-сборщиком Одесского завода строительно-отделочных машин, инженером Всесоюзного научно-исследова-тельского и проектно-технологического института электроугольных изделий, ассистентом, старшим преподавателем и доцентом Одесского инженерно-строительного института. Доцент (1987), профессор (2002) кафедры электрических машин ОПИ. Декан факультета автоматизации и электрификации промышленности (1993-1998). К.т.н. (1979) тема «Исследование гребных электроустановок переменно-постоянного тока с компенсированными статическими преобразователями», д.т.н. (2002), тема «Проектный синтез высокоэффективных регулируемых асинхронных двигателей» в НТУ «ХПИ». Преподает дисциплины: «Электрические машины», «Тепловые и вентиляционные расчеты в электрических машинах», «Электрические машины в регулируемом приводе», «Основы электрической тяги». Научные интересы – моделирование и проектный синтез на основании системного подхода регулируемых асинхронных двигателей.. Опубликовал 80 научно-методических работ, 2 учебных пособия.

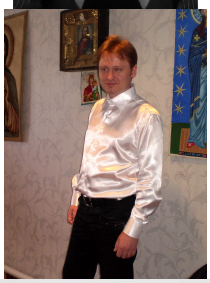
Печеник Микола Валентинович
Доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода (АЕМС-ЕП) Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” (НТУУ “КПІ”).
Працює на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електропривода на посаді доцента. Викладає дисципліну «Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів». Має більше 50 наукових публікацій

Плахтий Александр Андреевич
аспирант кафедры «Автоматизированных систем электрического транспорта" Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, 61007, г. Харьков пл. Фейербаха 7; E-mail: 83et@mail.ru

Плюгин Владислав Евгеньевич
доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин, закончил в 2000 г. Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск по специальности «Электрические машины и аппараты»
e-mail: vlad.plyugin@gmail.com

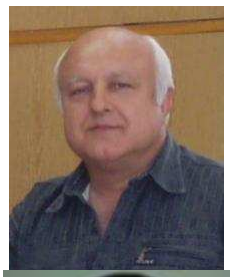
Подейко Павел Петрович
Институт электродинамики Национальной академии наук Украины
ведущий инженер
тел. (+38 044) 456-42-48, e-mail: tems@ukr.net
Научные интересы: исследование и анализ электромагнитных и электромеханических процессов в электроприводной технике и электротехнологических установках; разработка силовой преобразовательной техники, систем и устройств автоматики, АСУТП

Поленок Виталий Викторович
аспирант кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (2013 г.)
(ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина),
e-mail: vitaliy_polenok@inbox.ru)



Полилов Егор Владимирович
канд. техн. наук, доцент Каф. автоматизированных электромеханических систем Донбасский государственный технический университет С 2000 г. по нынешнее время – инженер по наладке и испытаниям электрооборудования и автоматики ПАО Алчевский металлургический комбинат. На предприятии занимается введением в эксплуатацию, наладкой и обслуживанием электроприводов на базе современных силовых преобразователей концернов Siemens, Alstom, Schneider Electric, ABB и др. Участвовал в реконструкции металлургического комбината.
С 2009 г. докторант ДонГТУ по специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы, тема работы: «Релейно-робастное управление параметрически и функционально неопределенными электромеханическими объектами». Область научных интересов: релейное нейросетевое управление многомассовыми электромеханическими системами в условиях параметрической неопределенности

Потапов Станислав Валерьевич
главный специалист отдела ЧАО «Тяжпромавтоматика». 61072, Харьков, проспект Ленина, 56. (057)7586488.
E-mail: mail@tpa5.com.ua
Выпускник ХГТУРЭ 1998г, инженер з-д им. Шевченко, инженер-программист АОЗТ «КОМСТАР», ведущий инженер, главный специалист отдела ЧАО «Тяжпромавтоматика»

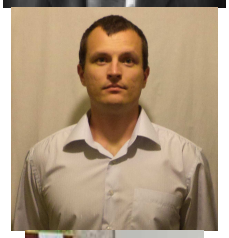


Приймак Богдан Іванович
Місце роботи – НТУУ «Київський політехнічний інститут»
Посада – доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
e-mail: bp-08@ukr.net
Закінчив КПІ у 1982 р. за спеціальністю "електропривод та автоматизація технологічних установок" В 1996 р. захистив канд. дис. Нині є доцентом кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ "КПІ".

Проценко Дмитро Петрович
Кандидат технічних наук, доцент (посада) кафедри Електромеханічні системи автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету.
У 2002 р. вступив до Вінницького державного технічного університету на факультет комп'ютеризованих систем автоматизації, електроспоживання та електропривода за спеціальністю "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод".
У 2006 р. закінчив бакалаврат за вказаною спеціальністю і отримав диплом бакалавра електромеханіки з відзнакою. Назва бакалаврської дипломної роботи - "Підвищення ефективності використання електроенергії в міському електротранспорті". Керівник - к.т.н., доцент Розводюк М. П.
У 2007 р. закінчив магістратуру наукового спрямування і отримав диплом магістра електромеханіки. Назва магістреської роботи - "Розробка методів та засобів енергозбереження міського електротранспорту". Науковий керівник - д.т.н., професор Грабко В. В.
У 2009 р. закінчив аспірантуру за наукової спеціальністю 05.09.03 - "Електротехнічні комплекси та системи" та вчасно подав у спеціалізовану вчену раду кандидатську дисертацію на тему "Система керування тяговим електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення". Дисертацію захистив 22 квітня 2011 р. у спеціалізованій вченій раді К 05.052.05 Вінницького національного технічного університету.
На кафедрі Електромеханічні системи автоматизації в промисловості і на транспорті працює з 2006 р.

