

ISSN 2074-272X

**науково-практичний
журнал**

2014/1

ЕІЕ Електротехніка і ЕІЕ Електромеханіка



Електротехніка. Визначні події. Славетні імена
Електричні машини та апарати
Силова електроніка
Теоретична електротехніка
Електричні станції, мережі і системи

За 2012 р. журнал отримав індекс 5,55

від міжнародної наукометричної бази

Index Copernicus



НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА" ДЕРЖВИДАННЯ

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики,
телебачення та радіомовлення України КВ № 6115 від 30.04.2002 р.
Видання засновано Національним технічним університетом
"Харківський політехнічний інститут" у 2002 р.



РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

- Клименко Б.В.** головний редактор,
д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Баранов М.І.** д.т.н., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків
- Батигін Ю.В.** д.т.н., професор, ХНАДУ, Харків
- Біро Оскар** професор, Технічний університет,
м. Грац, Австрія
- Босв В.М.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Болюх В.Ф.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Буткевич О.Ф.** д.т.н., професор, гол.н.с. ІЕД НАНУ, Київ
- Віницький Ю.Д.** д.т.н., професор, GERUS
Москва, Росія
- Гончаров Ю.П.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Гурін А.Г.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Данько В.Г.** голова редакційної ради,
д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Долежел Іво** професор, Західно-чеський університет,
Пльзень, Чеська Республіка
- Жемеров Г.Г.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Загірняк М.В.** д.т.н., професор, член-кор. НАПНУ,
ректор КрНУ, Кременчук
- Кириленко О.В.** д.т.н., професор, академік НАНУ,
директор ІЕД НАНУ, Київ
- Кравченко В.І.** д.т.н., професор, директор НДПКІ
"Молнія" НТУ "ХПІ", Харків
- Маслієв В.Г.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Михайлов В.М.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Міліх В.І.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Намітоков К.К.** д.т.н., професор, ХНУМГ, Харків
- Омельяненко В.І.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Подольцев О.Д.** д.т.н., професор, гол.н.с. ІЕД НАНУ, Київ
- Пуйло Г.В.** д.т.н., професор, ОНТУ, Одеса
- Райнін В.Ю.** д.т.н., професор, НУ "Львівський
енергетичний інститут, Москва, Росія
- Рєзцов В.Ф.** д.т.н., професор, член-кор. НАНУ,
заст. директора ІВЕ НАНУ, Київ
- Розанов Ю.К.** д.т.н., професор, Московський
енергетичний інститут, Москва, Росія
- Розов В.Ю.** д.т.н., професор, член-кор. НАНУ,
директор НТЦ МТО НАНУ, Харків
- Рудаков В.В.** д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
- Сокол Є.І.** д.т.н., професор, член-кор. НАНУ,
проректор НТУ "ХПІ", Харків
- Сосков А.Г.** д.т.н., професор, ХНУМГ, Харків
- Ткачук В.І.** д.т.н., професор, НУ "Львівська
політехніка", Львів
- Шинкаренко В.Ф.** д.т.н., професор, НТУУ "КПІ", Київ
- Юферов В.Б.** д.т.н., професор, ННЦ ХФТІ, Харків

EDITORIAL BOARD:

- Klymenko B.V.** Editor-in-Chief, professor, National
Technical University "Kharkiv Polytechnic
Institute" (NTU "KhPI"), Kharkiv, Ukraine
- Baranov M.I.** Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Batygin Yu.V.** Professor, Kharkiv National Automobile
and Highway University, Kharkiv, Ukraine
- Bíró O.** Professor, Institute for Fundamentals and
Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria
- Boev V.M.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Bolyukh V.F.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Butkevich O.F.** Professor, Institute of Electrodynamics
of NAS Ukraine, Kyiv
- Dan'ko V.G.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Doležel I.** Professor, University of West Bohemia,
Pilsen, Czech Republic
- Goncharov Yu.P.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Gurin A.G.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Kirilenko O.V.** Professor, Institute of Electrodynamics of NAS
Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv
- Kravchenko V.I.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Masliev V.G.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Mihaylov V.M.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Milykh V.I.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Namitokov K.K.** Professor, O.M. Beketov Kharkiv National
University of Municipal Economy, Ukraine
- Omel'yanenko V.I.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Podoltsev O.D.** Professor, Institute of Electrodynamics
of NAS Ukraine, Kyiv
- Puilo G.V.** Professor, Odessa National Polytechnic
University, Ukraine
- Rainin V.E.** Professor, Moscow Power Engineering
Institute, Moscow, Russia
- Reztsov V.F.** Professor, Vice-director of Institute
for Renewable Energy of NAS of Ukraine,
corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv
- Rozanov Yu.C.** Professor, Moscow Power Engineering
Institute, Moscow, Russia
- Rozov V.Yu.** Professor, corresponding member of NAS of
Ukraine, Director of Science and Technology
Center of Magnetism of Technical Objects
of NAS Ukraine, Kharkiv
- Rudakov V.V.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
- Sokol Ye.I.** Professor, corresponding member of NAS of
Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv,
Ukraine
- Soskov A.G.** Professor, O.M. Beketov Kharkiv National
University of Municipal Economy, Ukraine
- Shinkarenko V.F.** Professor, National Technical University of
Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
- Tkachuk V.I.** Professor, Lviv Polytechnic National
University, Ukraine
- Vinitzki Yu.D.** Professor, GERUS, Moscow, Russia
- Yuferov V.B.** Professor, Kharkiv National Science Center
Institute of Physics and Technology, Ukraine
- Zagirnyak M.V.** Professor, corresponding member of NAPS
Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskii
National University, Kremenchuk, Ukraine
- Zhemerov G.G.** Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

Відповідальний секретар / Executive secretary: Гречко О.М. / Grechko O.M., тел. +38 067 3594696, e-mail: a.m.grechko@mail.ru

Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна
Dept. of Electrical Apparatuses, NTU "KhPI", Frunze Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine
тел. / phone: +38 057 7076281, e-mail: a.m.grechko@mail.ru

ISSN (print) 2074-272X, ISSN (online) 2309-3404

© Національний технічний університет "ХПІ", 2014

Підписано до друку 16.01.2014 р. Формат 60 x 90 1/8. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-1-2014. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки ФОП Тимченко А.М. 61124, Україна, м. Харків-124, а/с 2249

Надруковано ТОВ "Друкарня "Мадрид"", м. Харків, вул. Ольмінського, 11



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 18: Ракетная техника и покорение ближнего космоса.....	3
--	---

Електричні машини та апарати

Авдеева Е.А., Ставинский Р.А. Массо-стоимостные показатели пространственных аксиальных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых магнитопроводов.....	15
Голенков Г.М., Аббасян М.А. Моделирование распределения магнитной индукции коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.....	21
Дегтев В.Г., Лаврук И.С. Синтез гомологических рядов многофазных обмоток и их гармонический анализ.....	25
Петрушин В.С. Проектирование энергосберегающих асинхронных двигателей с использованием модифицированного критерия приведенных затрат.....	31
Ткачук В.І., Жук В.І. Математичне моделювання електромеханічних процесів у вентильному двигуні постійного струму.....	34
Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Уменьшение повреждаемости статора мощных турбогенераторов, вызванных вибрацией в торцевой зоне (анализ, гипотезы, эксперимент).....	37
Levin M.I., Pentegov I.V., Ryamar S.V., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов.....	40

Силовая электроника

Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии.....	45
---	----

Теоретична електротехніка

Кутковецкий В.Я. Законы анализа электротехнических сетей.....	58
--	----

Електричні станції, мережі і системи

Веприк Ю.Н., Ганус О.А. Контроль частоты в задачах математического моделирования и управления режимами электрических систем.....	62
Нижевский И.В., Нижевский В.И. Исследование влияния увлажнения, просыхания или промерзания верхнего слоя земли на электрические характеристики заземляющего устройства.....	65
Сиротин Ю.А. Расчет реактивных проводимостей компенсатора для трехпроводной сети.....	71

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 18: Rocket engineering and near-space exploration.....	3
--	---

Electrical machines and apparatus

Avdieieva E.A., Stavinskiy R.A. Mass and cost figures for spatial axial three-phase electromagnetic systems with circular and hexagonal forming contours of twisted magnetic core rods.....	15
Golenkov G.M., Abbasian M.A. Simulation of magnetic induction distribution in a coaxial linear motor with axial and radial direction of permanent magnets magnetization.....	21
Degtev V.G., Lavruk I.S. Multiphase winding homologous series synthesis and harmonic analysis.....	25
Petrushin V.S. Energy-efficient induction motors designing with application of a modified criterion of reduced costs.....	31
Tkachuk V.I., Zhuk V.I. Mathematical modeling of electromechanical processes in a brushless DC motor.....	34
Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Decrease in the damage of powerful turbogenerator stator caused by vibration in the end zones (analysis, hypotheses, experiment).....	37
Levin M.I., Pentegov I.V., Ryamar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs.....	40

Power Electronics

Zhemerov G.G., Tugay D.V. Energy and power in power supply systems with semiconductor converters and energy storage..... 45

Theoretical Electrical Engineering

Kutkovetsky V.J. Laws of electrical grid analysis..... 58

Power Stations, Grids and Systems

Veprik Yu.N., Ganus O.A. Frequency control in electrical system mathematical modeling and operation control problems..... 62

Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I. Research into action of surface soil moistening, drying or freezing on electrical characteristics of grounding device..... 65

Sirotin Yu.A. Calculation of compensating susceptance for a three-wire net..... 71

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" – передплатне видання. Звертаємо вашу увагу, що починаючи з 2006 року журнал виходить шість разів на рік. Вартість передплати на 2014 рік – 173,10 грн., на два місяці – 28,85 грн., на чотири місяці – 57,70 грн., на шість місяців – 86,55 грн., на вісім місяців – 115,40 грн., на десять місяців – 144,25 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1–05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу "Електротехніка і Електромеханіка" та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.

Електронна копія журналу "Електротехніка і Електромеханіка", зареєстрованому у Міжнародній системі реєстрації періодичних видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського і, починаючи з 2005 р., представлена на сайті бібліотеки (nbuv.mon.gov.ua) в розділі "Наукова періодика України", а також на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua).

Журнал "Електротехніка і Електромеханіка" включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory (ulrichsweb.serialsolutions.com), у всесвітній федеративний бібліотечний каталог OCLC WorldCat за № 851561709 (worldcat.org), індексується у наукометричних базах Index Copernicus (indexcopernicus.com), Російський Індекс Научного Цитування – РИИЦ (elibrary.ru), Google Scholar (scholar.google.com) та входить до баз даних DOAJ (www.doaj.org), BASE (base-search.net), Scientific Indexing Services (sindex.org), CiteFactor (citefactor.org), DRIVER (www.driver-repository.eu), PBN (pbn.nauka.gov.pl), Research Bible (journalseeker.researchbib.com), DRJI (drji.org).



Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів статей відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua), розміщеному на платформі "Наукова періодика України" (journals.urau.ua). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 18: РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА И ПОКОРЕНИЕ БЛИЖНЕГО КОСМОСА

Наведено короткий нарис з всевітньої історії створення ракетної техніки і підкорення людством космічного простору, що оточує планету Земля.

Приведен краткий очерк из всемирной истории создания ракетной техники и покорения человечеством космического пространства, окружающего планету Земля.

"...То, чего мы добились в освоении космоса, – это заслуга не отдельных людей, это заслуга всего народа..." (из речи выдающегося советского конструктора-ракетчика С.П. Королева)

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технической основой покорения ближнего и дальнего космоса в истории человечества стала ракетная техника [1]. Первое письменное упоминание об использовании в Китае ракет (этот термин происходит от немецкого слова "rakete" – "ярко светящийся при полете снаряд" [2]) относится к 1230-м годам (периоду правления третьего сына великого монгола-завоевателя Чингисхана – Угедея, завершившего покорение Китая) [1]. Там они применялись, главным образом, для проведения красочных фейерверков. В связи с чем их (ракеты) в народе почти до 18-го века называли "стрелами летающего огня". Позже ракеты нашли свое и боевое применение. С 1780 года ракетное оружие начали применять в Индии [1]. Известно, что в 1807 году массивной ракетной бомбардировке (при числе выпущенных ракет до 46 тысяч шт.) был подвергнут датский г. Копенгаген, оказавшийся от этой атаки неприятеля почти опустошенным [1]. В 19-м столетии усилиями, прежде всего, английских изобретателей развитие ракетного оружия было заметно продвинуто вперед [1, 3]. В 20-е годы 20-го века уже появились инженерные технологии, которые позволяли оборудовать ракеты аппаратными средствами управления, способными довести эти летающие объекты от их старта до поражаемой цели. Лидирующие мировые позиции в этом перспективном военно-техническом вопросе к 1940-м годам стала занимать Германия и ее талантливые конструктора-ракетчики.

1. ДОСТИЖЕНИЯ ГЕРМАНИИ В СОЗДАНИИ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

В 1942 году выдающимся немецким конструктором-ракетчиком Вернером фон Брауном был создан оригинальный самолет-снаряд "Фау-1" (рис. 1), явившийся первой в мире мощной крылатой ракетой [1].

Одновременно с крылатой ракетой "Фау-1" В. фон Брауном была разработана одноступенчатая баллистическая ракета "Фау-2" (рис. 2), имевшая в своем составе систему наведения на цель поражения [1]. Это оружие возмездия Германии нанесло тяжелые потери населению и промышленности Англии, а также силам ее союзников в период Второй мировой войны [1, 3].

Поэтому немецкий конструктор-ракетчик **В. фон Браун** (рис. 3) фактически и стал в 1940-е годы "отцом" первой в мире грозной боевой ракетной техники.

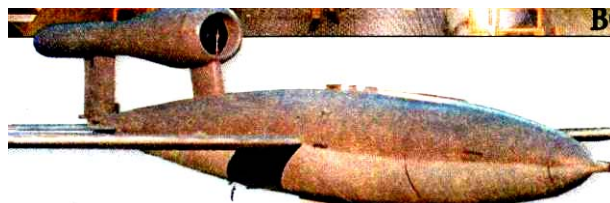


Рис. 1. Немецкий самолет-снаряд "Фау-1" (1942 год), ставший по праву прототипом современных крылатых ракет [1]

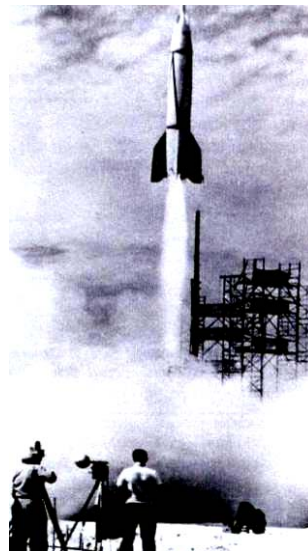


Рис. 2. Боевой пуск немецкой одноступенчатой баллистической ракеты "Фау-2", созданной в 1942 году выдающимся конструктором ракетной техники В. фон Брауном [1]



Рис. 3. Выдающийся немецкий конструктор ракетной техники Вернер фон Браун (1912-1977 гг.) с моделью разработанной им баллистической ракеты "Фау-2" в руках [1]

Интересным историческим фактом является то, что первые попытки по разработке баллистических ракет, предназначенных для запуска с Земли в околоземное мировое (космическое) пространство, были

© Баранов М.И.

осуществлены в Германии в 1927 году инженерами немецкого Общества межпланетных путешествий, которым руководили В. фон Браун и К. Ридель [1].

2. ДОСТИЖЕНИЯ СССР В СОЗДАНИИ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ И ОСВОЕНИИ КОСМОСА

Первые опытные работы по созданию и запуску маломощных ракет в бывшем СССР были проведены в 1933 году сотрудниками группы изучения реактивного движения (ГИРД) при Осоавиахиме (г. Москва) [1]. В этом же году в СССР была запущена первая советская ракета "ГИРД-9", сконструированная прославившимся в будущем С.П. Королевым и М.К. Тихонравовым и оснащенная маломощным жидкостным ракетным двигателем (ЖРД) типа ОР-2 конструкции Ф.А. Цандера [1, 3]. В 1939 году группа ГИРД была расформирована, а ее члены арестованы и отправлены в специальные конструкторские бюро НКВД ("шараги"). В одной из казанских "шараг" оказался и С.П. Королев, проработавший ряд лет под надзором НКВД с другим талантливым советским конструктором В.П. Глушко, ставшим впоследствии основоположником ракетного двигателестроения в СССР и конструктором первых мощных отечественных ЖРД [3, 4]. До мощных советских ракет этих общепризнанных в мире конструкторов-ракетчиков, появившихся в нашей стране в 1950-е годы, в СССР была создана мобильная *ракетная установка "Катюша"* (рис. 4), успешно прошедшая свое боевое "крещение" летом 1941 года под г. Оршой в ожесточенных боях Великой Отечественной войны (1941-1945 гг.) [1]. Ракеты этой установки поражали живую силу и военную технику противника на расстоянии до нескольких десятков км.



Рис. 4. Общий вид советской мобильной ракетной установки "Катюша", смонтированной на базе американского автомобиля "Студебекер-US6" и ставшей во время Второй мировой войны одним из самых грозных видов вооружения [1]

После окончания Второй мировой войны (1939-1945 гг.) в СССР были возобновлены работы по созданию тяжелых баллистических ракет. Сначала эти работы базировались на принципах конструирования, заложенных еще В. фон Брауном при разработке им немецкой одноступенчатой баллистической ракеты "Фау-2" (см. рис. 2) [1]. В 1947 году была создана первая советская тяжелая баллистическая ракета "Р-1", запуск которой прошел не совсем удачно. Далее на основе баллистической ракеты "Р-1" была разработана геофизическая ракета "В-1А" со стартовой массой около 14 т, успешно доставившая в 1949 году на высоту 102 км контейнер с научной аппаратурой и затем возвратившая его на земную поверхность [1, 5]. В 1950 году в СССР была создана принципиально новая баллистическая ракета "Р-2", головная часть которой впервые отделялась от корпуса после завершения активного участка ее полета. Она имела усовершенствованный ЖРД конструкции В.П. Глушко, увеличенную

вдвое дальность полета и эффективную систему радиокomандного наведения [1]. В 1950-е годы в СССР в ОКБ-1 под руководством *С.П. Королева* была создана межконтинентальная многоступенчатая баллистическая ракета "Р-7" с пятью "глушковскими" ЖРД типа РД-107 (при тяге каждого из пяти двигателей в 76 тс) [4] (рис. 5), которая 4 октября 1957 года с южного советского космодрома "Байконур" (полигон "Тюра-Там", Юго-Западный Казахстан) вывела на околоземную орбиту первый в истории человечества *искусственный спутник Земли* (ИСЗ) [5]. Считается, что этот день открыл в истории нашей планеты начало новой космической эры. Следует отметить, что с 1951 года харьковское предприятие "Электроприбор" (нынешний "Хартрон") стало головным в СССР разработчиком систем управления тяжелых баллистических ракет, создаваемых в "королевском" ОКБ-1.