Пшеничников Дмитрий Алексеевич
ст. науч. сотр. каф. АЭМС НТУ «ХПИ» с 2008 г., к.т.н., доцент
Окончил Харьковское высшее военное авиационное инженерное училище в 1986 г.
Научные интересы – энергоресурсосбережение, системы автоматического управления.
Тел. (057) 707-64-45, E-Mail: pshenich_dm@mail.ru

Пыжов Владимир Михайлович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
просп. Победы, 37, Киев, Украина, 03056
E-mail: vpyzhov@ gmail.com
закончил «Киевский политехнический институт» в 1976 г.

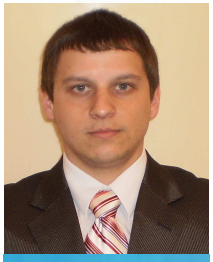


Ребедак Олег Александрович
Место работы: ООО «ПРОМАТИС».
Должность: инженер-конструктор 1 категории.
Адрес предприятия: ООО «ПРОМАТИС», ул. Энтузиастов, 6а, г. Челябинск, 454000, Российская Федерация.
Адрес электронной почты: co_r_s_ar@mail.ru.

Родькин Дмитрий Иосифович
Зав. кафедрой «Систем автоматического управления и электропривода» Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.
Окончил в 1962 году Криворожский горнорудный институт по специальности «Автоматизация производственных процессов в горной промышленности». К.т.н. (1970) по специальности «Автоматизация производственных процессов». Д.т.н. (1995), тема диссертации «Системы динамического нагружения и диагностики электрических двигателей при испытаниях». Профессор (1996), Заслуженный деятель науки и техники Украины (1998). С 2001 г. профессор, заведующий кафедрой «Систем автоматического управления и электропривода» Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.
Тел. (05366) 3-11-47, e-mail: saue@kdu.edu.ua

Романова Тетяна Іванівна
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, науковий співробітник науково-дослідної частини, ttatianai@mail.ru.
Основні напрямки роботи: підвищення ефективності внутрішнього освітлення шляхом, освітлювальних установок і систем на основі світлодіодних джерел світла та контролю за режимами їх роботи. Автор більш ніж 60 наукових публікацій, учасник всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференцій зі світлотехніки та електроенергетики

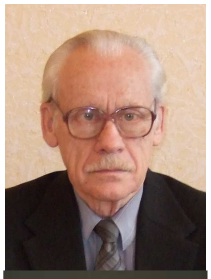
Руденко Сергей Сергеевич,
млад. науч. сотр. Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». В 2010 г. окончил Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Область научных исследований – математическое моделирование электромагнитных полей в неоднородных средах.
E-mail: nio5_molniya@ukr.net



Руднев Евгений Сергеевич
кандидат технических наук, доцент каф. АЭМС ДонГТУ (г. Лисичанск). Окончил ДонГТУ в 2008 г. по специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод». В 2013 г. в НТУ «ХПИ» защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и исследование робастных систем управления электроприводами переменного тока с синхронными двигателями».
E-mail: rudnev_evgen@mail.ru

Рябенький Владимир Михайлович
Место работы и занимаемая должность Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, зав. кафедры теоретической электротехники и электронных систем, профессор
Образование (где, когда и что закончил) высшее, Николаевский кораблестроительный институт в 1971 г.
Ученое звание и степень докт. техн. наук, профессор
Служебный адрес и № телефона. 54025, г. Николаев, пр. Героев Сталинграда 9, тел. (0512) 44-16-49.

Садовой Александр Валентинович
д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе Днепродзержинского государственного технического университета, alsadovoy@mail.ru
Окончил Киевский политехнический институт по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Руководитель группы источников питания ЦНИЛС при институте электросварки им.Патона (1970). Аспирант, ассистент, старший преподаватель, доцент кафедры ЭПП Коммунарского горно-металлургического института (1972-1985).К.т.н (1980), тема диссертации «Синтез и исследование систем оптимального управления тиристорными электроприводами». Доцент кафедры ЭПП Днепродзержинского индустриального института (1985). Д.т.н (1993), тема диссертации «Синтез и исследование оптимальных по точности систем управления электроприводами с низкой чувствительностью к широкому спектру дестабилизирующих факторов». Профессор(1996), зав.кафедрой Электрооборудования (1996-2014). Проректор по научной работе ДГТУ (1998). Подготовил 1 доктора и 9 кандидатов наук.
Публикации: более 300 научных работ, 5 монографий, 1 учебник, 4 учебных пособия



Самчелеев Юрий Павлович
Доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета, кандидат технических наук. Окончил в 1957 г. Электромашиностроительный факультет харьковского политехнического института, там же в 1972 г. году защитил диссертацию на тему «Разработка и исследование реверсивных тиристорных преобразователей с принудительным выключением вентилей в системах автоматизированного электропривода» направление научной деятельности разработка и исследование устройств преобразования параметров электроэнергии для электроприводов

Саратовский Руслан Николаевич
Должность и место работы: старший научный сотрудник Научно-исследовательского проектно-конструкторского института «Параметр» Донбасского государственного технического университета (НИПКИ «Параметр»ДонГТУ), к.т.н., ст.н.с.
Адрес для переписки, электронная почта:
Адрес: 93100 Украина, г. Лисичанск, Луганская обл., пр. Ленина, 84, НИПКИ «Параметр»ДонГТУ
E-mail: triton-ra@rambler.ru

Семененко Юрій Олександрович
аспірант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту.
Український державний університет залізничного транспорту.
Науковий керівник – Щербак Яків Васильович, д.т.н., професор.
Адреса – 61050, м. Харків.
Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7.
E-mail: slider2012@i.ua

Семиков Алексей Владимирович
Аспирант кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».
В 2012 году защитил диплом магистра электромеханики на кафедре «АЭМС» в НТУ «ХПИ».
E-Mail: semikov.a.v@yandex.ru