Рис. 5. Натурный макет советской трехступенчатой баллистической ракеты "Р-7" (разработка от 1957 года выдающегося конструктора-ракетчика С.П. Королева), выставленный в открытом павильоне ВДНХ СССР (г. Москва) [1, 5]

Другое харьковское предприятие "Коммунар" стало головным в СССР разработчиком по наземным комплексам управления для новой в стране ракетно-космической отрасли. Первый ИСЗ имел форму герметичного шара диаметром 580 мм, полый корпус которого был изготовлен из специального алюминиевого сплава (рис. 6). Масса первого ИСЗ составляла 83,6 кг [1]. На внешней поверхности этого ИСЗ были установлены антенны радиопередатчиков в виде 4-х прямолинейных усов-стержней – по два на радиопередатчик (см. рис. 6). Перед запуском в ближний космос корпус первого ИСЗ для терморегулирования был заполнен газообразным азотом, а к его усам-антеннам были подключены два маломощных радиопередатчика, непрерывно излучающие электромагнитные сигналы, похожие на телеграфные. Мощность этих радиосигналов была достаточной для того, чтобы их могли принимать все радиолюбители нашей планеты.

3 ноября 1957 года СССР вывел в ближний космос свой второй ИСЗ, масса которого уже достигала 508 кг. Этот спутник представлял собой последнюю ступень ракеты-носителя "Р-7", в нескольких контей-

нерах которой размещались научная измерительная аппаратура и специальный отсек с первым живым существом – "собакой-космонавтом" Лайкой [1]. Очередной советский ИСЗ был запущен в мае 1958 года. Его можно было бы назвать автоматической космической научной станцией (при его общей массе 1327 кг на аппаратуру приходилось 968 кг [1]). Он уже имел солнечную электробатарейку, благодаря чему смог проработать на своей орбите рекордное на то время – 691 сутки. С 1962 года СССР перешел на серийный выпуск спутников, выполняющих научные и военнопприкладные исследования. Первым таким отечественным спутником стал "Космос", отправленный в свой первый орбитальный полет 16 марта 1962 года.



Рис. 6. Общий вид натурального макета первого в мире советского искусственного спутника Земли, выведенного 4 октября 1957 года на околоземную орбиту трехступенчатой баллистической ракетой "Р-7" (разработка от 1957 года выдающегося конструктора-ракетчика С.П. Королева) [1, 5]

После успешных запусков ИСЗ в СССР в начале 1960-х годов объективно пришло время для создания космических аппаратов (кораблей), предназначенных для доставки космонавтов (это понятие происходит от двух греческих слов "космос" – "мировое пространство" плюс "науῆς" – "мореплаватель" и обозначает "человека, совершающего полет в космос" [2]) на околоземную орбиту и их возвращения на Землю. В СССР перед тем, как отправить человека в космос, на протяжении 1960 года были трижды осуществлены беспилотные запуски космического корабля "Восток" с подопытными животными: крысами и двумя собаками – Белкой и Стрелкой [5]. После удачного возвращения с космоса на планету Земля указанных "пассажиров" и последней доводки всех частей корабля в СССР его руководством было принято историческое решение об осуществлении пилотируемого космического полета на корабле "Восток-1" (рис. 7).

12 апреля 1961 года с космодрома "Байконур" был осуществлен успешный запуск советского космического корабля "Восток-1" с первым в мире *космонавтом*, военным летчиком, старшим лейтенантом *Юрием Алексеевичем Гагариным* (рис. 8) на борту [1]. Вывод на орбиту высотой до 300 км этого космического корабля произвела указанная трехступенчатая ракета-носитель "Р-7", движущаяся со скоростью 28 тысяч км/ч и созданная под научно-техническим руководством выдающегося советского конструктора-ракетчика *С.П. Королева* (рис. 9). Орбитальный полет Ю.А. Гагарина продолжался 108 мин, за которые космический корабль "Восток-1" с космонавтом на борту совершил только один полный оборот вокруг Земли. Так была открыта на нашей планете *эра пилотируемых полетов* в мировое космическое пространство.

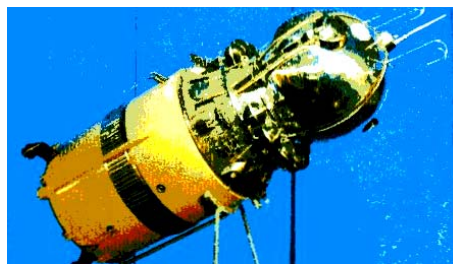


Рис. 7. Модель первого советского космического корабля "Восток-1" (экспонат на ВДНХ СССР, г. Москва) [1, 5]



Рис. 8. Первый в мире космонавт Ю.А. Гагарин (1934-1968 гг.) в скафандре для пребывания и работы в космосе перед посадкой в советский космический корабль "Восток-1" [1]



Рис. 9. Выдающийся советский конструктор ракетно-космической техники, дважды Герой Труда, лауреат Ленинской премии СССР в области науки и техники, академик АН СССР Сергей Павлович Королев (1907-1966 гг.) [3, 5]

Первый советский космический корабль "Восток-1" имел общую массу 4730 кг [1]. Его спускаемый аппарат с кабиной космонавта (рис. 10) был выполнен в форме шара $\varnothing 2,3$ м и весил около 2,4 т, из которых 0,8 т приходилось на его термоустойчивую оболочку. Заметим, что при спуске на Землю с околоземной орбиты космического аппарата из-за его торможения в плотных воздушных слоях атмосферы нашей планеты температура его наружных слоев достигает не менее 2000 °С [3]. Поэтому без надежной теплозащиты подобные аппараты при спуске обречены на сгорание.



Рис. 10. Музейные экспонаты приборной панели (слева) и спускаемого аппарата (справа) советского космического корабля "Восток-1", впервые в мире вывешившего 12 апреля 1961 года космонавта Юрия Алексеевича Гагарина (фото по центру) в околоземное космическое пространство [1, 5]

В тесной кабине "гагаринского" корабля размещались катапультирующее кресло космонавта, пульт управления, а также запасы пищи и воды. Система жизнеобеспечения этого первого корабля была рассчитана на работу в течение 10-и суток полета. Космонавт во время всего этого полета находился в герметичном скафандре с открытым шлемом (см. рис. 8).

На рис. 11 первый космонавт Ю.А. Гагарин в более поздний по времени период уже в звании полковника запечатлен на аэродроме космодрома "Байконур" во время беседы с генеральным конструктором советской ракетно-космической техники С.П. Королевым.



Рис. 11. Первый из землян космонавт Ю.А. Гагарин (слева), ставший со временем начальником отряда космонавтов СССР, и первый генеральный конструктор советской ракетно-космической техники С.П. Королев (справа) [1, 5]

Небезынтересно, что в СССР первым космонавтом планировался стать мастер спорта, военный летчик, старший лейтенант Валентин Бондаренко, родившийся и выросший в г. Харькове. Однако, за три недели до запланированного на апрель 1961 года своего старта на космическом корабле "Восток-1" он в период активной заключительной подготовки к этому полету сильно обгорел в барокамере, воздушная атмосфера которой содержала избыточный кислород, и скончался. За проявленное мужество он посмертно был награжден орденом Красной Звезды. Похоронен он на одном из кладбищ г. Харькова (район Баварии), которое посещают все космонавты, оказавшиеся на Харьковщине (побывал на нем и автор этого очерка).

В 1963 году в СССР в КБ и НПО "Энергомаш" был создан один из самых надежных российских ЖРД типа РД-253 (генеральный конструктор разработки – выдающийся специалист в области ракетного двигателестроения, академик АН СССР **В.П. Глушко**) [4, 6]. Предназначен он был для использования на первых ступенях ракет семейства "Протон". Топливом для него служил токсичный гептил, а окислителем – тетраоксид азота (N_2O_4) [6]. При полной массе 1260 кг (высота – 3 м; диаметр – 1,5 м) он имел тягу до 170 тс и развивал давление в камере сгорания до 17 МПа (до 168 атм) [6]. Первый запуск советского ракетносителя "Протон" с двигателями РД-253 состоялся в июле 1965 года. Он оказался успешным. С появлением в СССР нового ЖРД типа РД-253 был совершен качественный скачок в освоении высокого уровня избыточного давления в камере сгорания ракетного двигателя и достижении высоких значений удельного импульса его тяги. Шесть ЖРД типа РД-253 при общей тяге до 1020 тс надежно работали в составе первой ступени советского ракетносителя "Протон", обеспечивая успешные полеты таких советских космических аппаратов как "Луна", "Венера", "Марс" и других, а также впоследствии и первых советских орбитальных *космических станций* "Салют" и "Мир" [6].

Отметим, что модификация этого ЖРД типа РД-275М (ракетный двигатель под номером 14Д14М) по состоянию на 2009 год продолжала активно использоваться в российской ракетно-космической технике [6].

Далее в СССР усилиями многих организаций (ОКБ-1, ОКБ-52, ОКБ-456, КБ "Энергомаш" и др. [5-7]), занимающихся разработкой и созданием мощных ЖРД и на их основе ракетносителей разного назначения, был создан новый *космический корабль* "Союз" (рис. 12), долгие годы проработавший на советские и международные космические программы.



Рис. 12. Блок мощных ракетных двигателей первой ступени носителя космического корабля "Союз-ТМ", находящихся в монтажно-испытательном корпусе космодрома "Байконур"

На рис. 13 показан общий вид сборки в прикосмодромном монтажно-испытательном корпусе ракетносителя и транспортного космического корабля серии "Союз-ТМ" с пятью отдельными блоками мощных ЖРД первой ступени этой ракеты-носителя. Следует отметить, что неудачей в 1965 году закончилась лунная программа СССР, предусматривавшая высадку на Луну и возвращение на Землю советского космонавта. Сверхмощная "королевская" многодвигательная ракета Н1, использующая на своей первой ступени одновременно 30 двигателей типа НК-15 на кислородно-керосиновом топливе разработки ОКБ-276 (главный конструктор – **Н.Д. Кузнецов**), не прошла летных испытаний (взорвалась на старте с разрушением дорогого стартового комплекса) и была в результате забракована. Предварительные усилия В.П. Глушко по замене на этой ракете двигателей типа НК-15 на двигатели типа 8Д420 с тягой по 640 тс каждый были тогда С.П. Королевым отвергнуты [7].

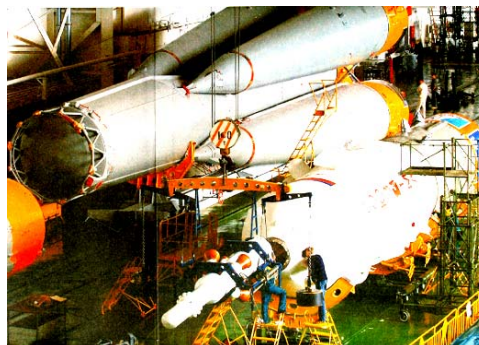


Рис. 13. Внешний вид основных частей мощного советского трехступенчатого ракетносителя и транспортного космического корабля "Союз-ТМ" во время их сборки в монтажно-испытательном корпусе космодрома "Байконур" [8]

Успехи ОКБ-52 (главный конструктор – **В.Н. Челомей**) по разработке и созданию в июле 1965 года нового мощного ракетносителя "Протон" учтены не

были. Последовавший вскоре уход из жизни С.П. Королева поставил финальную на то время и, как оказалось, в дальнейшем окончательную "жирную" точку в советской "лунной" гонке за приоритет в освоении человечеством земного спутника – Луны. 18 марта 1965 года советский космонавт **Алексей Архипович Леонов** первым в мире осуществил выход со шлюза корабля "**Восход-2**" в открытый космос. В СССР в конце 80-х годов 20-го столетия советскими учеными и инженерами был сконструирован **космический корабль "Буран"**, предназначенный для многоразового использования [7, 9]. Для вывода на околоземную орбиту данного корабля – "челнока" потребовалась разработка нового сверхмощного ракетносителя и соответственно нового ЖРД к нему. В мае 1974 года В.П. Глушко стал директором и генеральным конструктором НПО "Энергия", в которое вошли ЦКБЭМ (бывшее "королевское" ОКБ-1) и КБ "Энергомаш" с их заводами и филиалами [7]. В это время В.П. Глушко, верно сохраняя свой рабочий принцип "от двигателя – к ракете", предложил тогдашнему главному конструктору КБ "Южное" (г. Днепропетровск) В.Ф. Уткину создать новую ракету-носитель среднего класса "**Зенит**" с одним ракетным двигателем типа РД-170 или РД-171 от 1-ой ступени разрабатываемого им сверхтяжелого ракетносителя "**Энергия**". Разработка и создание в СССР нового ракетносителя "Энергия" шли тяжело. Большую поддержку В.П. Глушко в этой разработке оказывал влиятельный советский партийный и государственный деятель Д.Ф. Устинов, курировавший еще с 1946 года развитие в СССР ракетно-космической техники [7]. 13 апреля 1985 года новый ЖРД типа РД-170 успешно отработал при первом пуске ракеты-носителя среднего класса "Зенит" (рис. 14). Только 15 мая 1987 года после длительных стендовых испытаний двигателя типа РД-170 состоялся первый пуск сверхмощного ракетносителя "Энергия", развивающего с помощью 4-х двигателей РД-170 ее 1-й ступени реактивную силу тяги в 3600 тс [7].



Рис. 14. Подготовка к пуску ракетносителя "Зенит", использующего "глушковский" двигатель типа РД-170 [7]

На рис. 15 запечатлены моменты нахождения на стартовом столе космодрома "Байконур" сверхмощного советского ракетносителя "Энергия" с многоразовым космическим кораблем "Буран" на борту и на начальном участке его успешного полета над Землей, произошедшего 15 ноября 1988 года [7]. Следует констатировать, что сверхмощный ракетноситель "Энергия", содержащий в составе блок из 4-х двигателей типа РД-170 и выводящий сразу на околоземную орбиту полезную нагрузку массой до 10^5 кг и лишь дважды по воле "судьбы" продемонстрировавший надежность своей работы, оказался невостребованным. В 1990 году по личному указанию первого президента СССР М.С. Горбачева работы по ракетносителю "Энергия" и ко-

раблю "Буран" (к этому времени в бывшем СССР было изготовлено уже 14 шт. этих космических аппаратов – "челноков") были прекращены.



Рис. 15. На старте космодрома Байконур (слева) и в полете (справа) новый мощный ракетноситель "Энергия", вывешивший 15 ноября 1988 года на околоземную орбиту первый советский многоразовый космический корабль "Буран" [7]

В тоже время ракетноситель "**Зенит**", создававшийся, в первую очередь, как вспомогательное средство для отработки двигателя первой ступени для советской сверхмощной ракеты-носителя "Энергия", успешно эксплуатируется и сейчас как по российским космическим программам, так и по международной программе "Морской старт". Кроме того, ЖРД типа РД-170 стал базовой конструкцией для нового двухкамерного российского жидкостного ракетного двигателя типа РД-180, устанавливаемого в рамках международных программ по мирному использованию космического пространства на американские космические мощные ракеты типа "Атлас-3" и "Атлас-5" [7].

Теперь, что касается космического **корабля "Буран"**, орбитальный полет которого показан на рис. 16.



Рис. 16. Советский космический корабль многоразового использования класса "Буран" при орбитальном полете [7]

Работы над "советским шаттлом" – многоразовым орбитальным космическим кораблем "Буран" в СССР были начаты с 1974 года в противовес соответствующей американской разработке подобного корабля – "челнока" [7, 9]. Для практической реализации в СССР этой сложной и масштабной научно-технической задачи закрытым Постановлением Кабинета Министров СССР от 1976 года было создано НПО "Молния" во главе с его генеральным директором и главным конструктором, выдающимся советским авиаконструктором Глебом Евгеньевичем Лозино-Лозинским (рис. 17) [9].

Постоянно работая с 1940-х годов во всемирно известном КБ им. Микояна, он принимал активное участие в разработке и создании советских реактивных самолетов-истребителей II-го поколения МиГ-19 и МиГ-21. До своего нового назначения этот авиаконструктор просла-

вился созданием в указанном КБ сверхманевренных истребителей-перехватчиков III-го поколения МиГ-25 и IV-го поколения МиГ-29. Здесь нам следует отметить то интересное обстоятельство, что **Г.Е. Лозино-Лозинский** в 1930 году был выпускником Харьковского механико-машиностроительного института (ХММИ) по специальности "Теплотехника" и именно здесь он получил свою квалификацию инженера-паротехника [9]. Известно, что ХММИ в 1950 году вошел в состав Харьковского политехнического института (ХПИ) [10].



Рис. 17. Выдающийся советский авиаконструктор, Герой Труда, лауреат Ленинской премии и двух Государственных премий СССР в области науки и техники, "отец" корабля класса "Буран" Г.Е. Лозино-Лозинский (1909-2001 гг.) [9]

Поэтому это дает нам веское основание считать, что для Г.Е. Лозино-Лозинского *Alma mater* стал родной автору ХПИ. Возвращаясь снова к советскому космическому кораблю многоцелевого использования "Буран", укажем, что 15 ноября 1988 года он, сделав два витка вокруг Земли (см. рис.16), в автоматическом режиме приземлился на космодроме "Байконур" [7, 9]. Это стало мировой научно-технической сенсацией и триумфом напряженной и многолетней работы Г.Е. Лозино-Лозинского в ракетно-космической области.

Важным этапом в разработке и создании мощных ракетносителей военно-стратегического назначения были работы, проводимые в упомянутом выше КБ "Южное" (ОКБ-586) его главным конструктором, дважды Героем Труда, академиком АН СССР, выдающимся советским конструктором-ракетчиком **М.К. Янгелем** (рис. 18) [11, 12], 100-летие со дня рождения которого 25 октября 2011 года отмечала украинская и международная научно-техническая общественность. На основе его межконтинентальной баллистической ракеты "Р-16" (SS-7) в СССР было создано грозное ракетное оружие – ракета SS-18 ("Сейтен" или "Сатана") с автономной системой управления и разделяющейся боевой частью, содержащей до 10-ти индивидуально наводящихся на цели термоядерных боезарядов огромной разрушительной силы [1, 11].



Рис. 18. Выдающийся советский конструктор ракетно-космической техники, дважды Герой Труда, лауреат Ленинской и Госпремий СССР в области науки и техники, академик АН СССР Михаил Кузьмич Янгель (1911-1971 гг.) [11]

В последние годы эта ракета, наводившая неподдельный страх на западных специалистов-ракетчиков и простых граждан, после выработки своего боевого ресурса использовалась войсками стратегического назначения России без своей штатной боевой части для запуска в ближний космос различных космических аппаратов гражданского и военно-прикладного назначения. Упомянем здесь и о советском мобильном ракетном комплексе боевого назначения с ракетой SS-20 или "Сейбр" (рис. 19), принятым в вооружение в СССР в 1976 году и ставшим в свое время выдающимся достижением в области ракетной техники (генеральный конструктор – **А. Надирадзе**) [1,7].



Рис. 19. Советский мобильный ракетный комплекс с твердотопливной ракетой средней дальности SS-20, характеризующийся весом 37 т и дальностью стрельбы до 5000 км [1]

После неудач в масштабных работах по советской лунной программе в СССР основной акцент в области космических исследований был сделан на разработку и создание **орбитальных космических станций**, вращающихся вокруг планеты Земля на высоте до 400 км и содержащих на борту все необходимое (научную аппаратуру, системы жизнеобеспечения, спортивные тренажеры и др.) для длительной работы на них в условиях невесомости советских космонавтов-исследователей. Первым таким космическим "домом" для многих советских космонавтов стала **станция "Салют-1"**, выведенная СССР на околоземную орбиту 19 апреля 1971 года. Станция "Салют-1" имела общую длину около 20 м [1]. Данная космическая станция включала в себя три отсека, два из которых были герметичными (переходной и рабочий для космонавтов и приборов) и один негерметичный (агрегатный для размещения двигательной установки). В рабочем отсеке советской станции "Салют" находилась различная исследовательская аппаратура, приборы энергоснабжения и радиосвязи, устройства управления ней, система жизнеобеспечения космонавтов-исследователей и места для их отдыха.