Сёмин Андрей Александрович
ГВУЗ «Национальный горный университет», г.Днепропетровск
ассистент кафедры электропривода
E-mail: syomin_andrew@mail.ru
С 1998 по 2003 учился в ГВУЗ ”НГУ” по специальности "Электромеханические системы автоматизации и электропривод". 2003-2006 - учеба в аспирантуре при кафедре электропривода. С 2006 - работа ассистентом. Направление научной деятельности - идентификация параметров электромеханических систем

Сёмочкин Альберт Борисович
ГВУЗ «Криворожский национальный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте. E-mail: syomochkyn@gmail.com.
Окончил Криворожский технический университет в 1992 году по специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» (годы обучения: 1987-1992). С 1992 по 1993 год работал инженером-наладчиком «Укрчерметавтоматики». В 1993 г. поступил в заочную аспирантуру ГВУЗ «Криворожский горнорудный институт» по специальности «Электротехнические комплексы и системы». В 2004 году защитил диссертацию на соискание степени к.т.н.

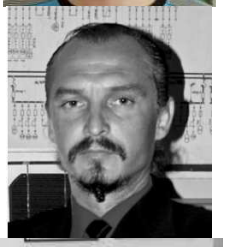
Сергієнко Сергій Анатолійович
закінчив у 1997 році Кременчуцький філіал Харківського політехнічного університету. В КрНУ працює з 1997 року. У 2004 році захистив кандидатську дисертацію за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси і системи. З 2005 року – доцент кафедри систем автоматичного управління та електропривода. З 2006 року – проректор з науково-педагогічної роботи та новітніх технологій в освіті Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Україна, Полтавська обл., м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20, т. +38 (05366) 3-11-47, sergsa@kdu.edu.ua

Сивокобыленко Виталий Федорович
Заведующий кафедрой «Электрические станции, системы и электроснабжение» Донецкого национального технического университета, доктор технических наук, профессор.
Закончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1957 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию «Математическое моделирование и оптимизация переходных процессов в многомашинных системах электроснабжения электрических станций и промышленных установок» в Московском энергетическом институте. Заведующий кафедрой «Электрические станции, системы и электроснабжение» Донецкого национального технического университета (ДонНТУ).
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (г. Красноармейск)
E-mail: svf1934@gmail.com

Сивякова Галина Александровна
канд. техн. наук, заведующая кафедрой «Электроэнергетика и автоматизация технических систем», Карагандинский государственный индустриальный университет
101400 Казахстан, г.Темиртау, пр.Республики, 30
E-mail: galina-siv@mail.ru
Выпускница Карагандинского политехнического института 1980г.
Преподаватель, старший преподаватель, зав.кафедрой, доцент Карагандинского государственного индустриального университета (бывший Завод-ВТУЗ при КМК)

Сидоренко Валерій Миколайович
кандидат технічних наук, доцент, доцентн кафедри комп’ютерних та інформаційних систем Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Першотравнева, 20; тел. (0536)3-01-45;
E-mail: vnsidorenko@gmail.com

Синельников Валерий Викторович
ведущий инженер ЧАО «Тяжпромавтоматика».
61072, Харьков, проспект Ленина,56, (057)758 64 88.
E-mail: mail@tpa5.com.ua
Выпускник кафедры АЭМС НТУ ХПИ 2010г, инженер, ведущий инженер ЧАО «Тяжпромавтоматика»



Синчук Игорь Олегович
Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и на транспорте Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», ул. XXII Партсъезда, 11, 50027, г. Кривой Рог, e-mail: speet@ukr.net
Направление научных исследований – тяговый электропривод переменного тока.

Синчук Олег Николаевич
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электромеханических систем в промышленности и на транспорте Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», ул. XXII Партсъезда, 11, 50027, г. Кривой Рог, e-mail: speet@ukr.net
Направление научных исследований – тяговый электропривод шахтных электровозов.

Сиротин Юрий Александрович
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Доктор технических наук, доцент кафедры «Автоматизация энергосистем». Закончил Харьковский государственный университет им. А.М. Горького. Основное направление научной деятельности – контроль параметров электропотребления

Сиченко Віктор Григорович
Доктор технічних наук, с.н.с., доцент, академік Транспортної Академії Наук України, академік Підйомно-Транспортної Академії Наук України, член-кореспондент Російської Академії Електротехнічних Наук. Освіта вища, закінчив у 1985 році Дніпропетровський інститут інженерів залізничного транспорту (тепер Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна) за спеціальністю "Електрифікація залізничного транспорту". Кандидат технічних наук з 03 липня 1992 року, дисертацію на тему: "Адаптивне мікропроцесорне регулювання напруги на шинах тягового навантаження", за спеціальністю 05.22.09 – електрифікація залізниць, захистив 27 березня 1992 року у спеціалізованій вченій раді Д 114.07.07 в Московському інституті інженерів транспорту ім. Ф.Е. Дзержинського, м. Москва, диплом КД № 063719. Доктор технічних наук з 19 січня 2012 року, за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт, захистив 10 листопада 2011 року у спеціалізованій вченій раді Д 08.820.01 в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, диплом ДД № 000588. Основні напрямки наукової діяльності: електромагнітна сумісність електрифікованих залізниць, якість електроенергії та підвищення ефективності функціонування систем тягового електропостачання.

Сменова Л.Н.
Соискатель, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта.