После станций серии "Салют" в СССР новой космической научной лабораторией стала **станция "Мир"**, базовый блок которой был выведен на орбиту 20 февраля 1986 года с апогеем в 393 км (рис. 20) [7]. Отметим, что в 1990-е годы совместными усилиями сотрудников ХПИ Минобразования и науки Украины и Института проблем машиностроения НАН Украины, участвовавших в выполнении программы "Фермопостроитель", для космических исследований была создана разветвляющаяся (трансформируемая) механическая конструкция из легкого металла [13]. Эта металлическая конструкция с оптимальными жесткостно-весовыми характеристиками, защищенная авторскими свидетельствами СССР от 1990 года на изобретения №№ 1563155 и 1632774 (соавторы – проф. В.В. Бортовой, проф. А.Н. Подгорный и др.), была применена на орбитальной космической станции "Мир" для опытно-монтажных работ в открытом космосе [13].

Орбитальная космической станция "Мир" (рис. 21) после совершения ею в течение 5511 дней 89067

витков вокруг Земли была выведена из режима эксплуатации и 23 марта 2001 года введена в плотные слои атмосферы Земли, что произвело к полному сгоранию ее элементов (многие из нас видели эти телевизионные кадры, демонстрирующие падение на Землю ее сгорающих частей) [14]. На смену станции "Мир" пришла международная космическая станция "МКС", о которой кратко будет изложено в разделе 4.

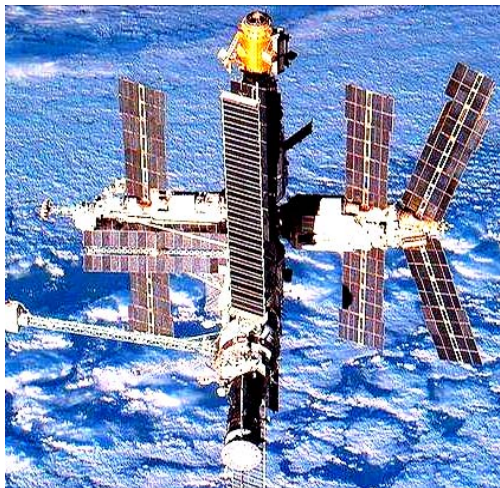


Рис. 20. Советская (российская) орбитальная космическая станция "Мир" (снимок сделан 24 сентября 1996 года) [14]

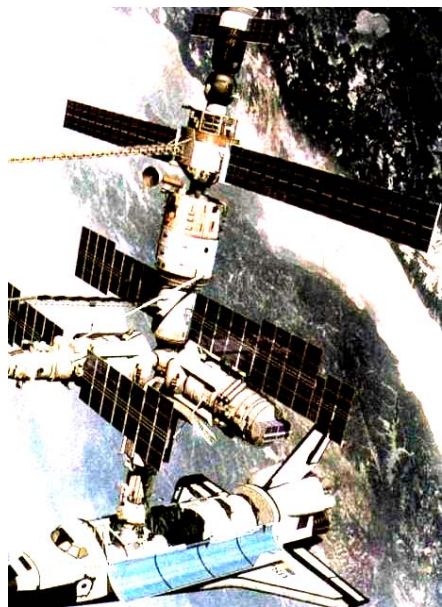


Рис. 21. Состыковка на околоземной орбите американского многоэтажного космического корабля класса "Шаттл" с советской космической станцией "Мир" (вверху этого снимка виден пристыковавшийся ранее к станции "Мир" российский транспортный космический корабль "Союз-ТМ") [1]

3. ДОСТИЖЕНИЯ США В СОЗДАНИИ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ И ОСВОЕНИИ КОСМОСА

Здесь нам сразу следует начать с того, что последующим всемирно известным достижениям США в освоении космического пространства, у истоков которых в 1950-х годах стоял выдающийся немецкий конструктор ракетной техники В. фон Браун, предшествовали указанные выше в разделе 1 соответствующие работы военного назначения данного ученого еще в Германии [1]. Используя в дальнейшем опыт приглашенных на работу в США немецких специалистов-ракетчиков, американские конструктора в 1951 году создали свою первую баллистическую ракету "Ви-

кинг", развивавшую наибольшую скорость полета около 6400 км/ч (до 1,8 км/с), которая была еще значительно меньше первой космической скорости, равной примерно 7,9 км/с [1, 15]. В 1952 году В. фон Браун разработал для США новую перспективную баллистическую ракету "Редстоун" (рис. 22) с дальностью полета до 900 км. Именно эта баллистическая ракета среднего класса была использована США при запуске 31 января 1958 года своего первого искусственного спутника "Эксплорер-1" (рис. 23), ставшего третьим ИСЗ в мире [1]. Этот американский спутник, имевший массу всего 8,21 кг, создавался с большой поспешностью в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технического университета [1]. В его состав входили: ионизационный счетчик частиц Гейгера, счетчик метеоритных частиц, датчики температуры, два радиопередатчика и источники питания к ним. Проработал первый американский ИСЗ "Эксплорер-1" на околоземной орбите всего около двух месяцев, в течение которых с него на Землю по радиоканалу были переданы важные результаты космических наблюдений, касающиеся, например, наличия вокруг Земли на высоте около 1000 км радиационного пояса [1].



Рис. 22. Подготовка к старту американской баллистической ракеты "Редстоун" (разработка от 1952 года переехавшего в США из побежденной во Второй мировой войне Германии на постоянное место своего жительства выдающегося немецкого конструктора-ракетчика В. фон Брауна) [1]

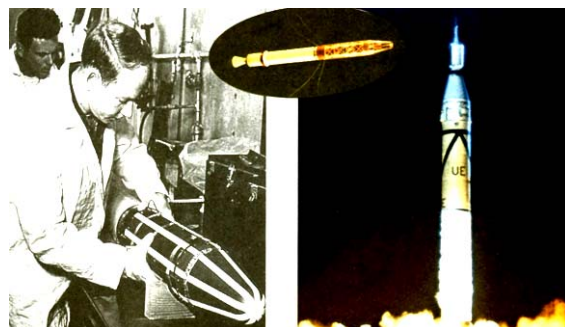


Рис. 23. Подготовка к запуску ИСЗ (слева) и ночной старт баллистической ракеты "Редстоун" (справа), вывешившей 31 января 1958 года на околоземную орбиту первый американский искусственный спутник "Эксплорер-1" (общий вид этого малогабаритного спутника приведен по центру) [1]

20 февраля 1962 года американский *астронавт Джон Гленн* впервые совершил свой первый пилотируемый полет на космическом корабле "Меркурий-6". Заметим, что свой последний космический полет знаменитый американский *астронавт* (этот термин происходит от греческих слов "astron" – "звезда" и

"*nautēs*" – "*мореплаватель*", применяется в ряде зарубежных стран и обозначает, как термин "*космонавт*", "*человека, совершающего полет в космос*" [2]) Дж. Гленн осуществил уже в пожилом возрасте 77 лет [7].

США после обескураживающего для них прорыва СССР первым в космос еще в период пребывания на посту президента этой великой державы Джона Кеннеди в 1960-е годы приняли стратегическую государственную программу – первыми посетить и вступить ногами американских астронавтов на ближайший к Земле ее естественный спутник – Луну. Под лунную программу США бюджетным комитетом американского сената было выделено около 20 миллиардов долларов (напомним, что под масштабный Манхэттенский проект США для создания атомной бомбы этим комитетом в 1940-е годы всего было выделено около 2 миллиардов долларов [16]). В рамках лунной программы в США под руководством В. фон Брауна были созданы новый мощный ракетоноситель "*Сатурн-5*" и *космический корабль "Аполлон"* [6,17]. В 1967 году на корабле "Аполлон-1", находящемся на стартовой площадке американского космодрома "Кеннеди" (мыс Канаверал, штат Флорида), в кабине астронавтов произошел пожар (вспыхнул избыточный кислород, как и в советском трагическом случае от 1961 года с В. Бондаренко, указанном в разделе 2), в результате которого погибли три американских астронавта – весь экипаж, готовившийся к отработке в космосе этого нового корабля. Без бесчисленных трудностей и утрат, как мы видим, не обходится в мире ни одно сложное дело, связанное с решением масштабных научно-технических задач. Важным для лунной программы США был пилотируемый космический полет американских астронавтов, состоявшийся в марте 1969 года на корабле "Аполлон-9", в течение которого была проведена обстоятельная проверка работоспособности и отработка спускаемого лунного модуля в условиях открытого космоса. Только после тщательной проверки готовности всех частей космического корабля "Аполлон-11" и ракетоносителя "Сатурн-5" в июле 1969 года состоялся исторический полет этого корабля с тремя астронавтами на борту на Луну. Американский астронавт *Нейл Армстронг* после трехсуточного полета с околоземной орбиты в сторону Луны первым из землян 20 июля 1969 года вступил на ее нехоженую нами поверхность (рис. 24) [1].

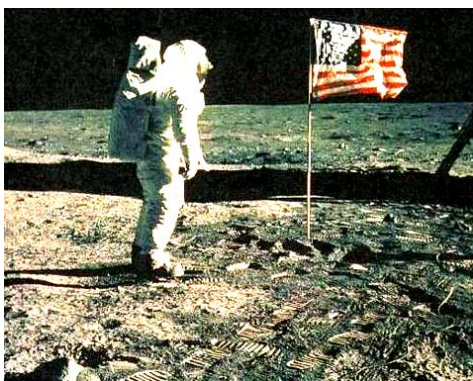


Рис. 24. Член американской лунной космической экспедиции Нейл Армстронг, первым из землян ступивший 20 июля 1969 года на поверхность Луны (его напарник Эдвин Олдрин во время этого исторического события вначале находился недалеко от него внутри спускаемого лунного модуля, а затем вышел из него и также спустился на ее грунт) [1]

Космический корабль "Аполлон-11" 24 июля 1969 года после завершения своей *космической миссии на Луну* приводнился в заданном районе Тихого океана.

Успешная высадка человека на Луну и его возвращение на Землю явились выдающимся событием в истории человечества. Это стало очередным триумфом как американской, так и мировой науки и техники.

Полет американского космического корабля "Аполлон-17" завершил пилотируемые лунные экспедиции землян на этот естественный спутник, удаленный от Земли примерно на расстоянии в $3 \cdot 10^3$ км [15]. После астронавтов Н. Армстронга и Э. Олдрина на Луне побывало еще шесть американских экипажей. В свое время известный американский летчик Чарльз Линберг, первым в мире пересекший в одиночку на самолете с бензиновым двигателем в 1928 году Атлантический океан [4], говорил: "*Достигнешь славы, – утратишь себя*". Знал ли Н. Армстронг эту крылатую фразу своего соотечественника мне неизвестно, но, как показали дальнейшие события, себя он после своей исторической и триумфальной высадки на Луну не потерял. Вскоре после своего исторического полета на Луну он ушел из NASA и авиации и в 1971 году стал профессором кафедры самолетостроения в техническом университете американского г. Цинцинатти, а с 1979 года плодотворно трудился в машиностроительной отрасли США. Личных встреч с корреспондентами газет, радио и телевидения он принципиально избегал. Редкие интервью и научно-технические комментарии в области авиации давал он заочно и только по электронной почте.

Вершины своей карьеры в области ракетостроения В. фон Браун достиг в 1972 году, когда он стал заместителем директора NASA и начальником космодрома США на мысе Канаверал (рис. 25). Для него ракетное призвание было важнее политических систем, в которых ему довелось работать и жить. Считается, что "отец" мирового ракетостроения, доктор В. фон Браун сумел донести высокое "пламя" своего научно-технического знания до человечества [17].



Рис. 25. В. фон Браун в период активных работ по разработке и созданию им ракетно-космической техники США [17]

В 1972 году США приступили к активной разработке орбитального *космического корабля многоразового использования "Шаттл"* [7, 9]. На протяжении нескольких десятилетий американские ученые и специалисты сконструировали ряд кораблей многоразового использования класса "Шаттл" (рис. 26), в том числе "*Колумбию*", "*Челленджер*", "*Дискавери*", "*Атлантис*" и "*Индевор*" [16]. Экипажи этих пилотируемых кораблей приняли непосредственное участие в создании на околоземной орбите космической станции "МКС" мощностью 110 кВт и в проводимых на ней обширных космических исследованиях [14,17].

В мае 1973 года на околоземную орбиту была выведена и первая американская *космическая станция "Скайлэб"* ("Небесная лаборатория"), внешний вид которой на фоне расположенных под ней земных облаков приведен на рис. 27. Она включала в себя: основной блок с научной аппаратурой, астрономическими приборами и астронавтами; шлюзовую камеру; конструкцию для причала космических кораблей с двумя стыковочными узлами; две солнечные батареи.



Рис. 26. Американский космический корабль многоразового использования класса "Шаттл" при орбитальном полете [17]

С 1990 года на околоземной орбите начал работать уникальный *космический телескоп США "Хаббл"* (рис. 28), названный в честь крупного американского ученого-астронома Эдвина Пауэлла Хаббла (1889-1953 гг.) [8]. В 1993 году с помощью американского многоразового космического корабля "Индевор" класса "Шаттл" был выполнен плановый технический ремонт в открытом космосе этого телескопа стоимостью до 1 миллиарда долларов США (рис. 29).



Рис. 27. Американская орбитальная космическая станция "Скайлэб", успешно летавшая не один год в ближнем космосе над Землей с астронавтами-исследователями [1]

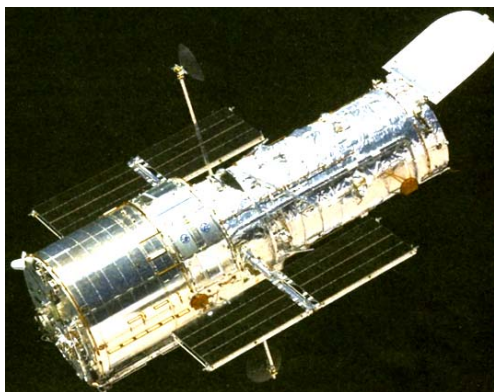


Рис. 28. Внешний вид уникальной американской космической обсерватории "Хаббл", "парящей" в открытом космосе на околоземной орбите и изучающей нашу вселенную [8]

С помощью данного уникального физического прибора (автоматической космической обсерватории США) ученым и специалистам на Землю было передано более 700 тысяч снимков около 22 тысяч звезд вселенной, космических туманностей и галактик [8]. Полученные при этом новые научные результаты подтвердили мнение ученых-астрономов о том, что окружающий нас открытый космос необходимо всесторонне активно изучать и дальше. Принято считать, что создание учеными и специалистами США космического телескопа "Хаббл" стало для землян подлинной научно-технической революцией в астрономии.

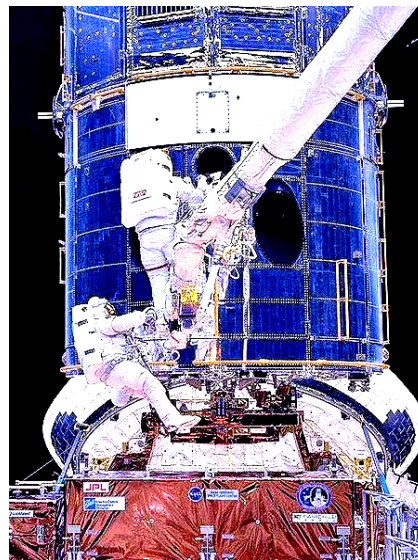


Рис. 29. Проведение американскими астронавтами в открытом космосе ремонта телескопа "Хаббл" с помощью "руки" манипулятора корабля "Индевор" класса "Шаттл" [17]

4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОСВОЕНИИ КОСМОСА

СССР и США в 1970-е годы всему миру продемонстрировали возможность научно-технического сотрудничества в мирном освоении космического пространства, окружающего Землю. Для этих целей специалистами этих двух великих космических держав вначале был разработан и изготовлен переходной отсек между их различающимися по конструкции космическими кораблями. Затем в июле 1975 года во время орбитального полета американского корабля "Аполлон" и советского корабля "Союз-19" была произведена их состыковка в космосе (рис. 30) для проведения их экипажами (от США – Т. Стаффорд, В. Бранд и Д. Слейтон; от СССР – А. Леонов и В. Кубасов) совместных космических исследований [1,5].



Рис. 30. Музейные экспонаты совместного полета в 1975 году на околоземной орбите американского космического аппарата "Аполлон" (слева) и советского космического корабля "Союз-19" (между этими кораблями разместился специально разработанный для этого переходной отсек) [1]

В этом уникальном совместном *полете космических кораблей "Аполлон" и "Союз-19"* советскими космонавтами и американскими астронавтами отраба-

тывался и возможный аварийный вариант по космическому спасению землян разных национальностей, оказавшихся в условиях космоса в реальной беде.

Для дальнейшего совместного исследования ближнего космоса 15 стран мира в конце 20-го столетия инвестировали свои денежные средства общим объемом до 100 млрд. долларов США в международный космический проект по созданию орбитальной космической станции. Российский космический корабль "Союз-ТМ" 20 ноября 1998 года вывел на околоземную орбиту первую секцию "Заря" массой $2 \cdot 10^4$ кг для международной *космической станции "МКС"* (рис. 31). При сборке орбитальной станции "МКС" были использованы механические "руки" манипулятора, установленного на американском многоэтажном космическом корабле класса "Шаттл" (см. рис. 21 и 26). При орбитальной скорости полета станции "МКС" массой $417,3 \cdot 10^3$ кг в 7,6 км/с апогей ее эллиптической орбиты над Землей равен около 406 км [17].

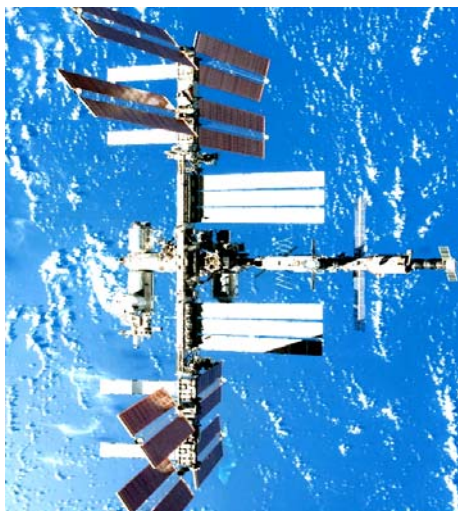


Рис. 31. Общий вид на фоне белых облаков и голубого океана Земли космической станции "МКС" (справа снимка, сделанного 30 мая 2011 года, виден пристыкованный к "МКС" российский космический корабль "Союз-ТМ") [17]

В настоящее время станция "МКС" активно используется землянами по своему прямому мирному назначению, ярко подчеркивающему в который раз всем людям неистребимый дух постоянного исследования нами окружающего нас сложного мира, генетически заложенный свыше в человеческой природе.

Остановимся вкратце на электроснабжении станции "МКС". Единственным источником электроэнергии для исследовательского или иного оборудования "МКС" является Солнце, свет которого ее солнечные батареи (рис. 32) преобразуют в электроэнергию [17].

Из данных рис. 31, 32 видно, что за 10 лет орбитального полета энергохозяйство станции "МКС" было значительно усилено. Отметим, что по ее краям размещены попарно гибкие складные панели американских солнечных батарей (СБ), образующие "крыло" СБ. Каждое такое "крыло" СБ имеет длину 35 м и ширину 11,6 м, а его полезная площадь составляет до 298 м². Вырабатываемая им суммарная электрическая мощность может достигать 32,8 кВт [17]. Американские СБ станции "МКС" генерируют первичное постоянное напряжение от 115 до 173 В. Это напряжение с помощью специального блока преобразуется во вторичное стабилизированное постоянное напряжение величиной 124 В [17]. Данное стабилизированное напряжение непосредственно используется для пита-

ния электрооборудования американского сегмента международной станции.



Рис. 32. Солнечные батареи станции "МКС" в 2001 году (видны российские батареи модулей "Заря" и "Звезда" и ферменная конструкция с американскими батареями) [17]

Что касается российского сегмента "МКС" (с модулями "Заря" и "Звезда"), то здесь от его СБ используется постоянное напряжение величиной 28 В. В указанный сегмент станции электроэнергия может передаваться и от СБ американского сегмента через специальный преобразователь напряжения типа ARCU. В случае передачи электроэнергии в обратном направлении (с российского на американский сегмент) используется преобразователь напряжения типа RACU [17]. При нахождении "МКС" в тени Земли её СБ не работают. Тогда электроснабжение "МКС" происходит от никель-водородных аккумуляторных батарей, регулярно подзаряжающихся, когда эта станция снова выходит на солнечный свет.

Одной из основных целей при создании станции "МКС" являлась возможность проведения на ней экспериментов, требующих наличия уникальных условий космического полёта: микрогравитации, вакуума и космического излучения, не ослабленного земной атмосферой. Главные направления научных исследований на "МКС" включают в себя: биологию (в том числе биомедицинские исследования и биотехнологию), физику (включая физику жидкостей, материаловедение и квантовую физику), астрономию, космологию и метеорологию [17]. Приведем ниже краткие сведения о некоторых научных исследованиях, проводимых космонавтами и астронавтами на станции "МКС". О влиянии микрогравитации на известный большинству землян химический процесс горения обычной свечи ярко и наглядно свидетельствуют данные российских космонавтов, приведенные на рис. 33.

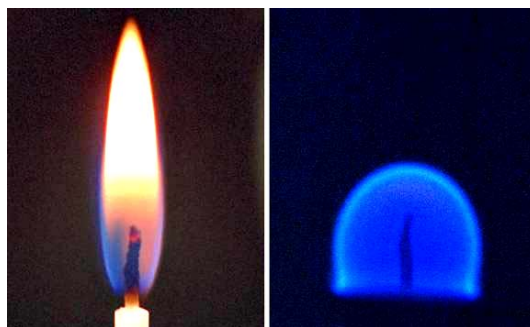


Рис. 33. Качественное сравнение между горением стеариновой свечи в земных условиях (слева) и в условиях невесомости (микрогравитации) на борту "МКС" (справа) [17]

Из данных рис. 33 видно, что космические условия принципиальным образом влияют на протекание процесса горения свечи и формирование его пламени. Известным примером международного сотрудничества в области физики пылевой плазмы стал космический эксперимент "Плазменный кристалл", проводимый рядом научных учреждений Германии и России, в том числе Институтом внеземной физики Общества Макса Планка, Институтом высоких температур и Институтом проблем химической физики РАН [17]. На рис. 34 приведены закрепленные вне герметичного объема "МКС" экспериментальные образцы материалов, исследуемых в условиях космического вакуума.



Рис. 34. Опытные образцы из различных материалов, исследуемые за бортом "МКС" на отдельных панелях в открытом космосе (этот снимок был сделан 13 августа 2007 года) [17]

На "МКС" космическими исследователями России и Германии был проведен совместный медико-биологический эксперимент "Матрёшка-Р", в котором для определения поглощённой дозы ионизирующих излучений использовались разные манекены (эквиваленты биологических объектов), созданные в Институте медико-биологических проблем РАН и Кёльнском институте космической медицины [17]. Российскими космонавтами в коммерческих интересах Европейского космического агентства и Японского агентства аэрокосмических исследований вне "МКС" были проведены испытания робототехнической экспериментальной системы ROKVISS, разработанной в Институте робототехники и механотроники (г. Веслинг, Германия) [17]. В качестве примера медико-биологических исследований, выполненных американскими астронавтами на "МКС", можно привести изучение патогенности одного из возбудителей герпеса, называемого вирусом Эпштейна – Барра (рис. 35).

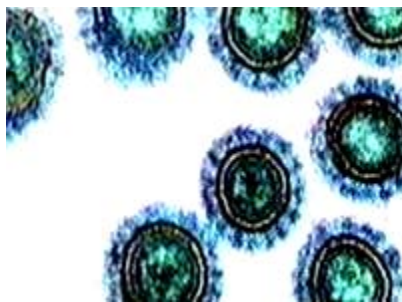


Рис. 35. Вирус Эпштейна – Барра, показанный с помощью техники окрашивания флуоресцентными антителами [17]

По статистическим данным около 90 % взрослого населения США являются носителями латентной формы этого вируса [17]. Известно, что в условиях космического полёта и воздействующей радиации происходит ослабление работы иммунной системы человека. Следует указать, что в сутки члены экипажа станции "МКС" из-за непрерывных потоков космических лучей получают дозу радиации в размере около 1 миллизиверта, что примерно равнозначно облучению человека на Земле за целый год ослабленным земной атмосферой космическим излучением [17]. В этой связи этот вирус при полете может активизироваться и стать причиной заболевания членов экипажа орбитальной станции. В программу исследований японских астронавтов на "МКС", проводимых в лабораторном модуле "Кибо", входит изучение процессов глобального потепления на Земле, ее озонового слоя и опустынивания земной поверхности, а также проведение ряда астрономических исследований в рентгеновском диапазоне. Кроме того, на указанном орбитальном модуле запланированы эксперименты по созданию белковых кристаллов, призванные помочь понять внутренние механизмы ряда болезней человека и направленные на разработку новых методов их лечения. Здесь будет изучаться также действие микрогравитации и радиации на растения, животных и людей, а также будут проводиться космические опыты по робототехнике, в области коммуникаций и электроэнергетики [17]. Большую помощь космонавтам (астронавтам) в наблюдениях за космосом, Землей и проведении на "МКС" научных экспериментов оказывает прозрачный обзорный купол (рис. 36), установленный на ее узловом модуле "Транквилити" [17].

Указанный обзорный купол "МКС" имеет семь иллюминаторов (самый большой из них – центральный диаметром 0,8 м) и используется при выполнении всех стыковок космических аппаратов со станцией.



Рис. 36. Астронавт Трейси Колдвэл, наблюдающая при отдыхе из обзорного купола "МКС" за планетой Земля [17]

В заключение этого очерка мне хочется сказать, что среди людей часто говорят о том, что время неминуемо стирает многие облики и события прошлого. Долго остаются в людской памяти лишь очень важные исторические моменты, кардинально повлиявшие на ход человеческой истории. На взгляд автора, к таким событиям можно отнести создание в нашем мире управляемых тяжелых межконтинентальных баллистических ракет, доставляющих термоядерный заряд

огромной разрушительной силы практически в любую точку на земном шаре. Именно их создание и сделало невозможным развязывание мировой термо-ядерной войны. Страх самоуничтожения самого агрессора в такой войне сковывает его разум, действия и руки от нажатия пусковой кнопки такого страшного оружия. Поэтому СССР до освоения человеком ближнего космоса необходимо было, прежде всего, создать надежный ракетно-ядерный щит. В этой связи в конце 1956 года выдающийся советский физик-ядерщик, академик АН СССР Игорь Васильевич Курчатов сказал следующее [16, 18]: "Советские конструкторы ракет и других носителей ядерного и термоядерного оружия блестяще сделали свое дело. Народ может быть спокоен. Оборона Родины теперь надежно обеспечена". После этого конструкторам-ракетчикам можно было, хотя и опять в спешном порядке (ух, уж этот мировой приоритет!), активно браться за покорение и мирное освоение ближнего и дальнего космоса, постоянно манящего к себе издревле человека своей бескрайностью, неизвестностью и таинственностью.

О некоторых важных научно-технических достижениях мирового сообщества ученых в изучении дальнего космоса с помощью беспилотных космических аппаратов (станций) и доставленных на них в бескрайние просторы космоса не- и управляемых с Земли человеком автоматических роботов, включая Селену (второе название Луны [18]), Венеру, Марс, Сатурн, Юпитер и другие планеты солнечной системы, автором в краткой форме будет рассказано в одном из его последующих научно-популярных очерков на страницах этого журнала в исторической рубрике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Склярченко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
2. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
3. <http://vakul.ru/istoriya-aviacii/nachalo-reaktivnogo-veka>.
4. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 14: Изобретение двигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2013. – № 3. – С. 3-15.
5. Романов А.П. Конструктор космических кораблей. – М.: Политиздат, 1976. – 190 с.
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/ПД-253>.
7. <http://www.lpre.de/resources/articles/Energia.pdf>.
8. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
9. Игнатченко А. Генеральный конструктор "Бурана" – выпускник ХПИ // Газета "Політехник". – № 25 (2324) від 23 грудня 2009 р. – 3 с.
10. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт": Фотоальбом / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Г.В. ЛИСАЧУК, И.М. ШЕПТУН; Под общей ред. проф. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – 212 с.
11. <http://space.hobby.ru/yangel.html>.
12. Губарев В.С. Конструктор. Несколько страниц из жизни Михаила Кузьмича Янгеля. – М.: Политиздат, 1977. – 110 с.
13. Назаренко С. Космический памятник политехникам // Газета "Політехник". – № 7 (2382) від 29 березня 2012 р. – 3 с.
14. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Мир_\(орбитальная_станция\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Мир_(орбитальная_станция)).
15. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
16. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 7: Создание ядерного и термоядерного оружия // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 3-15.
17. [http://ru.wikipedia.org/wiki/МКС_\(космическая_станция\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/МКС_(космическая_станция)).
18. Астащенко П.Т. Орбиты главного конструктора. – М.: ДОСААФ, 1973. – 169 с.

Bibliography (transliterated): 1. Skljarenko V.M., Sjadro V.V. *Otkrytija i izobrenenija*. Har'kov, Vesta Publ., 2009. 144 p. 2. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov*. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. 3. Available at: <http://vakul.ru/istoriya-aviacii/nachalo-reaktivnogo-veka> (accessed 31 May 2012). 4. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 14: Invention of engines. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.3, pp. 3-15. 5. Romanov A.P. *Konstruktor kosmicheskikh korabelej*. Moscow, Politizdat Publ., 1976. 190 p. 6. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/RD-253> (accessed 31 May 2012). 7. Available at: <http://www.lpre.de/resources/articles/Energia.pdf> (accessed 31 May 2012). 8. Klimov A.A. *Bol'shaja kniga znanij*. Har'kov, Vesta Publ., 2010. 160 p. 9. Ignatchenko A. General'nyj konstruktor "Burana" – vypusknik HPI. *Newspaper "Politekhnyk"*, 23.12.2009, no.25 (2324). 3 p. 10. Tovazhnjanskij L.L., Lisachuk G.V., Sheptun I.M. [Pod obshhej red. prof. Tovazhnjanskogo L.L.]. *Nacional'nyj tehničeskij universitet "Har'kovskij politehničeskij institut": Fotoal'bom*. Har'kov, NTU "HPI" Publ., 2005. 212 p. 11. Available at: <http://space.hobby.ru/yangel.html> (accessed 31 May 2012). 12. Gubarev V.S. *Konstruktor. Neskol'ko stranic iz zhizni Mihaila Kuz'micha Jangelja*. Moscow, Politizdat Publ., 1977. 110 p. 13. Nazarenko S. Kosmicheskij pamjatnik politehnikam. *Newspaper "Politekhnyk"*, 29.03.2012, no.7 (2382). 3 p. 14. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Mir_\(orbital'naja_stancija\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Mir_(orbital'naja_stancija)) (accessed 31 May 2012). 15. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki*. Kiev, Naukova dumka publ., 1989. 864 s. 16. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 7: Nuclear and thermonuclear weapon creation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 3-15. 17. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/MKS_\(kosmicheskaja_stancija\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/MKS_(kosmicheskaja_stancija)) (accessed 31 May 2012). 18. Astashenkov P.T. *Orbity glavnogo konstruktora*. Moscow, DOSAAF publ., 1973. 169 p.

Поступила (received) 31.05.2012

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ",
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov
Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya"
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine
An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 18: Rocket engineering and near-space exploration.

A brief scientific and historical essay on the history of designing rocket technology and exploring near and outer space around the Earth is given.

Key words – history, rocket technology, space exploration.

МАССОСТОИМОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ АКСИАЛЬНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С КРУГОВЫМИ И ШЕСТИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ СТЕРЖНЕЙ ВИТЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімуму маси та вартості активної частини, а також показані переваги використання шестигранних конфігурацій перерізів стержнів в просторовій аксіальній трифазній електромагнітній системі з двоконтурними фазними елементами витого стикового магнітопроводу.

Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы и стоимости активной части, а также показаны преимущества использования шестигранных конфигураций сечений стержней в пространственной аксиальной трехфазной электромагнитной системе с двухконтурными фазными элементами витого стыкового магнитопровода.

ВВЕДЕНИЕ

Требования минимальных массогабаритных показателей оборудования объектов специальной техники обуславливают важность и актуальность разработки компактных трехфазных трансформаторов с конфигурациями электромагнитных систем (ЭМС), приближенными к цилиндрам и сферам [1].

Во второй половине прошедшего века разработаны технологии изготовления холоднокатаной электротехнической стали (ЭТС) и витых ленточных (рулонных) магнитопроводов с преимуществами относительной простоты автоматизации и снижения трудоемкости производства [2]. На основе таких технологий выпускаются трехфазные трансформаторы, в частности ТСЗМ и ТСЗМВ, отличающиеся пространственными аксиальными ЭМС и улучшенными, согласно [3], массогабаритными характеристиками. Структуры подобных ЭМС соответствуют рис. 1 и характеризуются двухконтурными фазными элементами стержней секционированного магнитопровода и "традиционными" круговыми образующими контурами (ОК) стержней и обмоточных катушек. Такие ОК обеспечивают круговую намотку и минимизацию средней длины витков обмоточных катушек. Однако указанные ОК увеличивают диаметр D_k окружности описанной вокруг поперечного сечения ЭМС (рис. 1) и не полностью заполняются сечениями стержней, которые выполняются из лент (рулонов) ЭТС различной или изменяющейся ширины [2, 4]. Поэтому круговые ОК при малом их заполнении сечением стержня повышают габариты и массу ЭМС, а при относительно высоком заполнении существенно усложняют технологию производства магнитопроводов.

Упрощение технологии изготовления пространственного витого секционированного магнитопровода и дополнительное повышение показателя компактности трехфазного трансформатора или реактора достигается заменой круговых ОК на шестигранные ОК катушек обмоток и стержней разрезного стыкового магнитопровода (рис. 2) [5].

Целью работы является сравнительный анализ массостоимостных показателей конструкций ЭМС (рис. 1 и рис. 2) с круговыми и шестигранными ОК, а также определение геометрических параметров, определяющих размерные соотношения технологической заготовки ЭТС секции ЭМС (рис. 2).

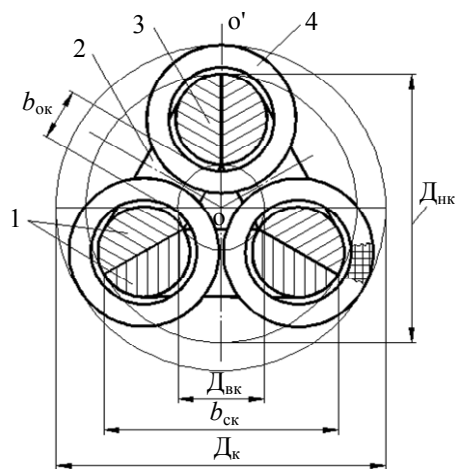


Рис. 1. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

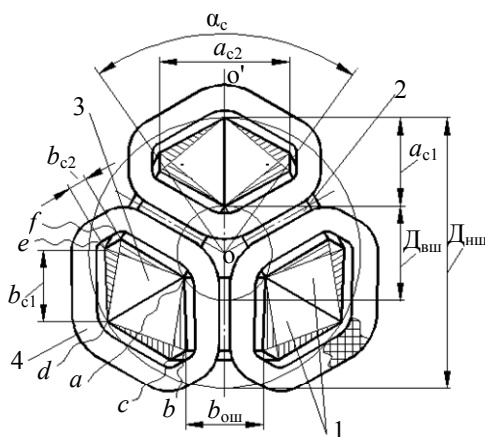


Рис. 2. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР СРАВНИВАЕМЫХ ВАРИАНТОВ

Формированию магнитопровода трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с круговыми (рис. 1)

и шестигранными (рис. 2) ОК из трех секций с вариантами поперечного сечения (рис. 3,а) и прямоугольным внутренним контуром (рис. 3,б) соответствует образованию сечений стержней соответственно из нескольких четырехугольных участков, вписанных в окружность [4] и из двух трапециевидальных участков, образующих симметричный шестигранник $abcdef$ с осью симметрии ограниченной центральным углом стержня α_c [5]. Секции (рис. 3) выполняются навивкой со смещением по оси OO' (рис. 3,а) смежных витков заготовок (разверток) ЭТС вида (рис. 4). Заготовка для формирования секции ЭМС (рис. 1) содержит четырехугольные участки с параллельными пунктирными и непараллельными сторонами, ограниченными сплошной и пересекающимися прямыми линиями (рис. 4). Коэффициент заполнения кругового ОК сечением стержня в стыке двух секций ЭМС (рис. 1), навитых из заготовок ЭТС с представленной пунктирной линией криволинейной образующей (рис. 4), составляет постоянное значение $K_{\text{кк}} = 0,904$ для трехфазных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А [4]. Замена полукруглого ОК на трапециевидальный

в вариантах поперечного сечения секций (рис. 3,а) обеспечивает уменьшение контурного диаметра D_k (рис. 1) и упрощение конфигурации развертки ЭТС (рис. 4), а также коэффициент заполнения шестигранного ОК сечения стержня $K_{\text{кш}} \approx 1$, то есть важные конструктивно-технологические преимущества.

Упрощение изготовления секций магнитопровода и повышение коэффициента заполнения ОК сечения стержня до $K_{\text{кш}} \approx 1$ достигается заменой кусочно-линейной конфигурации заготовки ЭТС, представленной сплошными линиями на рис. 4 на более простую, ограниченную треугольным $gg'h$ и прямоугольным $abgg'$ участками. Заготовка $abgh$ выполняется разделением исходной прямоугольной ленты (рулона) ЭТС ширины ab на две идентичные части с треугольными $gg'h$ и прямоугольными $abgg'$ участками, а также длиной соответственно $l_{\text{ш1}}$ и $l_{\text{ш2}}$ (рис. 4) [5].