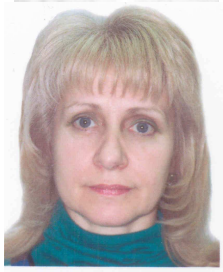
Сокол Евгений Иванович
Ректор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», член-корр. Национальной академии наукт Украины, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Промышленная и биомедицинская электроника», НТУ «ХПИ».
Закончил Харьковский политехнический институт по специальности «Промышленная электроника».
В 1976 году поступил в очную аспирантуру в ХПИ. Кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование автономных инверторов с улучшенными динамическими характеристиками» по специальности 05.09.12 – «электрические и полупроводниковые преобразователи» защитил в 1979 году. Докторскую диссертацию «Микропроцессорное управление полупроводниковыми преобразователями электрической энергии по вычисляемым прогнозам» по специальности 05.09.12 – «Полупроводниковые преобразователи электроэнергии» - в 1994 году. Звание доцента кафедры промышленной электроники получил в 1985 году. В 1998 году ему присвоено ученое звание профессора.
Сокол Е.И. – автор 223 научных работ, среди которых 3 научные монографии, 6 учебников и учебных пособий, 26 авторских свидетельств СССР и патентов на изобретение.
Является основоположником в университете научной школы по микропроцессорному управлению устройствами силовой электроники. В научных работах д.т.н., проф. Сокола Е.И. нашли свое отражение достижения различных аспектов разработки силовых схем полупроводниковых преобразователей электрической энергии, методов анализа и синтеза алгоритмов управления микропроцессорной техники, особенностям работы этих систем в разнообразных направлениях использования.

Сохина Юлия Витальевна
кандидат технических наук, доцент.
Защитила диплом инженера по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» в 1986г., диссертацию кандидата технических наук в национальном горном университете по специальности «Электротехнические комплексы и системы» в 1997 г. Доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Днепродзержинского государственного технического университета. Научные интересы связаны с системами оптимального управления электроприводами

Стефанович Тетяна Олександрівна
Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри проектування та експлуатації машин, e-mail: stefanovych@lp.edu.ua.
В 2002 році завершила навчання у Національному університеті «Львівська політехніка» за спеціальністю «Обладнання переробних і харчових виробництв». З 2003 р. до 2006 р. навчалася в аспірантурі. В 2007 р. захистила кандидатську дисертацію. З 2006 р. і до тепер працює на кафедрі проектування та експлуатації машин Національного університету «Львівська політехніка» на посадах інженера, асистента, доцента. У 2014 р. присвоєно вчене звання доцента.
Автор понад 50 наукових та науково-методичних публікацій, з них понад 20 статей у фахових виданнях та 2 патенти.

Стысло Богдан Александрович
аспирант кафедры промышленной и биомедицинской электроники НТУ «ХПИ». Работает на кафедре с 2008 г. Сфера научных интересов – полупроводниковые преобразователи для систем с накопителями электрической энергии; цифровые системы управления преобразователями
bohdanstyslo@gmail.com

Стяжкин Виталий Павлович
Институт электродинамики Национальной академии наук Украины
старший научный сотрудник, кандидат технических наук
тел. (+38 044) 456-42-48, e-mail: tems@ukr.net
Научные интересы: исследование и анализ электромагнитных и электромеханических процессов в электроприводной технике и электротехнологических установках; разработка силовой преобразовательной техники, систем и устройств автоматики, АСУТП



Супруновская Наталия Игоревна
Институт электродинамики НАН Украины, с.н.с. отдела электропитания технологических систем, E-mail: iednat1@gmail.com
С 1984 г. работает в Институте электродинамики НАН Украины (г. Киев), в который была направлена после окончания с отличием Киевского политехнического института. Работала инженером I категории, ведущим инженером, младшим научным сотрудником, научным сотрудником, а с 2010 г. и по настоящее время - старшим научным сотрудником отдела электропитания технологических систем. В 2009 г. защитила кандидатскую диссертацию "Энергетические процессы в цепях заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок" по специальности 05.09.05 "Теоретическая электротехника". В 2011 г. получила ученое звание старшего научного сотрудника по этой же специальности.

Тверд Міхаіл
Рік народження 1947
Місце роботи Фірма “TWERD”, Торунь, директор фірми
Електронна пошта: michal@twerd.pl

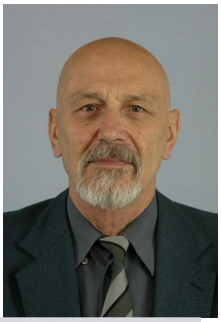
Тимощенко Андрей Валериевич,
ст. преп. НТУ «ХПИ», кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», НТУ «ХПИ», т. (057) 707-60-41 e-mail – andrey.timoschenko@gmail.com
В 2008 г. закончил НТУ «ХПИ».
Интересы: программирование встраиваемых систем на основе МП и ПЛИС, цифровая обработка сигналов

Тищенко Анна Анатольевна
к.т.н., ассистент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»,
Украина, 61002 Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: ant_31@mail.ru

Ткаченко Андрей Александрович,
к.т.н., ст. преп. НТУ «ХПИ», кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», 70-76-445
e-mail: magistramd@mail.ru
В 2006 г. окончил НТУ «ХПИ», в 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию

Ткаченко Сергей Николаевич
Декан немецкого технического факультета Донецкого национального технического университета, доцент, кандидат технических наук.
Закончил электротехнический факультет Донецкого национального технического университета (ДонНТУ) в 2004 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Тепловая защита короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя на основе контроля параметров текущего режима» в ДонНТУ. Декан немецкого технического факультета Донецкого национального технического университета.
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)
E-mail: tsn1981@mail.ru

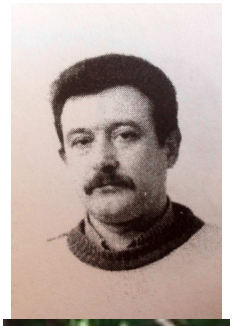
Толочко Ольга Іванівна
зав. кафедри електропривода та автоматизації промислових установок ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м Красноармійськ, 85300, Україна), голова спеціалізованої ради Д11.052.02 та член спеціалізованої ради Д11.052.03, член науково-методичної комісії Міністерства освіти і науки України з галузі знань 0507 – «Електротехніка та електромеханіка». Після закінчення Донецького політехнічного інституту в 1971р. працювала в науково-дослідному секторі кафедри “Електропривод і автоматизація промислових установок” на посадах інженера, молодшого наукового співробітника та старшого наукового співробітника. В 1981р. закінчила заочну аспірантуру в Московському енергетичному інституті та захистила кандидатську дисертацію. У 2005 р. захистила докторську дисертацію з присудженням вченого ступеня доктора технічних наук. Вчене звання доцента присвоєно в 1990 р., вчене звання професора – у 2006 р. Нагороджена чотирма грамотами Міністерства освіти і науки України. У 2008 р. нагороджена знаком «Відмінник освіти України».