При увеличении угла α_c относительно значения, соответствующего равностороннему шестиграннику, до соотношения сторон $b_{c1}/b_{c2}=3...4$, контурный объем ЭМС (рис. 2) снижается на 15...20 %.

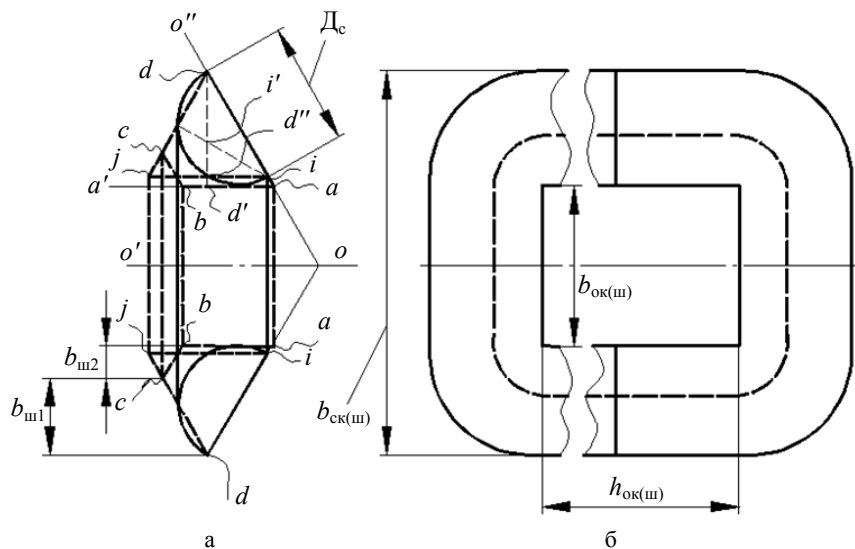


Рис. 3. Варианты конфигурации поперечного сечения (а) и вида сбоку (б) секции витого магнитопровода с двухконтурными фазными элементами стержней

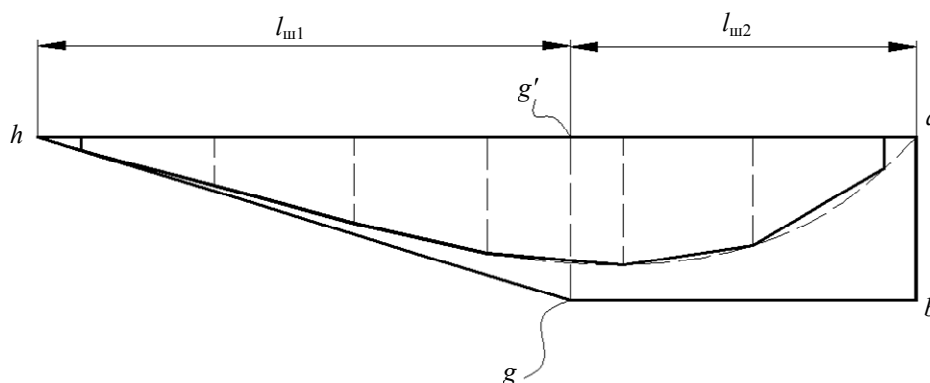


Рис. 4. Условная схема вариантов развертки электротехнической стали для навивки секции магнитопровода с двухконтурными фазными элементами

МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Сравнительный анализ двух различных вариантов ЭМС выполняется в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности и методом структурной оптимизации [6] на основе определения и

сравнения показателей технического уровня. В соответствии с поставленной целью в настоящей работе определяются целевые функции $F_{\text{цм}(с)}$ массы (стоимости) с относительными показателями массы (стоимости) активной части:

$$F_{цм(с)} = (\sqrt[4]{\Pi_{и}})^3 K_{м(с)} \Pi_{м(с)а}^* ; \quad (1)$$

$$\Pi_{м(с)а}^* = f(K_{зо}, a_m, \lambda_o, \alpha_c), \quad (2)$$

где $\Pi_{и}$ – показатель исходных данных (технического задания на проектирование и электромагнитных нагрузок) трансформатора или реактора; $K_{м(с)}$ и $\Pi_{м(с)а}^*$ – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов и относительный коэффициент – показатель массы (стоимости) активной части; $K_{зо}$ – соответствующий классу напряжения коэффициент заполнения обмоточного окна проводящим материалом обмоточного провода; a_m и λ_o – основные относительные геометрические управляемые переменные; угол α_c – дополнительная геометрическая управляемая переменная, используемая в некоторых ЭМС.

Относительные управляемые переменные целевых функций (1) и (2) вариантов ЭМС (рис. 1, рис. 2) являются соотношениями их геометрических параметров [6]:

$$a_m = D_{нк(ш)} / D_{вк(ш)} ; \quad (3)$$

$$\lambda_o = h_{ок(ш)} / b_{ок(ш)} , \quad (4)$$

где $D_{нк(ш)}$ и $D_{вк(ш)}$ – наружный и внутренний расчетные диаметры (рис. 1, 2); $h_{ок(ш)}$ и $b_{ок(ш)}$ – высота и ширина обмоточного окна (рис. 3,б).

Определение относительных показателей массы $\Pi_{мак(ш)}^*$ и стоимости $\Pi_{сак(ш)}^*$ вариантов ЭМС с круговыми (рис. 1) и шестигранными (рис. 2) ОК выполняется на основе известных, например из [7], уравнений связи площади ЭТС поперечного сечения стержня $S_{ск(ш)}$ с площадью обмоточного окна $S_{ок(ш)}$, а также массы проводящего материала обмотки $m_{ок(ш)}$ трехфазного трансформатора:

$$S_{ск(ш)} = \Pi_{и} / (K_{зо} S_{ок(ш)}) ; \quad (5)$$

$$m_{ок(ш)} = 1,5 \gamma_o K_{зо} S_{ок(ш)} l_{вк(ш)} , \quad (6)$$

где γ_o – плотность обмоточного провода; $l_{вк(ш)}$ – средняя длина витка катушки чередующейся обмотки с круговыми (шестигранными) ОК.

При сравнительном анализе рассматриваемых вариантов ЭМС (рис. 1, 2) на основе (1) и (2) и в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности принимается, что средние значения амплитуд индукции магнитного поля, а также коэффициенты заполнения сечений секций магнитопровода ЭТС $K_{зс}$ [4] соответственно идентичны. Радиусы соответственно окружностей и кольцевых изгибов угловых зон средних витков чередующихся фазных катушек определяются четвертью ширины обмоточного окна $b_{ок(ш)}$. Пренебрегается радиусом углового изгиба внутреннего витка ЭТС секции (рис. 3,б). Показатели исходных данных сравниваемых ЭМС в определении оптимальных геометрических соотношений не используются, но в соответствии с указанным принципом принимаются идентичными $\Pi_{ик} = \Pi_{шш} = \Pi_{и}$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

МАССОСТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ С КРУГОВЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ

Обоснование вида уравнений (1) и (2) соответствующих ЭМС (рис. 1) осуществляется с использова-

нием (3) и выражений диаметра D_c , а также площади ЭТС $S_{ск}$ сечения стержня с круговым ОК:

$$D_c = (D_{нк} - D_{вк}) / 2 = D_{вк} (a_m - 1) / 2 ; \quad (7)$$

$$S_{ск} = \pi K_{зс} K_{кк} D_c^2 / 4 = \pi K_{зс} K_{кк} D_{вк}^2 (a_m - 1)^2 / 16 . \quad (8)$$

Минимальная ширина обмоточного окна $b_{ок}$ магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется через $D_{вк}$ и a_m с использованием (3), (7) и уравнения:

$$(b_{ок} + D_c) / 2 = (D_{нк} - D_{к}) \sin(\pi/3) / 2 ;$$

$$b_{ок} = 0,933 D_{вк} (1 - 0,0718 a_m) . \quad (9)$$

Ширина секции (рис. 3) магнитопровода ЭМС (рис. 1) выражается через $D_{вк}$ и (3) соотношением

$$b_{ск} = D_{нк} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} a_m D_{вк} / 2 . \quad (10)$$

Масса магнитопровода ЭМС с круговыми ОК пропорциональна сумме объемов стержневых, яремных и угловых участков секции, представленной на рис. 3,а сплошными линиями. Суммарный объем стержневых и яремных участков секции соответствует объему двух цилиндров с диаметром D_c и высотами $h_{ок}$ и $b_{ок}$ (рис. 3,б). Суммарный объем четырех угловых участков секции образован вращением половины окружности диаметра D_c относительно касательной прямой aa' (рис. 3,а). В идеализированном варианте с $K_{кк} = 1$ объем и масса ЭТС секции с полукруглым сечением определяется площадью заготовки ЭТС для ее навивки, ограниченной сплошной прямой и прерывистой кривой линиями. Площадь ЭТС реальной заготовки секции магнитопровода с $K_{кк} < 1$ образована суммарной площадью упомянутых выше четырехугольных участков, ограниченных сплошными прямыми линиями (рис. 4).

На основе геометрического моделирования установлена практическая идентичность объемов тел образованных вращением полуокружности диаметра D_c и треугольника idj со сторонами равными D_c относительно прямой aa' при условии совмещения id с D_c , а также положений aa' и ij под углом $\pi/3$ к оси OO'' (рис. 3,а).

Расстояние от вершины d треугольника idj до прямой aa' , определяется на основе (9) и (10)

$$dd' = (b_{ск} - b_{ок}) / 2 = 0,4665 D_{вк} (a_m - 1) . \quad (11)$$

Радиус вращения $d'd''$ стороны ij относительно линии aa' , центр тяжести $i'd''$ и площадь S_{idj} треугольника idj определяются с использованием (7) и (11):

$$d'd'' = dd' - D_{к} \sin(\pi/3) = 0,03249 D_{вк} (a_m - 1) ; \quad (12)$$

$$i'd'' = D_{к} \operatorname{tg}(\pi/6) / 2 = D_{вк} (a_m - 1) / (4\sqrt{3}) ; \quad (13)$$

$$S_{idj} = D_{к}^2 \sqrt{3} / 4 = 0,108253 D_{вк}^2 (a_m - 1)^2 . \quad (14)$$

Объем угловых зон секции магнитопровода ЭМС (рис. 1,а)

$$V_{ук} \approx 2\pi(d'd'' + i'd'') S_{idj} = 0,12028 D_{вк}^3 (a_m - 1)^3 . \quad (15)$$

Масса магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется, с учетом (4) и при подстановке (7), (9) и (15), уравнением

$$m_{МК} \approx 3\gamma_c K_{зс} K_{кк} \left(\pi D_{к}^2 h_{ок} / 4 + \pi D_{к}^2 b_{ок} / 4 + V_{ук} \right) =$$

$$= 0,5496 \gamma_c K_{зс} K_{кк} D_{вк}^3 [(\lambda_o + 1)(1 - 0,0718 a_m) \times$$

$$\times (a_m - 1)^2 + 0,656544 (a_m - 1)^3] \quad (16)$$

Из равенства (5) и (8), с учетом (4) и (9), следует:

$$S_{СК} = \Pi_{И} / (K_{30} \lambda_0 b_{OK}^2) = \pi K_{3C} K_{KK} D_{BK}^2 (a_M - 1)^2 / 16;$$

$$D_{BK} = 1,555 \sqrt[4]{\Pi_{И} / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]}, \quad (17)$$

где $f_K(a_M, \lambda_0)$ – составляющая (17) в виде произведения,

$$f_K(a_M, \lambda_0) = \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 1)^2.$$

Подстановка (17) преобразует (16) к виду

$$m_{МК} = \gamma_C \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{МК}^*, \quad (18)$$

где $\Pi_{МК}^*$ – относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 1),

$$\Pi_{МК}^* \approx 2,0665 K_{3C} K_{KK} \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times$$

$$\times \left[(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,65654(a_M - 1)^3 \right] \quad (19)$$

Средняя длина витка каждой из фазных катушек ЭМС (рис. 1) определяется на основе (7) и (9)

$$l_{WK} = \pi(D_K + b_{OK}/2) = 1,46555 D_{BK} (a_M - 0,07181). \quad (20)$$

С использованием (4) и (9), а также подстановки (20), уравнение (6) представляется в виде

$$m_{OK} = 1,5 \gamma_0 K_{30} \lambda_0 b_{OK}^2 l_{WK} = 1,91362 \gamma_0 K_{30} \lambda_0 \times$$

$$\times D_{BK}^3 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181). \quad (21)$$

Подстановкой (17), (21) преобразуется

$$m_{OK} = \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{МОК}^*, \quad (22)$$

где $\Pi_{МОК}^*$ – относительный показатель массы обмоточного провода ЭМС (рис. 1),

$$\Pi_{МОК}^* = 7,1953 K_{30} \lambda_0 \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times$$

$$\times (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181). \quad (23)$$

Масса $m_{ак}$ и стоимость $C_{ак}$ активных материалов ЭМС (рис. 1) определяется на основе (18) – (19) и (22), (23) уравнениями вида (1):

$$m_{ак} = m_{МК} + m_{OK} = \gamma_C \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{мак}^*;$$

$$C_{ак} = C_{МК} + C_{OK} = \gamma_C C_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{сак}^*,$$

где $\Pi_{мак}^*$ и $\Pi_{сак}^*$ – соответствующие (2) относительные показатели,

$$\Pi_{мак}^* \approx 2,0665 \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3C} K_{KK} \times$$

$$\times [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,65654(a_M - 1)^3] +$$

$$+ 3,48188 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 \times$$

$$\times (a_M - 0,07181) \gamma_0 / \gamma_C \}; \quad (24)$$

$$\Pi_{сак}^* \approx 2,0665 \left(\sqrt[4]{1 / K_{3C} K_{30} K_{KK} [f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3C} K_{KK} \times$$

$$\times [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,65654(a_M - 1)^3] +$$

$$+ 3,4819 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 \times$$

$$\times (a_M - 0,07181) C_0 \gamma_0 / (C_C \gamma_C) \}. \quad (25)$$

Экстремальные значения $\Pi_{мак}^*$ и $\Pi_{сак}^*$ функциональных зависимостей (24), (25), полученные для трех значений K_{30} и двух (идеализированном и реальном) значений K_{KK} приведены в табл. 1, 2 в сравнении с аналогичными значениями $\Pi_{мап}^*$ и $\Pi_{сап}^*$ [7] традиционной конструкции планарной ЭМС с прямоугольным сечением стержней шихтованного магнитопровода [2, 4]. Показатели $\Pi_{мак}^*$, $\Pi_{сак}^*$ и $\Pi_{мап}^*$, $\Pi_{сап}^*$ определены при

использовании медного обмоточного провода и анизотропной ЭТС марки 3407 с соотношением плотностей ($кг/м^3$) $\gamma_0/\gamma_C = 8,9/7,65$ и стоимостей $C_0/C_C = 4$, а также $K_{3C} = 0,97$ [8].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАССОСТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ С ШЕСТИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ

Обоснование вида уравнений (1) и (2) соответствующих ЭМС (рис. 2) выполняется с представлением в виде функций от α_C и (3) размеров радиальной a_{C1} и угловой a_{C2} ширин, а также сторон b_{C1} и b_{C2} стержня магнитопровода:

$$a_{C1} = (D_{ВШ} - D_{ВШ})/2 = D_{ВШ} (a_M - 1)/2; \quad (26)$$

$$a_{C2} = (D_{ВШ} + a_{C1}) \operatorname{tg}(\alpha_C/2) = D_{ВШ} f_{Ш1}(a_M, \alpha_C)/2; \quad (27)$$

$$b_{C1} = a_{C2} / [2 \sin(\pi/3)] = D_{ВШ} f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) / (2\sqrt{3}); \quad (28)$$

$$b_{C2} = a_{C1} - 2b_{C1} \sin(\pi/6) = D_{ВШ} f_{Ш2}(a_M, \alpha_C)/2, \quad (29)$$

где $f_{Ш1}(a_M, \alpha_C)$ и $f_{Ш2}(a_M, \alpha_C)$ – сомножители,

$$f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) = (a_M + 1) \operatorname{tg}(\alpha_C/2); \quad (30)$$

$$f_{Ш2}(a_M, \alpha_C) = a_M - 1 - f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) / \sqrt{3}. \quad (31)$$

Площадь ЭТС сечения $abcdef$ (рис. 2) определяется, с учетом (26) – (31), уравнением

$$S_{СШ} = K_{3C} [b_{C1} a_{C2} \sin(\pi/6) + b_{C2} a_{C2}] =$$

$$= K_{3C} D_{ВШ}^2 f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) f_{Ш3}(a_M, \alpha_C) / 4, \quad (32)$$

где $f_{Ш3}(a_M, \alpha_C)$ – сомножитель,

$$f_{Ш3}(a_M, \alpha_C) = a_M - 1 - f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) / (2\sqrt{3}). \quad (33)$$

Ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 2)

$$b_{ОШ} = D_{ВШ} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} D_{ВШ} / 2. \quad (34)$$

Геометрические параметры $b_{Ш1}$ и $b_{Ш2}$ секции (рис. 3,а) магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяются на основе (28), (29):

$$b_{Ш1} = b_{C1} \sin(\pi/3) = D_{ВШ} f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) / 4; \quad (35)$$

$$b_{Ш2} = b_{C2} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} D_{ВШ} f_{Ш2}(a_M, \alpha_C) / 4. \quad (36)$$

Число витков ЭТС толщиной δ_C в участках ширины $b_{Ш1(2)}$ (рис. 3,а)

$$n_{ВШ1(2)} = b_{Ш1(2)} / \delta_C. \quad (37)$$

Средние длины витков ЭТС секции магнитопровода $l_{ВШ1(2)}$ ЭМС (рис. 2) на участках $b_{Ш1(2)}$ находятся исходя из (4) и (34) – (36):

$$l_{ВШ1} = 2(h_{ОШ} + b_{ОШ}) + 2\pi(b_{Ш2} + b_{Ш1}/2) =$$

$$= \sqrt{3} D_{ВШ} F_{Ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_C); \quad (38)$$

$$l_{ВШ2} = 2(h_{ОШ} + b_{ОШ}) + \pi b_{Ш2} =$$

$$= \sqrt{3} D_{ВШ} F_{Ш2}(a_M, \lambda_0, \alpha_C), \quad (39)$$

где $F_{Ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_C)$ и $F_{Ш2}(a_M, \lambda_0, \alpha_C)$ – сомножители,

$$F_{Ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_C) = 1 + \lambda_0 + \pi f_{Ш3}(a_M, \alpha_C) / 2; \quad (40)$$

$$F_{Ш2}(a_M, \lambda_0, \alpha_C) = 1 + \lambda_0 + \pi f_{Ш2}(a_M, \alpha_C) / 4. \quad (41)$$

Длины треугольного $l_{Ш1}$ и прямоугольного $l_{Ш2}$ участков заготовки ЭТС (рис. 4) для навивки секций магнитопровода ЭМС (рис. 2) представляются на основе (37) – (41) выражениями:

$$l_{Ш1} = n_{ВШ1} l_{ВШ1} = \sqrt{3} D_{ВШ}^2 f_{Ш1}(a_M, \alpha_C) \times$$

$$\times F_{Ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_C) / (4\delta_C); \quad (42)$$

$$l_{ш2} = n_{вш2} l_{вш2} = 3 D_{вш}^2 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) \times (43) \\ \times F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) / (4 \delta_c).$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяется с использованием (28) и (42), (43)

$$m_{мшш} = 3 \gamma_c K_{3c} \delta_c (b_{c1} l_{ш2} + b_{c1} l_{ш1} / 2) = \\ = 0,1875 \gamma_c K_{3c} D_{вш}^3 [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + (44) \\ + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)].$$

Из равенства (5) и (32), с учетом (4), (30) и (32) – (34) следует:

$$S_{сшш} = \Pi_{и} / (K_{3o} \lambda_o b_{ош}^2) = \\ = K_{3c} D_{вш}^2 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c) / 4; \\ D_{вш} = 2 \sqrt{\Pi_{и} / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]}. (45)$$

Подстановка (45) преобразует (44) к виду

$$m_{мшш} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{мшш}^*, (46)$$

где $\Pi_{мшш}^*$ – относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 2),

$$\Pi_{мшш}^* = \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ \times 1,5 K_{3c} [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + (47) \\ + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)].$$

Средняя длина витка фазной катушки ЭМС (рис. 2) представляется, исходя из (28), (29) и (34) выражением

$$l_{вшш} = 4 b_{c1} + 2 b_{c2} + \pi b_{ош} / 2 = 1,1547 D_{вш} \times \\ \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] (48)$$

После подстановки (4), (34) и (48) уравнение (6) принимает вид

$$m_{ошш} = 1,5 \gamma_o K_{3o} \lambda_o b_{ош}^2 l_{вшш} = 1,299 \gamma_o K_{3o} \lambda_o D_{вш}^3 \times \\ \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] (49)$$

С использованием (45), (49) преобразуется

$$m_{ошш} = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{мошш}^*, (50)$$

где $\Pi_{мошш}^*$ – относительный показатель массы обмоточного провода ЭМС (рис. 2),

$$\Pi_{мошш}^* = 10,392 K_{3o} \lambda_o \times \\ \times \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times (51) \\ \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781].$$

Масса $m_{ашш}$ и стоимость $C_{ашш}$ активных материалов ЭМС (рис. 2) определяется на основе (46), (47) и (50), (51) уравнениями вида (1):

$$m_{ашш} = m_{мшш} + m_{ошш} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{ашш}^* ;$$

$$C_{ашш} = C_{мшш} + C_{ошш} = \gamma_c C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{сашш}^* ,$$

где $\Pi_{ашш}^*$ и $\Pi_{сашш}^*$ – относительные показатели массы и стоимости, определяющиеся соответствующими (2) выражениями:

$$\Pi_{ашш}^* = 1,5 \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{3c} [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) \times (52) \\ \times f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)] + 6,928 K_{3o} \lambda_o \times \right. \\ \left. \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] \gamma_o / \gamma_c \right\} ;$$

$$\Pi_{сашш}^* = 1,5 \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{3c} [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) \times (53) \\ \times f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)] + 6,928 K_{3o} \lambda_o [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + \right. \\ \left. + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \right\} .$$

Экстремальные значения $\Pi_{ашш}^*$ и $\Pi_{сашш}^*$ функциональных зависимостей (52), (53) при удельных характеристиках, K_{3c} , K_{3o} и соотношении C_o / C_c , аналогичных ЭМС (рис. 1), приведены в табл. 1, 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

В табл. 1, 2 приведены минимальные значения показателей $\Pi_{ашш}^*$, $\Pi_{сашш}^*$ в сравнении с аналогичными значениями показателей массы $\Pi_{мак}^*$, $\Pi_{сак}^*$ и $\Pi_{мап}^*$, $\Pi_{сап}^*$. Показатели $\Pi_{ашш}^*$ и $\Pi_{сашш}^*$ ЭМС (рис. 2) определены при удельных характеристиках, K_{3c} , K_{3o} и соотношении C_o / C_c , аналогичных ЭМС (рис. 1).

Таблица 1

Оптимальные значения показателей массы вариантов электромагнитных систем с анизотропными магнитопроводами

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Показатель массы, о.е.			
	$\Pi_{мап}^*$	$\Pi_{мак}^*$		$\Pi_{ашш}^*$
		$K_{кк}=1$	$K_{кк}=0,904$	
0,3	27,765	25,282	25,802	25,555
0,25	29,319	26,736	27,256	27,006
0,2	31,424	28,704	29,225	28,972

Таблица 2

Оптимальные значения показателей стоимости вариантов электромагнитных систем с анизотропными магнитопроводами

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Показатель стоимости, о.е.			
	$\Pi_{сап}^*$	$\Pi_{сак}^*$		$\Pi_{сашш}^*$
		$K_{кк}=1$	$K_{кк}=0,904$	
0,3	55,501	49,928	51,393	50,745
0,25	57,699	51,993	53,458	52,804
0,2	60,677	54,787	56,253	55,591

Анализ зависимостей (19), (23), (47), (51) и результаты определения минимумов унимодальных функций (24), (25) и (52), (53), а также расчетов зависимостей минимумов (25) и (53) от соотношения C_o / C_c (табл. 3) показывает, что структурное преобразование ЭМС (рис. 1) до вида (рис. 2) сопровождается снижением и повышением массы и стоимости соответственно ЭТС магнитопровода и медного обмоточного провода. При этом достигается некоторое снижение результирующих оптимизированных значений массы и стоимости активной части.

В настоящее время важной составляющей прогресса в разработках трансформаторов продолжает оставаться фактор усовершенствования ЭТС. Наибольший эффект от применения новых анизотропных ЭТС с уменьшенной толщиной проката и повышенной рабочей индукцией, а также ленточных аморфных ЭТС достигается в ЭМС с витой пространственной конструкцией магнитопровода [8].

В табл. 4 приведены соответствующие $K_{кк}=0,904$ минимальные значения показателей $\Pi_{мак}^*$, а также минимальные значения $\Pi_{ашш}^*$, $\Pi_{мап}^*$, которые определены при использовании медного обмоточного провода и аморфной ЭТС с $\gamma_o / \gamma_c = 8,9 / 7,32$ и $K_{3c} = 0,8$ [8].

Таблица 3

Оптимальные значения показателей стоимости электромагнитной системы (рис. 1) с $K_{\text{кк}}=0,904$ и электромагнитной системы (рис. 2) с анизотропными магнитопроводами

Показатель стоимости, о.е.	Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Соотношение стоимостей обмоточной меди и электротехнической стали, о.е.		
		3,5	4,5	5,5
$P_{\text{сакз}}^*$	0,3	51,652	59,19	66,171
	0,25	53,778	61,454	68,551
	0,2	56,658	64,52	71,776
$P_{\text{сакэ}}^*$	0,3	47,847	54,787	61,21
	0,25	49,843	56,914	63,448
	0,2	52,545	59,794	66,479
$P_{\text{сашз}}^*$	0,3	47,256	54,084	60,401
	0,25	49,247	56,204	62,632
	0,2	51,942	59,076	65,653

Таблица 4

Оптимальные значения показателей массы вариантов электромагнитных систем с аморфными магнитопроводами

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Показатель массы, о.е.		
	$P_{\text{мап}}^*$	$P_{\text{мак}}^*$	$P_{\text{маш}}^*$
0,3	29,531	27,437	27,159
0,25	31,103	28,908	28,627
0,2	33,231	30,899	30,615

ВЫВОДЫ

1. Выполненные оптимизационные расчеты показывают, что варианты пространственной аксиальной трехфазной ЭМС с витым стыковым трехсекционным магнитопроводом отличаются от традиционной планарной ЭМС с прямоугольным внешним контуром и прямоугольным сечением стержней улучшенными на 7...8 % и 7,8...8,6 % показателями массы и стоимости.

2. Замена круговых ОК стержней и катушек обмоток на шестигранные ОК на 0,86...0,95 % и 1,14...1,32 % улучшает показатели массы и стоимости аксиальной пространственной ЭМС с медными обмотками и пространственным витым трехсекционным магнитопроводом при использовании для изготовления секций анизотропной ЭТС, а также на 0,92...1 % улучшает показатель массы при использовании аморфной ЭТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В.С. Блинцов, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, А.С. Садовой // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – № 2. – С. 16-21.
2. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
3. Трансформаторы серий ОСМ, ОСВМ, ОСВМС, ОСЗМ, ОСЗМВ, ТСМВ, ТСЗМ и ТСЗМВ (мощностью от 0,063 до 100 кВ·А). Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОБТ. 140. 240. – М.: Информэлектро, Зак. 1265. – 21 с.
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
5. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 6. – С. 33-38.

6. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 79-82.
7. Авдеева Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими стержней и обмоточных окон (массо-стоимостные показатели) // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 4. – С. 15-20.
8. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В.А. Бормосов, М.Н. Костюсова, А.Ф. Петренко, Н.Е. Смольская // Режим доступа: www.trans.-form.ru: 13.09.2004.

Bibliography (transliterated): 1. Blincov V.S., Stavinskij R.A., Avdeeva E.A., Sadovoj A.S. Transformers for specialized engineering objects embedding into limited-diameter shells and their improvement problem formulation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 16-21. 2. Majorec A.I., Pshenichnyj G.I., Chcheljuk Ja.Z. i dr. *Magnitoprovody silovyh transformatorov (tehnologija i oborudovanie)*. Moscow, Jenergija Publ., 1973. 272 p. 3. *Transformatory serij OSM, OSVM, OSVMS, OSZM, OSZMV, TSMV, TSZM i TSZMV (moshhnost'ju ot 0,063 do 100 kV·A)*. *Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluataciji OBТ. 140. 240*. Moscow, Informjelektro Publ. 21 p. 4. Tihomirov P.M. *Raschet transformatorov*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 528 p. 5. Stavinskij A.A. Evolution of structures and premises of improvement of transformers and reactors transformation of circuits of electromagnetic systems (system with laminated and twisted magnetic circuits). *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.6, pp. 33-38. 6. Stavinskij A.A., Plahtry' O.O., Stavinskij R.A. The quality parameters at structural optimization of spatial electromagnetic systems for tree-phase transformers, reactors and throttles. *Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.4, pp. 79-82. 7. Avdeeva E.A. Comparative analysis of planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of cores and coil windows (mass and price indexes). *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.4, pp. 15-20. 8. Bormosov V.A., Kostousova M.N., Petrenko A.F., Smol'skaja N.E. *Perspektivy i sostojanie razrabotok raspredelitel'nyh transformatorov massovyh serij*. Available at: www.trans.-form.ru (accessed 13 September 2004).

Поступила (received) 25.08.2013

Авдеева Елена Андреевна¹,
Ставинский Ростислав Андреевич¹, к.т.н., доц.,
¹ Национальный университет кораблестроения
им. Адмирала Макарова,
кафедра электрооборудования судов и информационной
безопасности,
54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9,
тел/phone +38 0512 399454, e-mail: e.avdeeva@ukr.net

E.A. Avdieieva¹, R.A. Stavinskij¹
¹National University of Shipbuilding after Admiral Makarov
9, Heroes of Stalingrad Avenue, Nikolaev, 54025, Ukraine
**Mass and cost figures for spatial axial three-phase
electromagnetic systems with circular and hexagonal
forming contours of twisted magnetic core rods.**
For a spatial three-phase axial electromagnetic system with double-contour phase elements of the twisted butt-end magnetic core, analytical dependences for optimal geometrical relations determination over minimum active part weight and cost criteria are obtained, advantages of the core elements hexagonal cross-section configuration shown.
Key words – three-phase electromagnetic system, twisted spatial magnetic core, circular and hexagonal forming contours, weight and cost minimum.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Представлені результати комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі по всій довжині активної частини бігуна коаксіально-лінійного двигуна та при різних висотах повітряного зазору між бігуном та магнітопроводом індуктора для двигунів з аксіальним та радіальним напрямком намагнічування постійних магнітів.

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по всей длине активной части бегуна коаксиально-линейного двигателя и при разных высотах воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора для двигателей с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

ВВЕДЕНИЕ

На строительной площадке при возведении фундаментов и специальных технологических сооружений под землей используются погружаемые строительные изделия: сваи, шпунты, трубы и так далее. Погружение этих изделий в грунт чаще всего осуществляется вибропогружателями, мощность которых составляет 11 и более кВт [1].

При применении этих вибраторов для погружения длинномерных строительных изделий (8, 9, 10, 12 ... м) учитываются габаритные размеры этих устройств. Габаритные размеры вибропогружателя чаще всего могут быть ограничены по высоте (длине); это связано с длиной вылета стрелы или копровой мачты с направляющими базовой машины [2].

Мощность вибропогружателя, приводом рабочего органа которого является коаксиально-линейный двигатель с постоянными магнитами (NdFeB) на бегуне (КЛД-ПМ) установки для погружения свай вибростатическим способом [3], разработанном в КНУБА, соответствовала 3,6 кВт (рис. 1).

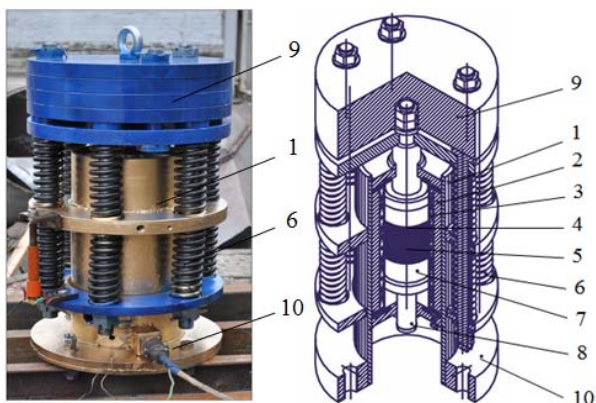


Рис. 1. Общий вид вибратора КЛД-ПМ

Вибратор КЛД-ПМ-А состоит из: статора (индуктора) – 1; магнитопровода статора – 2; обмотки статора – 3; бегуна – 4; постоянных магнитов (NdFeB) – 5; пружин – 6; концентраторов магнитного потока (полюсов) – 7; стержня бегуна – 8; дополнительной массы – 9; основания вибратора – 10. В данном двигателе КЛД-ПМ используются постоянные магниты цилиндрической формы с аксиально направленным намагничиванием (А) [4]. При этом диаметр магнитов составил 110 мм.

Следовательно, с учётом технического задания на ограничение высоты вибропогружателя, для увеличения мощности двигателя КЛД-ПМ необходимо при его построении увеличивать диаметр бегуна с его магнитной системой (полюсами).

В работе [5] предложена конструкция двигателя КЛД-ПМ, где концентраторы магнитного потока выполнены из магнитов с радиально направленным намагничиванием (Р). Такая конструкция магнитной системы бегуна позволяет увеличить диаметр полюсов, а следовательно, и увеличить мощность двигателя при заданных конструктивных параметрах по высоте КЛД-ПМ.

В работе [6] были недостаточно представлены исследования по распределению магнитной индукции по всей длине бегуна КЛД-ПМ для двигателей с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов $B = f(x)$, а также исследования, связанные с зависимостью параметров магнитной индукции от изменения радиальной высоты воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора $B_r = f(\delta)$ при одинаковых конструктивных параметрах полюсов бегуна и масса – габаритных параметров постоянных магнитов. Поэтому данная работа является **актуальной**.

Целью работы являются исследования, связанные с распределением магнитной индукции по всей длине бегуна для двигателей КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов $B = f(x)$, исследования, связанные с зависимостью параметров магнитной индукции от изменения радиальной высоты воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора $B_r = f(\delta)$, а также их сравнение в абсолютных и относительных единицах при одинаковых конструктивных параметрах статора двигателя и при равных масса – габаритных параметрах постоянных магнитов на бегунах (ПМ-А и ПМ-Р).

Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

Конструктивные размеры физической модели бегунов коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами, предложенные в качестве исследуемого объекта, приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

№	Наименование	Размеры
1	Конструктивные размеры полюсов бегуна (Сталь 3), мм	$D = 60; b = 40$
2	Конструктивные размеры постоянных магнитов "А", мм	$D = 50; d = 20; b = 14$
3	Масса постоянных магнитов "А" (3 ед.), кг	$m = 0,51$
4	Общая длина магнитной системы бегуна, мм	$L_0 = 112$
5	Конструктивные размеры постоянных магнитов "Р", мм	$l \times b \times h = 38 \times 10 \times 5$
6	Масса постоянных магнитов "Р" (30 ед.), кг	$m = 0,495$
7	Полюсное деление, мм	$\tau = 56$

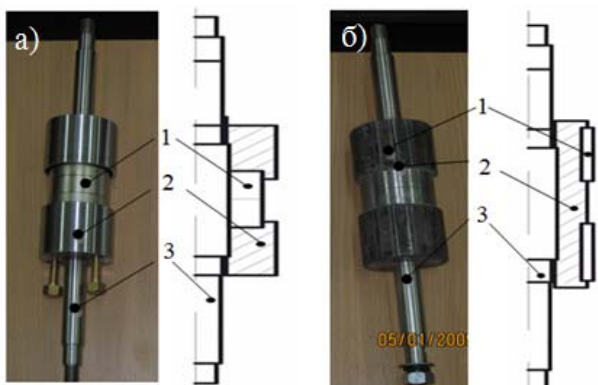


Рис. 2. Бегуны КЛД-ПМ: а – бегун КЛД-ПМ с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – бегун КЛД-ПМ с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Бегуны КЛД-ПМ состоят (см. рис. 2) из: постоянных магнитов (NdFeB) – 1; полюсов – 2; металлического стержня – 3 (сталь сортовая коррозионностойкая, жаростойкая, немагнитная 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75 [7]).

Компьютерное моделирование распределения магнитной индукции КЛД-ПМ-А по всей длине активной части бегуна и при различных радиальных высотах воздушного зазора двигателя.

Для исследования компьютерного моделирования предложена модель КЛД с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете Comsol Multiphysics [8] (рис. 3).

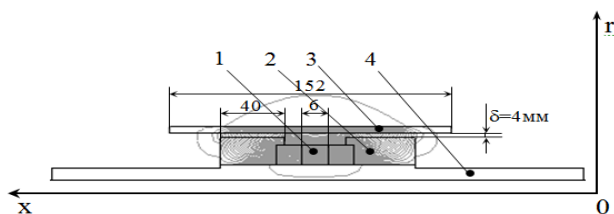


Рис. 3. Модель КЛД-ПМ-А в программе Comsol Multiphysics, где: постоянные магниты (ПМ) – 1; полюс – 2; магнитопровод индуктора (стальная пластина) – 3; бегун – 4

Предложенная модель (рис. 3) КЛД-ПМ-А имеет следующие параметры сред:

- относительная магнитная проницаемость для бегуна центральной части (стержня) – 4: $\mu_r = 1$;
- для постоянных магнитов – 1: $\mu_r = 1,06$;

- остаточная индукция магнитов $B_r = 1,2$ Тл;
- материал магнитопровода индуктора – 3 выбран из библиотеки Steel (сталь).

Численный расчёт магнитного поля выполнялся методом конечных элементов. Задача решалась как осесимметричная в цилиндрической системе координат (xor) с шагом 0,5 мм по оси ox по всей длине активной части бегуна, а по оси or с шагом 0,5 мм в пределах воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора двигателя (см. рис. 3). Результаты расчётов параметров магнитной индукции по всей длине активной части бегуна КЛД-ПМ-А в воздушном зазоре представлены в виде семейства характеристик $B = f(x)$ на рис. 5 (кривая а). Характер распределения параметров магнитной индукции для данного двигателя КЛД-ПМ-А по радиальной высоте зазора представлен в виде кривой характеристики $B_r = f(\delta)$ на рис. 9 (кривая а).