Трикило Алик Иванович
канд. техн. наук, доцент кафедры элетроники Днепродзержинского государственного технологического университета, trukilo@yandex.ru. Работает в ДГТУ 53 года. Автор свыше 100 научных работ. Научные интересы: биометрический контроль состоянии здоровья человека.

Тугай Дмитрий Васильевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Теоретическая и общая электротехника" Харьковского национального университета городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, tugaydv@yandex.ua

Тугуши Майя Анзорьевна
Канд. тех. наук, ассоциированный профессор.
Место работы: Батумская государственная морская академия.
Должн.: ассоциированный профессор инженерного факультета.
Адрес: Батумская государственная морская академия, пр. Руставели 53, г. Батуми, 6010, Грузия.
E-mail: maia_tugushi@mail.ru
Трудовая деятельность: Педагог, кооперативный институт Гонио (1992-1998); Ассоц. профессор, инженерный факультет, Батумская гос. морская академия (1997-до н.вр.);
- 34 научных трудов, в том числе 5 патентов на изобретение, выданные в Грузии



Тукалов Ігор Олегович
кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизовані електромеханічні системи національного технічного університету «ХПІ»

Тытюк Валерий Константпинович
Место работы – доцент кафедры электромеханики ДВНЗ «Криворожский национальный университет»
Контактная информация: dinalt2006@gmail.com

Ушаков Владимир Иванович
Должность и место работы: ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского проектно-конструкторского института «Параметр» Донбасского государственного технического университета (НИПКИ «Параметр»ДонГТУ), к.т.н.
Адрес для переписки, электронная почта:
Адрес: 93100 Украина, г. Лисичанск, Луганская обл., пр. Ленина, 84, НИПКИ «Параметр»ДонГТУ
E-mail: stimul-tph@rambler.ru

Ушаков Дмитрий Владимирович
Должность и место работы: аспирант кафедры ЭМА Донбасского государственного технического университета
Адрес для переписки, электронная почта:
Адрес: 93100 Украина, г. Лисичанск, Луганская обл., пр. Ленина, 84, ДонГТУ
E-mail: stimul-tph@rambler.ru

Ушкаренко Александр Олегович
Место работы и занимаемая должность Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, кафедра теоретической электротехники и электронных систем, доцент
Образование (где, когда) высшее, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, 2005 г.
Ученое звание и степень к.т.н, доцент.
Служебный адрес и № телефона. НУК, кафедра теоретической электротехники и электронных систем, (0512) 44 – 16 – 49

Федотов Владислав Александрович
Старший преподаватель кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте ГВУЗ «Криворожский национальный университет».
E-mail: speet@ukr.net
В 1990 г. окончил среднюю школу в г. Кривой Рог и поступил в Криворожский горнорудный институт, специальность – электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов. В 1995 г. закончил Криворожский технический университет (КГРИ стал КТУ) и поступил в заочную аспирантуру. В этом же году пришел работать на кафедру ассистентом.

Хижняк Павел Анатольевич
Ассистент кафедры "Системы программного управления и мехатроники". Окончил Донецкий национальный технический университет в 2008 году по специальности "Электропривод и автоматизация промышленных установок" и получил квалификацию " Инженер - электромеханик". Научная деятельность связана с вопросами исследования энергосистем с возобновляемыми источниками энергии концепции «Smartgrid», а также исследованием микропроцессорных систем и автоматики систем электроснабжения.
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)
E-mail: blackveolet@mail.ru

Хоменко Виктор Витальевич
аспирант кафедры электроэнергетики Украинской инженерно-педагогической академии, г. Харьков, ул. Университетская, 16, E-mail: vitman_@mail.ru
Окончил НТУ «ХПИ» в 2013 году. Основное направление научной деятельности – синтез высокоточных систем управления электромеханических и электромагнитных систем

Хорева Александра Владимировна,
аспирант кафедры «Автоматизированные электромеханические системы», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.
Фрикционные автоколебания в электромеханических системах
т. (057) 707-64-45

Худяев Александр Андреевич
кандидат технических наук (1996 г.), доцент (1998 г.), доцент кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (2008 г.)
(ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина)
e-mail: alexey@kpi.kharkov.ua
т. (057) 71-97-318

Ченчевой Владимир Витальевич
Ассистент кафедры «Системы автоматического управления и электропривод» Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.
В 2008 году окончил Кременчугский государственный политехнический университет по специальности «Электромеханическое оборудование энергоемких производств». С 2011 года работает ассистентом кафедры «Систем автоматического управления и электропривода».
Тел. (05366) 3-11-47, e-mail: vladchen.86@gmail.ru

Чермалых Александр Валентинович,
к.т.н., с.н.с., доцент кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами ИЭЭ НТУУ «КПИ». В 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Днепропетровском горном институте, в 1994 присвоено ученое звание старшего научного сотрудника. С 1999 года – доцент кафедры АУЭК ИЭЭ НТУУ «КПИ» (ученое звание получил в 2005 году). Автор около 100 научных работ.
e-mail: alvalrik@gmail.com