Компьютерное моделирование распределения магнитной индукции КЛД-ПМ-Р по всей длине активной части бегуна и при различных радиальных высотах воздушного зазора двигателя.

Для исследования компьютерного моделирования была разработана модель КЛД с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов в программном пакете Comsol Multiphysics (рис. 4).

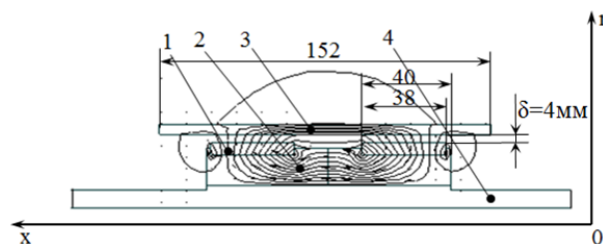


Рис. 4. Модель КЛД-ПМ-Р в программе Comsol Multiphysics, где: постоянные магниты (ПМ) – 1; полюс – 2; магнитопровод индуктора (стальная пластина) – 3; бегун – 4

Предложенная модель (рис. 4) КЛД-ПМ-Р имеет такие же параметры сред, как и в случае для модели КЛД-ПМ-А, кроме направления намагничивания постоянных магнитов (вместо оси x ось r).

Численный расчёт магнитного поля проводился для коаксиально-линейного двигателя КЛД-ПМ с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов при тех же граничных условиях, что и для двигателя КЛД-ПМ-А.

Результаты расчётов параметров магнитной индукции по всей длине активной части бегуна КЛД-ПМ-Р в воздушном зазоре представлены в виде семейства характеристик $B = f(x)$ на рис. 5 (кривая б).

Характер распределения параметров магнитной индукции для данного двигателя КЛД-ПМ-Р по радиальной высоте зазора представлен в виде кривой характеристики $B_r = f(\delta)$ на рис. 9 (кривая б).

Таким образом, максимальное значение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-А (см. рис. 5, кривая а) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,29$ Тл, а при 2,5 мм составляет $B = 0,24$ Тл. Максимальное значение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-Р (см. рис. 5, кривая б) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,49$ Тл, а при 4 мм составляет $B = 0,4$ Тл.

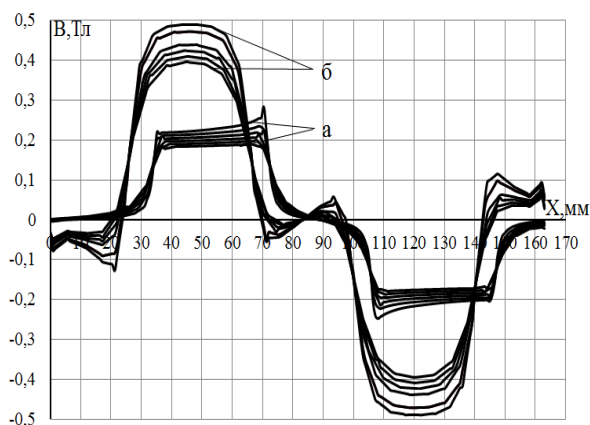


Рис. 5. Семейство характеристик распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного двигателя: а – с аксиальным; б – с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Экспериментальные исследования распределения магнитной индукции в зазоре КЛД-ПМ.

На рис. 6. изображен стенд для проведения экспериментального исследования коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов.

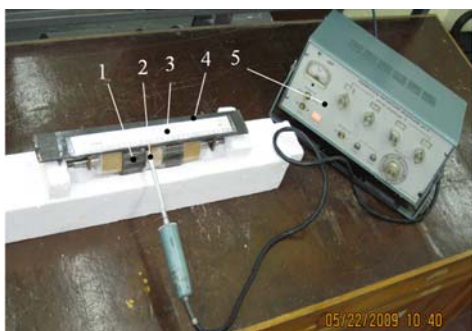


Рис. 6. Стенд для исследования магнитной индукции в зазоре КЛД-ПМ

Стенд включает: бегун КЛД-ПМ – 1; датчик для измерения магнитной индукции (щуп) – 2; линейку для фиксации опытов при измерении магнитной индукции – 3; стальную пластину (Сталь 3) "имитатор магнитопровода индуктора КЛД-ПМ" – 4; прибор для измерения магнитной индукции Ш1 – 5.

При экспериментальном исследовании распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по всей длине активной части бегуна коаксиально-линейного двигателя и при разных радиальных высотах воздушного зазора между бегуном и магнитопроводом индуктора для двигателей с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов были определены условия проведения опытов, а именно: перемещение датчика для измерения значений магнитной индукции осуществлялось в воздушном зазоре двигателя строго по продольной оси магнитопровода статора (стальной пластины) по всей длине активной части бегуна с шагом 2,5 мм, а также при выбранных радиальных высотах зазора 0,5; 1,5 и 2,5 мм.

Результаты экспериментальных данных магнитной индукции по всей длине активной части бегуна двигателя КЛД-ПМ в воздушном зазоре представлены в виде семейства характеристик $B = f(x)$ на рис. 7.

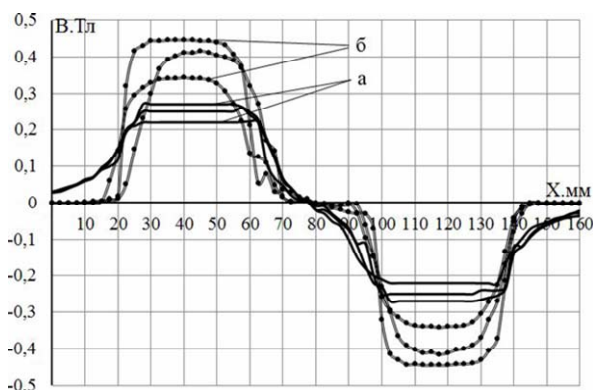


Рис. 7. Семейство характеристик распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре коаксиально-линейного двигателя: а – распределение магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре двигателя с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – распределение магнитной индукции $B = f(x)$ в воздушном зазоре с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Таким образом, максимальное значение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-А (см. рис. 7, кривая а) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,26$ Тл, а в случае 2,5 мм составляет $B = 0,23$ Тл. Максимальное значение магнитной индукции двигателя КЛД-ПМ-Р (см. рис. 7, кривая б) при радиальной высоте зазора 0,5 мм составляет $B = 0,45$ Тл, а в случае 4 мм составляет $B = 0,34$ Тл.

Расхождение максимального значения магнитной индукции в зазоре между результатом, полученным в ходе компьютерного моделирования и экспериментального исследования КЛД-ПМ, в среднем составляет: для двигателя КЛД-ПМ-А – 10,51 %, а для двигателя КЛД-ПМ-Р – 7,11 %.

Для сравнения значений параметров магнитной индукции при экспериментальном исследовании двигателей КЛД-ПМ были выбраны кривые распределения магнитной индукции $B = f(x)$ (рис. 8) в воздушном зазоре коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов при максимальном значении индукции (то есть выбраны кривые $B = f(x)$, полученные при радиальной высоте зазора $\delta = 0,5$ мм).

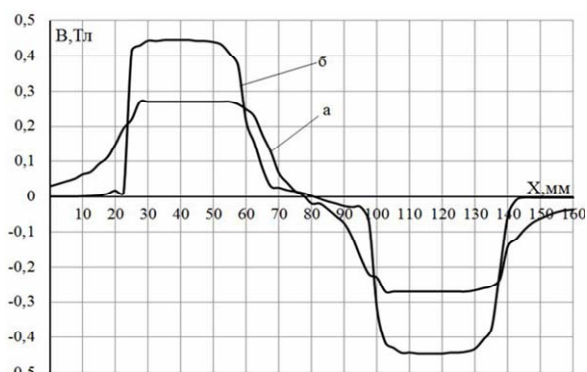


Рис. 8. Характеристики распределения магнитной индукции $B = f(x)$ в зазоре двигателя КЛД-ПМ: а – кривая распределения магнитной индукции $B = f(x)$ с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Расхождение максимального значения индукции в зазоре между результатами, полученными при экспериментальном исследовании двигателей КЛД-ПМ-А и КЛД-ПМ-Р (см. рис. 8), составляет 28 %.

На рис. 9 представлены характеристики кривых $B_r = f(\delta)$ распределения параметров магнитной индукции для данных двигателей КЛД-ПМ с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов от величины воздушного зазора.

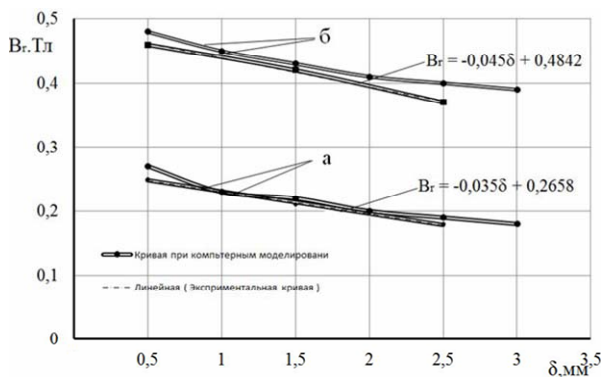


Рис. 9. Характеристики распределения магнитной индукции $B_r = f(\delta)$ по радиальной высоте зазора двигателя КЛД-ПМ, где а – кривые распределения магнитной индукции с аксиальным направлением намагничивания постоянных магнитов; б – с радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов

Из графиков $B_r = f(\delta)$ (см. рис. 9) видно, что изменение индукции B_r по мере увеличения радиального зазора δ прямо пропорционально уменьшается: для двигателя КЛД-ПМ-А кривые $B_r = f(\delta)$ близки выражению $B_r = -0,035\delta + 0,2658$, а для КЛД-ПМ-Р близки выражению $B_r = -0,045\delta + 0,4842$, т.е. характер кривых $B_r = f(\delta)$, полученных в результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования для данных двигателей, соответствует прямым линиям.

ВЫВОДЫ

В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по всей длине активной части бегуна и при разных радиальных высотах воздушного зазора коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов можно сделать следующие выводы.

Расхождение параметров магнитной индукции, полученных в ходе компьютерного моделирования и экспериментального исследования, составило 10,51 % для двигателя КЛД-ПМ-А, а для двигателя КЛД-ПМ-Р 7,11 %, что удовлетворяет требованиям при проектировании данного типа машин.

Изменение магнитной индукции по высоте немагнитного зазора КЛД-ПМ-А меньше, чем у КЛД-ПМ-Р, таким образом, для инженерных метода расчета коаксиально-линейных двигателей с постоянными магнитами необходимо учитывать изменение индукции по высоте, в частности, для двигателя КЛД-ПМ-Р.

Сравнивая результаты исследований по распределению магнитной индукции в зазоре двигателей КЛД-ПМ с радиальным ПМ-Р и аксиальным ПМ-А, можно сделать вывод, что более эффективным при одной и той же массе магнитов является применение магнитов с радиальным направлением намагничивания (превышение магнитной индукции для двигателя КЛД-ПМ-Р над двигателем КЛД-ПМ-А составляет 28 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смородинова М.И., Егоров А.И., Губанова Е.М. и др. Свайные работы. Справочник строителя / Под ред. М.И. Смородинова, 2-е изд., перераб. и доп. / М.: Стройиздат, 1988. – 223 с.

2. Мартынов В.Д. и др. Строительные машины и монтажное оборудование: Учебник для студентов вузов по специальности "Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование" / В.Д. Мартынов, Н.И. Аleshin, Б.П. Морозов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
3. Патент на корисну модель № 57744. Пристрій для занурювання будівельних елементів, МПК, ЕО2D 7/20(2006.01), Богаєнко М.В., Голєнков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., Сидра А.М., Срібний В.О., 10.30.2011, Бюл. № 5.
4. Патент на корисну модель № 51149. Рухомий елемент електродвигуна зворотньо-поступального, МПК(2009), Н02К 41/025, Барабаш В.А., Богаєнко М.В., Голєнков Г.М., Пархоменко Д.И., Попков В.С., 12.07.2010, Бюл. № 13.
5. Патент на винахід № 93168. Лінійний електродвигун зворотньо-поступального руху, МПК(2011.01), Н02К 33/00, Н02К 41/025, Барабаш В.А., Богаєнко М.В., Голєнков Г.М., Голуб В.П., Попков В.С., 10.01.2011, Бюл. № 1.
6. Голєнков Г.М., Аббасян М.А. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре коаксиально-линейного синхронного двигателя с аксиальным и радиальным направлением намагничивания постоянных магнитов на бегуне // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 1. – С. 16-21.
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. Т.1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 728 с.
8. Электронный ресурс: www.comsol.com.

Bibliography (transliterated): 1. Smorodina M.I., Egorov A.I., Gubanova E.M. i dr. *Svajnye raboty. Spravochnik stroitelja*. Moscow, Strojizdat Publ., 1988. 223 p. 2. Martynov V.D., Aleshin N.I., Morozov B.P. *Stroitel'nye mashiny i montazhnoe oborudovanie: Uchebnik dlja studentov vuzov po special'nosti "Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie"*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p. 3. Bohaienko M.V., Golenkov G.M., Holub V.P., Popkov V.S., Sydra A.M., Sribnyi V.O. *Prystrii dlia zanuriuvannia budivelnlykh elementiv*. Patent UA, no. 57744, 2011. 4. Barabash V.A., Bohaienko M.V., Golenkov G.M., Parkhomenko D.Y., Popkov V.S. *Rukhomyi element elektrodvyhuna zvorotno-postupalnogo*. Patent UA, no. 51149, 2010. 5. Barabash V.A., Bohaienko M.V., Golenkov G.M., Holub V.P., Popkov V.S. *Liniinyi elektrodvyhyn zvorotno-postupalnogo rukhu*. Patent UA, no. 93168, 2011. 6. Golenkov G.M., Abbasian M.A. *Airgap magnetic induction distribution in a coaxially-linear synchronous motor with axial and radial direction of the runner permanent magnets magnetization. Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 16-21. 7. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja: V 3-h tomah. T.1. 5-e izd., pererab. i dop.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 728 p. 8. Available at: www.comsol.com (accessed 23 June 2013).

Поступила (received) 23.10.2013

Голєнков Геннадий Михайлович¹, к.т.н., доц.,
Аббасян Мохсен Алиакбарович¹, аспирант

¹ Киевский национальный университет строительства и архитектуры, 03680, Киев, Воздухофлотский проспект, 31, тел/phone +38 044 2415565, e-mail: bohdant@gmail.com, mohsen12849@yahoo.com

G.M. Golenkov¹, M.A. Abbasian¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-037, 03680 Ukraine

Simulation of magnetic induction distribution in a coaxial linear motor with axial and radial direction of permanent magnets magnetization.

The paper presents results of computer simulation and experimental study of magnetic induction distribution in a coaxial linear motor air gap throughout the length of the runner active part at different heights of the air gap between the runner and the inductor magnetic core for motors with axial and radial direction of the permanent magnets magnetization.

Key words – magnetic induction, coaxial linear motor, permanent magnets, simulation.

СИНТЕЗ ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ МНОГОФАЗНЫХ ОБМОТОК И ИХ ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Показано, що багатофазні обмотки можуть утворювати гомології трьох видів. Розроблено алгоритм формування гомологій двополюсних обмоток. Доведено, що змінення електромагнітних властивостей обмоток, що утворюють гомологічний ряд, однозначно відповідає закону перетворення структури обмоток даного ряду. На основі використання вказаної відповідності розроблена підсистема автоматизованого синтезу трифазних обмоток з подальшим гармонічним аналізом.

Показано, что многофазные обмотки могут образовывать гомологии трех видов. Разработан алгоритм формирования гомологий двухполюсных обмоток. Доказано, что изменение электромагнитных свойств обмоток, образующих гомологический ряд, однозначно соответствует закону преобразования структуры обмоток данного ряда. На основе использования указанного соответствия разработана подсистема автоматизированного синтеза трехфазных обмоток и выполнения гармонического анализа.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Понятие гомологии широко используется в различных науках: в биологии и ботанике, в физике и химии, в математике, в кристаллографии и т.д. Использование гомологии играет важнейшую роль в систематизации и классификации множеств изучаемых объектов, позволяя свести рассмотрение огромного их числа к рассмотрению гомологических рядов (ГР).

В 1920 году Н. И. Вавиловым был открыт закон гомологических рядов (ЗГР), согласно которому изменчивость близких по происхождению родов и видов растений осуществляется общим (параллельным) путем [1]. Генетически близкие роды и виды характеризуются сходными рядами наследственной изменчивости с такой правильностью, что, зная ряд форм в пределах одного вида, можно предвидеть нахождение параллельных форм у других родственных видов и родов. ЗГР позволяет на основании знания общих закономерностей изменчивости предсказать существование в природе не известных ранее форм с ценными для селекции признаками.

Аналогичный генетико-биологический подход широко используется проф. В.Ф. Шинкаренко [2] и его последователями для синтеза новых видов электромеханических преобразователей. Использование ЗГР характеризуется тем, что процессы синтеза и оценки его результатов основаны на качественных характеристиках, что не всегда оказывается достаточным применительно к техническим наукам.

В противоположность этому, в химии гомология представляется одной из разновидностей структурного синтеза объектов и особенно привлекательным является тот факт, что определенным образом упорядоченное изменение исходной структуры приводит к закономерному изменению свойств синтезированных объектов.

Так [3], физические свойства в ГР органических соединений изменяются таким образом, что в большинстве случаев удельные веса и объемы, температуры кипения и плавления, теплоты горения и образования, эквиваленты лучепреломления и т.д. изменяются постепенно от члена к члену, по мере увеличения разницы в составе, определяемой числом n групп CH_2 , называемой *гомологической разницей*.

Но в некоторых случаях указанные закономерности нарушаются:

- с увеличением числа атомов углерода бензольных углеводородов, предельных одноосновных кислот и др. наблюдается уменьшение удельных весов;
- для удельного веса предельных одноатомных спиртов или для температуры плавления нормальных предельных одноосновных кислот эти свойства изменяются так, что для первых членов ряда величина его падает, а затем вновь возрастает.

Можно предположить, что причина подобных отклонений кроется в неадекватности структурных моделей этих сложных объектов, их сущности, а при устранении этого недостатка закономерности приобретут необходимую строгость.

В определенной мере это подтверждается на примере гомологий некоторых типов многофазных обмоток [4-6] вращающихся электрических машин, формируемых на основе обобщенной структурной модели [7]. Адекватность указанной модели физической сущности обмоток позволило получить строгие закономерности изменения электромагнитных свойств указанных обмоток в зависимости от алгоритма формирования соответствующих гомологических рядов.

Это позволяет предположить, что использование гомологического подхода при исследовании свойств многофазных обмоток может быть эффективно использовано для решения таких важных задач, как совершенствование методики синтеза и анализа их свойств.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Понятие гомологии, впервые введенное в биологии как сходство основных структур и органов, в дальнейшем и при его использовании в других науках менялось и приобретало свою специфическую трактовку. При этом оно не являлось застывшей догмой, а изменялось в соответствие с развитием науки.