Чермалых Валентин Михайлович,
д.т.н., профессор кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами ИЭЭ НТУУ «КПИ». В 1962 году защитил кандидатскую диссертацию в Криворожском горнорудном институте (КГРИ) и получил ученое звание доцента. В 1970 году защитил докторскую диссертацию, в 1972 году присвоено ученое звание профессора. С 1964 по 1973 годы – заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов КГРИ, а с 1973 по 2006 годы – заведующий кафедрой автоматизации горной промышленности КПИ (новое название – кафедра автоматизации управления электротехническими комплексами). Автор более 300 научных трудов.
e-mail: alvalrik@gmail.com

Черная Виктория Олеговна
Ассистент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, e-mail: chornajav@gmail.com
Направление научных исследований – тяговый электропривод постоянного тока рудничных контактных электровозов

Черно Олександр Олександрович
доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, т. (068) 267-34-28, e-mail: Alextcherno@gmail.com.
Закінчив Український державний морський технічний університет імені адмірала Макарова у 2002 році за спеціальністю 8.092203 – електромеханічні системи автоматизації та електропривод і отримав диплом магістра з відзнакою. Кандидат технічних наук з 2007 року. Дисертацію захистив 12.04.2007 р. у спеціалізованій вченій раді Д 64.050.04 при Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Отримав вчене звання доцента 20.01.2011 р. 15.06.2002 р. – 15.06.2005 р. аспірант Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова з відривом від виробництва; 01.07.2005 р. – 31.08.2005 р. молодший науковий співробітник Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова; 01.09.2005 р. – 31.08.2007 р. асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова; 01.09.2007 р. – 31.12.2007 р. старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова; 01.01.2008 р. – по теперішній час доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

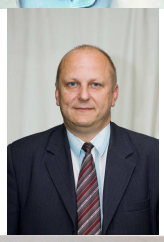
Черный Алексей Петрович
докт. техн. наук, профессор, директор Института электромеханики, энергосбережения и систем управления, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., Украина, 39600.
E-mail: apch@kdu.edu.ua

Чуб Андрей Иванович
м.н.с., аспирант Таллиннского технического университета, Эстония;
получил степень бакалавра электроники и магистра электронных систем в Черниговском Государственном Технологическом Университете в 2008 и 2009 годах соответственно. Сейчас он учится в аспирантуре Таллиннского Технического Университета, где он также работает младшим научным сотрудником в Группе силовой электроники ТТУ. А. Чуб является соавтором более чем 25 статей и одной главы в книге о силовой электронике и ее приложений. Его научные интересы включают: топологии преобразователи постоянного тока и инверторов, импедансная технология преобразования электрической энергии, применение широкозонных полупроводников в силовых преобразователях, управление системами преобразования возобновляемой энергии
andrii.chub@ttu.ee

Чунашвили Бадур Михайлович
Д-р техн. наук, профессор.
Место работы: Грузинский Технический Университет.
Должн.: нач. уч. департамента «Технологии электропотребления» и нач. уч. центра «Шнеидер электрик-Теласи».
Адрес: Груз.Техн.Университет, ул. Костава 77, г. Тбилиси, 0175, Грузия.
E-mail: btchunashvili@yahoo.com.
Трудовая деятельность: Доцент кафедры ЭПП, ГТУ (1986-2003); Профессор факультета Энергетики, ГТУ (2003-по н.вр); Главний советник министра Имуществ Грузии по вопросам энергетики (2002-2003); Нач. управления технической безопасности, министерства Энергетики Грузии (1998-2001); Нач. отделения малой энергетики министерства Энергетики Грузии (1996-1998);
- Академик Инженерной Академии Грузии и Энергетической Академии Грузии.
- Автор 112 научных трудов, в том числе 8 патентов.

Шамардина Вера Николаевна
к.т.н., профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», декан Немецкого технического факультета НТУ «ХПИ».
Закончила кафедру электрификации промышленных предприятий в 1979 г. В 1992 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Многодвигательные асинхронные электропривода грузоподъёмных кранов с улучшенными динамическими и статическими характеристиками». Работает на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы».
e-mail: shamardina@kpi.kharkov.ua.

Шевченко Иван Степанович
профессор кафедры автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета (г. Лисичанск), кандидат технических наук. Окончил в 1961г. Ворошиловский горно-металлургический институт. В 1973г. защитил диссертацию на тему «Тиристорный асинхронный электропривод индукционными сопротивлениями в роторе» в Харьковском политехническом институте. В 2014 году получил ученое звание профессора. Автор более 180 научных работ и 10 учебных пособий. В 2014 году издал серию из трех учебных пособий с грифом МОНУ по дисциплине «Специальные вопросы теории электропривода».



Шевченко С.Ю.
к.т.н., доц., доцент кафедры «Передача электрической энергии», НТУ «ХПИ».

Шкурпела Олександр Олександрович
аспірант кафедри автоматизовані системи електричного транспорту, захистив диплом інженера в Українському Державному університеті залізничного транспорту у 2011 році за фахом електричний транспорт

Шокарев Дмитрий Анатольевич
старший преподаватель, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, 39600, Украина.
e-mail shokareff@gmail.com
Автор более 40 научных, 30 методических публикаций, 6 авторских патентов на изобретение. Преподает следующие дисциплины: «Электрическая часть станций и подстанции», «Электрические системы и сети», «Электроснабжение промышленных предприятий», «Техника высоких напряжений», «Специальные вопросы электроснабжения», «Энергосбережение в промышленности»

Щерба Анатолий Андреевич
Институт электродинамики НАН Украины, заведующий отделом электропитания технологических систем, E-mail: sh1ch@ied.org.ua
Закончил радиофизический факультет Киевского национального университета. С 1975 г. работает в Институте электродинамики НАН Украины (г. Киев),.с 1995 г. и по настоящее время – заведующим отделом электропитания технологических систем. В 1984 г. защитил кандидатскую, а в 1993 г. – докторскую диссертации, а в 2005 г. получил звание профессора. В 2003 г. избран членом-корреспондентом НАН Украины. Лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники 1998 г.и премии имени В.М. Хрущова НАН Украины (2010 г.).

Щерба Максим Анатольевич
Институт электродинамики НАН Украины, н.с. отдела электропитания технологических систем, E-mail: m.shcherba@gmail.com
Закончил магистратуру НТУУ "Киевский политехнический институт" по специальности "прикладная физика". В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию "Закономерности локальных усилений электрического поля в диэлектрической среде с проводящими близко расположенными включениями" по специальности 05.09.05 "Теоретическая электротехника". Область научных интересов: теоретическая электротехника, анализ электромагнитных полей в гетерогенных средах, пороговые электрофизические процессы в твердой полимерной изоляции силовых кабелей.

Щербак Яків Васильович
д.т.н., професор,
завідувач кафедри автоматизованих систем електричного транспорту.
Український державний університет залізничного транспорту.
Адреса – 61050, м. Харків.
Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7.
E-mail: sherbak47@mail.ru

Щербовських Сергій Володимирович
Національний університет «Львівська політехніка», старший науковий співробітник науково-дослідної групи ДБ/ТРИКАФ, e-mail: shcherbov@lp.edu.ua.
В 2002 р. завершив навчання у Національному університеті «Львівська політехніка» за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод». З 2002 р. до 2005 р. навчався в аспірантурі. В 2005 році захистив кандидатську дисертацію. З 2005 р. до 2009 р. працював на кафедрі електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Львівська політехніка» на посадах молодшого наукового співробітника, асистента та доцента. З 2009 р. до 2012 р. проходив підготовку у докторантурі. В 2013 році захистив докторську дисертацію. З 2012 року і дотепер працює у науково-дослідній групі ДБ/ТРИКАФ Національного університету «Львівська політехніка» на посаді старшого наукового співробітника. У 2014 році присвоєно вчене звання старшого наукового співробітника.
Автор понад 100 наукових та науково-методичних публікацій, з них 2 монографії та понад 50 статей у фахових виданнях.

Щур Всеволод Ігорович
Національний університет "Львівська політехніка", каф. електричних машин та апаратів.
e-mail: vsevolod.shchur@gmail.com
Закінчив магістратуру Львівської політехніки у 2012 р. за спеціальністю «Електропривод і автоматизація промислових установок». Тема магістерської роботи «Оптимальне керування вітроустановками малої потужності в умовах турбулентних вітрів». З 2012 року працює інженером в ТзОВ «Міта-Техніка», яка розробляє та впроваджує системи керування вітростанціями. Є аспірантом заочної форми навчання на кафедрі електричних машин та апаратів НУ "Львівська політехніка". Опублікував шість наукових праць та отримав два патенти України на винахід.

Эпштейн Исаак Израилевич

Ягуп Валерий Григорьевич
выпускник кафедры промышленной электроники ХПИ (1967). Профессор кафедры электроснабжения городов Харьковского национального университета городского хозяйства. Докторская диссертация (1997 г.) посвящена разработке методов компьютерного моделирования тиристорных преобразователей на основе аппарата сигнальных графов.
Тел.:(057)731-3040. Эл. почта: Yagup_Walery@rambler.ru

Якимец А.М.
канд. техн. наук, доц. ОНПУ

Яровой Геннадий Иванович
Заведующий отделом тяговых электропередач научно-исследовательского и проектно-конструкторского комплекса тягового электрооборудования ГП завод «Электротяжмаш»
(г. Харьков).
тел.: +38(057)727-51-35;
e-mail: tjaga@spetm.com.ua

Яцько Сергій Іванович
кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизовані системи електричного транспорту Українського Державного університету залізничного транспорту

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алексеевский Д.Г. 168
Анищенко Н.В. 33
Антоненко А.О. 288
Артеменко А.Н. 185

Б

Бакан С.А. 190
Балтер Я.С. 389
Банев Е.Ф. 195
Барский В.А. 29
Бартецький А.А. 320
Бахнов Л.Е. 385
Белецкий О.А. 379,458
Белов Н.С. 18
Белоха Г.С. 463
Белянин Р.В. 435
Благодир В.О. 44
Блинцов В.С. 238
Бойко С.Н. 277
Бондаренко А.Ф. 477
Бондарь Д.А. 54
Босый Д.А. 270
Бурьян С.А. 54
Буряковский С.Г. 209

В

Верешко В.П. 190
Винниченко Д.В 292,402
Винниченко И.Л. 490
Волянский Р.С. 60
Волянский С.М. 238
Ву Суан Выонг 312

Г

Гаврилец Г.О. 308
Гапон Д.А. 18,316
Говоров В.Ф. 481
Говоров Ф.П. 369,481
Голобородько С.В. 111
Гончар А.С. 195
Горкунов Б.М. 312
Гриб О.Г. 18,316
Губаревич В.Н. 398
Гузов Є.С. 204
Гуров А.П. 360
Гусев С.И. 490

Д

Деев С.Г. 348
Дерец А.Л. 96
Деркачев С.В. 344
Диденко В.А. 477
Дрючин В.Г. 463
Дяченко А.В. 316

Е

Еноктаев Р.Н. 101
Ершов А.А. 490

Ж

Жемеров Г.Г. 339,394

З

Задорожний Н.А. 155,190
Задорожняя И.Н. 155
Замаруев В.В. 402
Зачепа Н.В. 330
Зачепа Ю. В. 214,330

И

Ивакина Е.Я. 443
Ивахно В.В. 402
Иващенко В.П. 132
Иващенко Д.С. 458
Иерусалимова Т.С. 316

К

Калашников В.И. 374
Касторный П.М. 195
Кипенский А.В. 425
Клепиков В.Б. 11,64,195,228
Кобылянский Б.Б 334,336
Ковтун В.В. 195
Козакевич И.А. 150
Козлов В.С. 439
Колиушко Д.Г. 324
Коломиец В.В. 68,334,336
Копчак Б.Л. 107
Копытова Е.А. 39
Король Е.И. 425
Король О.В. 369,481
Коротаев П.А. 228
Косенко Р.А. 402
Кравцов А.А. 244
Крылов Д.С. 394
Кузнецов Б.И. 68
Кузнецов В.В. 68,132
Куприянов А.А. 244
Кутовой Ю.Н. 248
Кушнир А. П. 449

Л

Ламанов С.Л. 435
Левицький С.М. 320
Лемешко С.М. 199
Лимонов Л.Г. 224,244,260
Луганская И.Б. 495
Лутай С.Н. 334,336
Львов С.Г. 312
Льдовская А.В. 39
Любарский Б.Г. 209

М

Майданский И.Я. 180
Маруня Ю.В. 398
Масленников А.М. 303
Маслий Ан.С. 209
Маслий Ар.С. 209
Матусевич О.О. 265
Мехович С.А. 502
Мещанинов С.К. 39
Михайличенко Д.А. 128
Моисеев А.Н. 195,356
Морозов Д.И. 147,173
Мустафа Г.М. 495

Н

Назарова Н.С. 292
Никитина Т.Б. 68
Николенко А.В. 132
Ноженко В.Ю. 218

О

Обрубов А.В. 490
Обруч И.В. 160,244
Оксентюк В.Н. 449
Омельченко А.В 283,439
Осадчий В.В. 274
Осадчук Ю.Г. 150
Островерхов Н.Я. 48

П

Павлов Г.В. 490
Палис С. 303
Панасенко В.Н. 385
Панкова О.О. 467
Панченко В.В. 443
Пересада С.М. 44
Пересунько И.И. 288
Перетятко Ю.В. 435
Петросян А.М. 89
Петрушин В.С. 101
Печеник Н.В. 54
Плахтий А.А. 430
Плюгин В.Е. 303
Подейко П. П. 124
Поленок В.В. 111
Полилов Е.В. 72
Потапов С.В. 244
Приймак Б.И. 142
Проценко Д.П. 320
Пшеничников Д.А. 195
Пыжов В.М. 48

Р

Ребедак О.А. 190
Родькин Д.И. 22,218,308
Романова Т.И. 369
Руденко С.С. 324
Руднев Е.С. 147
Рябенький В.М. 164

С

Садовой А.В. 60,96,408
Самчелеев Ю.П. 463
Саратовский Р.Н. 471
Семененко Ю.А. 420
Семиков А.В. 93,195
Сёмин А.А. 299
Сёмочкин А.Б. 251
Сергиенко С.А. 330
Сивокобыленко В. Ф. 344
Сивякова Г.А. 260
Сидоренко В.Н. 185
Синельников В.В. 244
Синчук И.О. 204,283
Синчук О.Н.128,150,251,277
Сиротин Ю.А. 316
Сиченко В.Г. 364
Сменова Л.Н. 204
Сокол Е. И. 18
Сохина Ю.В. 408
Стефанович Т.А. 449
Стысло Б.А. 402
Стяжкин В. П. 124
Супруновская Н.И. 379,458

Т

Тверд М. 107
Тимощенко А.В. 33,64,195
Тищенко А.А. 312
Ткаченко А.А 33
Ткаченко С.Н. 344,374
Толочко О.И. 118
Трикило А.И. 39
Тугай Д.В. 339,394
Тугуши М.А. 89
Тукалов И.О. 257
Тытюк В.К. 352

У

Ушаков В.И. 471
Ушаков Д.В. 471
Ушкаренко А.О. 164

Ф

Федотов В.А. 234,251,283

Х

Хижняк П.А. 374
Хоменко В.В. 68
Хорева А.В. 160,195
Худяев А.А. 83,111

Ч

Ченчевой В.В. 218
Чермалых А.В. 180
Чермалых В.М. 180
Черная В.О. 204
Черно А.А. 360
Черный А.П. 22,185
Чуб А.И. 402
Чунашвили Б.М. 89

Ш

Шавелашвили Г.В. 89
Шамардина В.Н. 199
Шевченко И.С. 147,173
Шевченко С.Ю. 18
Шкурпела А.А. 257
Шокарев Д.А. 234

Щ

Щерба А.А. 379,458
Щерба М.А. 485
Щербак Я.В. 420,443
Щербовских С.В. 449
Щур В.И. 414

Э

Эпштейн И.И 389

Я

Ягуп В.Г. 453
Ягуп Е.В. 453
Язид Джамал Исмаил Аль-Шайх 164
Якимец А.М. 101
Яровой Г.И. 199
Яцко С.И. 257

Наукове видання

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Збірник наукових праць

№ 12 (1121)

Проблеми автоматизованого електропривода.
Теорія і практика

Силова електроніка і енергоефективність

Відповідальний за випуск *д.т.н., проф. Клепіков В.Б.*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра «Автоматизовані електромеханічні системи».
Тел. (057) 707-62-26, 707-69-74, 707-64-45; e-mail: eeau@kpi.kharkov.ua

Підп. до друку 30.08.2015 р. Формат 60 × 84 ⅛. Папір офсетний. Riso-друк.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 66,5. Наклад 300 прим., 1-й з-д 1–100.
Зам. № 211. Ціна договірна

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул Фрунзе, 21, м. Харків -2, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.