Применительно к нашей тематике условимся называть *гомологическим рядом* множество m -фазных обмоток, изменение свойств которых однозначно соответствует закономерному изменению их структуры.

Задачами настоящей статьи является идентификация уже существующих гомологий многофазных

обмоток электрических машин класса ЦЛ 0,2у [2], а также разработка алгоритмов синтеза и анализа новых гомологических рядов этих объектов.

Для решения указанных задач будем опираться на сформулированное выше определение ГР с использованием обобщенной структурной модели (ОСМ) многофазных обмоток [7].

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покажем сначала, что каждое из подмножеств множества M_{mkz} m -фазных основных [4] обмоток с целыми числами q пазов на полюс и фазу образует гомологический ряд.

В традиционном изложении анализ изменения свойств обмоток M_{1mkz} сводится к исследованию характера приращения активных катушечных сторон (АКС) в одной из катушечных групп обмотки. При этом необходимость выполнения аналогичных изменений в остальных группах отходит на второй план.

Но именно это обстоятельство и является главным: преобразование структуры обмотки выполняется приращением не единичных АКС в отдельных катушечных группах, а комплектами определенным образом связанных между собой АКС.

Например, в трехфазных ($m=3$) шестизонных ($k_z=2$) основных обмотках M_{32} такой комплект образуют шесть АКС, смещенных в пространстве на $\pi/3$ и питаемых токами с относительным фазовым сдвигом $\pi/3$. В ОСМ [7] ему соответствует *структурная единица* обмотки – один из ее модулей (блоков), а именно $b_5 = |012345|$. В рамках множества M_{32} данный модуль исполняет роль *гомологической разницы*.

Процесс формирования ГР M_{32} наглядно представляется с использованием матричной модели (рис. 1).

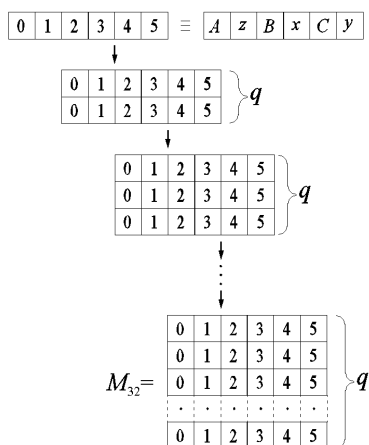


Рис. 1. Процесс формирования гомологического ряда M_{32}

Если использовать символическое отображение модуля b_5 , то процесс формирования ГР можно представить в следующем виде

$$M_{32} = b_5 \rightarrow b_5 \cup b_5 \rightarrow b_5 \cup b_5 \cup b_5 \rightarrow \dots,$$

где \cup – операция (сборки модулей [7], равносильная в данном случае последовательному присоединению гомологической разницы b_5).

Аналогичным образом – применением одной и той же операции – сборки идентичных блоков могут быть сформированы ГР любых других разновидностей многофазных обмоток с целым q .

Например, ГР трехфазных трехзонных ($k_z=1$) M_{31} и двухфазных M_{22} ($k_z=2$) обмоток образуются сборкой соответствующих модулей $b_3 = |002244| = |AABBCC|$ и $b_1 = |0123| = |ABxy|$. Указанные процессы можно отобразить в символической форме:

$$M_{31} = b_3 \rightarrow b_3 \cup b_3 \rightarrow b_3 \cup b_3 \cup b_3 \rightarrow \dots,$$

$$M_{22} = b_1 \rightarrow b_1 \cup b_1 \rightarrow b_1 \cup b_1 \cup b_1 \rightarrow \dots,$$

или в виде матричных моделей:

$$M_{31} = \begin{matrix} 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \end{matrix} \Bigg\} q; \quad M_{22} = \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \Bigg\} q.$$

Идентичный алгоритм преобразований в каждом из рассмотренных ГР вызывает сходный характер закономерностей изменения электромагнитных свойств обмоток. По мере возрастания числа q значения коэффициентов распределения k_{Dv} для гармоник произвольного порядка v монотонно уменьшаются.

Типичный пример такой зависимости для обмоток M_{132} приведен на номограмме (рис. 2).

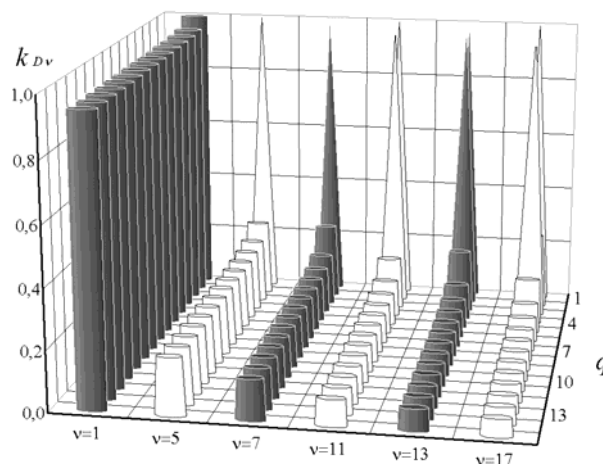


Рис. 2. Зависимость $k_{Dv} = f(q)$ обмоток M_{32}

Это позволяет получить *общее аналитическое выражение* расчета коэффициентов k_{Dv} , справедливое для любых обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу объединенного множества M_{mkz} ,

$$k_{Dv} = \frac{k_z \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z}\right)}{2q \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z q}\right)}$$

Условимся множества *основных двухполюсных обмоток*, образующих гомологические ряды, называть далее *гомологиями первого рода*.

ГР первого рода могут быть получены при использовании более сложных закономерностей построения их структуры. Кроме сборки идентичных модулей возможно использование групп модулей различных типов и в сочетании с применением циклических перестановок. В зависимости от характера требований к проектируемым обмоткам синтез таких ГР следует выполнять с учетом уровня симметрии используемых модулей [8], т.к. это определяет электро-

магнитные свойства как самих модулей, так и образованных ими обмоток.

Если задание на проектирование предусматривает получение симметричных обмоток с высоким уровнем потяосцепления по рабочим гармоникам, то следует ограничиться использованием модулей высших групп симметрии. Применительно к двух- и трехфазным обмоткам этому требованию отвечают инвариантные пространственные блоки $b_{02} = | \text{---} |$ и $b_{03} = | \text{---} |$ с группами симметрии G_8 и G_{12} соответственно, а также модули b_1 и b_5 , характеризующиеся группами цветной симметрии $G_4^{(+1)}$ и $G_6^{(+1)}$ соответственно.

В качестве примера рассмотрим синтез семейств ГР, образующихся присоединением гомологической разницы в виде основных модулей b_5 и b_1 к сборкам инвариантных пространственных блоков произвольного размера n . В символьном отображении процесс формирования каждого из ГР представляется в виде:

$$M_{10m2} = b_{0m} \rightarrow b_{0m} \cup b_{5(1)m} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots,$$

$$M_{20m2} = b_{0m1} \cup b_{0m2} \cup b_{5(1)} \rightarrow b_{0m} \cup b_{0m} \cup b_{5(1)} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots$$

$$M_{n0m2} = b_{0m1} b_{0m2} \dots \cup b_{0mn} \rightarrow b_{0m} \cup b_{0m} \cup \dots \cup b_{0mn} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots$$

Рассмотренные совокупности ГР применительно к трехфазным и двухфазным обмоткам адекватно отображаются соответствующими матричными моделями M_{032} и M_{022} .

$$M_{032} = \begin{pmatrix} - & - & - & - & - & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ - & - & - & - & - & - \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix} q; M_{022} = \begin{pmatrix} - & - & - & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ - & - & - & - \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Нетрудно убедиться, что при использовании неидентичных модулей первоначально можно сформировать базовую группу с произвольным фиксированным числом модулей одного из типов. Тогда сборка произвольной матрицы, отображающей ГР, будет заключаться в присоединении блока другого типа, который играет роль гомологической разницы. Любое изменение числа модулей в базовой группе послужит формированию нового ГР. К тому же эффекту приведет замена типа блоков в базовой группе.

Таким образом, структурные модели фактически отображают не единственную ГР, а спектр таких гомологий. Но это не препятствует получению в рамках ОСМ обобщенного описания физических свойств соответствующих им обмоток формулой:

$$k_{Dv} = \frac{\sin \left[\frac{\pi v (Q - n)}{2mQ} \right]}{(Q - n) \sin \left(\frac{\pi v}{2mQ} \right)} = \frac{\sin \left[\frac{\pi v (1 - n^*)}{2m} \right]}{Q (1 - n^*) \sin \left(\frac{\pi v}{2mQ} \right)},$$

где $n^* = n/Q$.

В графической форме типичный характер изменения электромагнитных свойств обмоток M_{032} иллюстрирует гистограмма на рис. 3.

Еще одним примером формирования семейства гомологий первого рода может служить использование однотипных модулей, часть из которых преобразована циклическими перестановками c . Синтез каждого из таких ГР, образующих множество M_{32c} , может быть представлен в символической форме:

$$M_{132c} = b_5 c^1 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$M_{232c} = b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$M_{n32c} = b_5 c^1 \cup \dots \cup b_5 c^1 \cup b_5 c^{-1} \cup \dots \cup b_5 c^{-1} \rightarrow$$

$$\rightarrow b_5 c^1 \cup \dots \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup \dots \cup b_5 c^{-1} \rightarrow$$

$$\rightarrow b_5 c^1 \cup \dots \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup \dots \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots,$$

а их полная совокупность – в виде матричной модели:

$$M_{32c} = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 5 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 0 \end{pmatrix}$$

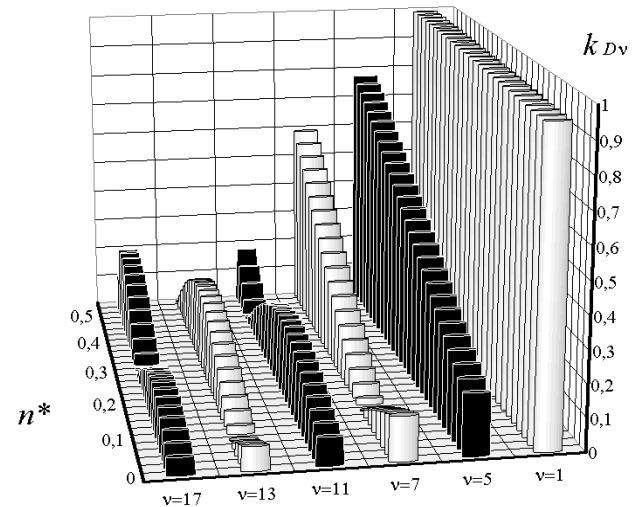


Рис. 3. Изменение коэффициентов k_{Dv} обмоток множества M_{032}

Аналогично может быть построена структурная модель и для множества M_{22c} двухфазных обмоток.

Формула расчета коэффициентов распределения k_{Dv} для объединенного множества M_{m2c} , включающего в себя подмножества M_{22c} и M_{22c} , имеет вид:

$$k_{Dv} = \frac{\sin \left[\frac{\pi v (1 - 2n^*)}{2m} \right] + 2 \sin \left[\frac{\pi v n^*}{2m} \right] \cdot \cos \left[\frac{\pi v (1 - n^* - 2c)}{2m} \right]}{Q \sin \left(\frac{\pi v}{2mQ} \right)}.$$

Таким образом, алгоритм формирования ГР первого рода предусматривает последовательное присоединение к исходной группе модулей гомологической разницы. Полные совокупности таких гомологий могут быть отображены в виде обобщенных матричных

моделей, с помощью которых можно аналитически определить физические свойства всех соответствующих им двухполюсных обмоток, выполняемых в отличающихся числах пазов.

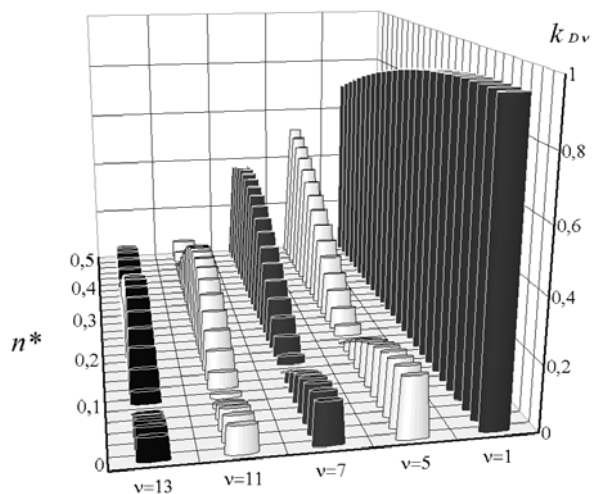


Рис. 4. Изменение коэффициентов k_{Dv} обмоток множества M_{32c} ($c=\pm 1$)

Состав полного множества основных многофазных обмоток, конечно же, не ограничивается только двухполюсными вариантами.

Широко известны многополюсные обмотки [9], выполняемые p -кратным повторением основных двухполюсных обмоток-оснований. Множества таких обмоток также образуют гомологические ряды. Характерным свойством обмоток, составляющих эти ряды является равенство коэффициентов распределения k_{Dv0} обмотки-основания и $k_{Dv\Gamma}$ производной обмотки при выполнении условия

$$k_{Dv\Gamma} = k_{Dv0}, \text{ если } v_{\Gamma} = pv_0.$$

Назовем множества многополюсных обмоток, образованных многократным повторением двухполюсных обмоток-оснований *гомологиями второго рода* или *гомологиями повторений*.

Кроме того, установлено [4], что дробные многополюсные классические обмотки, выполняемые в одном и том же числе пазов, образуют гомологические ряды, базирующиеся на двухполюсных обмотках-основаниях множества M_{1mkz} . Установлены также закономерности построения подобных гомологических рядов на основе преобразования структур производных основных двухполюсных обмоток [5, 6].

Как и в предыдущем случае, общим свойством обмоток этого типа является сохранение набора коэффициентов распределения k_{Dv} в обмотках всего ряда. Но здесь каждому из значений $k_{Dv\Gamma}$ производных обмоток по гармонике v_{Γ} соответствует равное значение k_{Dv0} с порядками гармоник v_0 обмотки-основания в зависимости от рабочего числа полюсов p уже при таких условиях:

$$k_{D0} = k_{D\Gamma},$$

если

$$v_0 \cdot p = 2k_z m Q n_3 + v_{\Gamma}, \quad v_0 = \frac{2k_z m Q n_3 + v_{\Gamma}}{p},$$

где n_3 – наименьшее натуральное число, при котором для $2m$ -зонных обмоток v_0 – целое нечетное число, а в

случае m -зонных обмоток v_0 – любое целое число.

Условимся ряды многополюсных обмоток, сформированные на базе преобразований структур двухполюсных обмоток в многополюсные называть *гомологиями третьего рода* или *дробными гомологиями*.

Синтез таких рядов выполняется преобразованием структур матриц неизменного размера. Перестройка структуры исходной матрицы двухполюсной обмотки-основания осуществляется путем изменения взаимного расположения модулей с возможными заменами каждого или части из них и изменениями числа циклических перестановок.

Алгоритм указанного преобразования детально разработан в [5, 6], но при его непосредственной практической реализации оказывается достаточно трудоемким.

Для устранения указанного недостатка в среде Delphi разработана подсистема, позволяющая в интерактивном режиме сначала выбрать из набора гомологий первого рода M_{32} , M_{032} , M_{32c} необходимую обобщенную модель, а затем выделить в автоматически синтезированном гомологическом ряду третьего рода нужные варианты многополюсных обмоток. На заключительном этапе подсистема обеспечивает выполнение интерактивного контроля уровня добавочных гармоник, для чего на рабочую панель выводятся соответствующие векторные диаграммы и величины обмоточных коэффициентов. Результаты детального гармонического анализа рассмотренных вариантов обмоток сохраняются в файлах.

Работу подсистемы поясним на примере синтеза трехфазной обмотки с числом полюсов $2p=14$, выполняемой в 48 пазах при условии, что коэффициент распределения по рабочей гармонике $k_{D7} > 0,92$.

Этапы одного из вариантов выполнения задания иллюстрируются соответствующими фрагментами панелей, приведенными на рис. 5.

В соответствующие окна верхней части рабочей панели (рис. 5,а) оператор вводит необходимое число пазов на фазную зону $Q=Z/k_z m=48/6=8$ и число пар полюсов $p=7$. Заданное ограничение может быть обеспечено с использованием обмоток множества M_{32c} , поэтому следует нажать одноименную кнопку " M_{32c} ".

В результате активизируются кнопки "с" и "n" для ввода соответствующих структурных параметров обобщенной модели M_{32c} . При необходимости просмотра модели M_{32c} нажимается кнопка "показать модель и формулу". В результате открывается окно, позволяющее выделить из спектра гомологий необходимый ГР с параметрами $c=1$ и $n=1$, введя его в окошко с указанной маркировкой (рис. 5,б).

После нажатия кнопки "считать" в верхней части рабочей панели (рис. 5,б) открывается окно с цифровыми (ЦМ) и матричными моделями (ММ) двухполюсной обмотки-основания и искомой обмотки с $p=7$ (рис. 5,в). В цифровых моделях цифры левого столбца соответствуют типу модуля, а цифры правого столбца – числу циклических перестановок. Одновременно ниже формируются два окна, обеспечивающие интерактивный контроль гармонического спектра как обмотки-основания (в левой части панели), так и исследуемой обмотки. Контроль выполняется путем просмотра векторных диаграмм и значений коэффициентов распре-

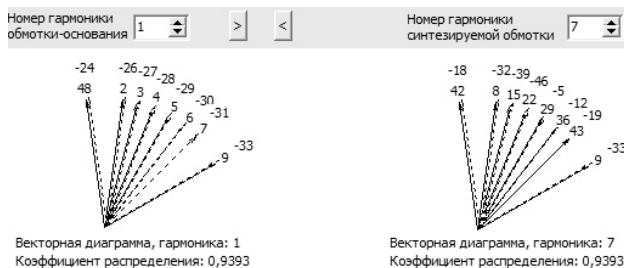
деления в масштабе любых гармоник (рис. 5,з) вводом номеров гармоник в соответствующих окнах.

а

б

j	c	Обмотка-основание	j	c	Синтезируемая обмотка
5	1	5 0 1 2 3 4	5	1	5 0 1 2 3 4
5	0	0 1 2 3 4 5	5	5	1 2 3 4 5 0
5	0	0 1 2 3 4 5	5	5	1 2 3 4 5 0
5	0	0 1 2 3 4 5	5	4	2 3 4 5 0 1
5	0	0 1 2 3 4 5	5	3	3 4 5 0 1 2
5	0	0 1 2 3 4 5	5	2	4 5 0 1 2 3
5	0	0 1 2 3 4 5	5	1	5 0 1 2 3 4
5	5	1 2 3 4 5 0	5	0	0 1 2 3 4 5

в



г

Гармоник: 24 Шаг обмотки: 3 Сохранить Модель 1а 2я обе

Коэффициент дифференциального рассеяния $Td=0,020133$ $Td=0,103926$ учитывать 3-и гармоники

№	Kdir	Ky	Kw	Hv	Kdir	Ky	Kw	Hv
1	0,9393	0,1951	0,1832	1	0,0307	0,1951	0,006	0,04557
2	0	0,3827	0	0	0	0,3827	0	0
3	0,5432	0,5556	0,3018	0,54896	0,3629	0,5556	0,2016	0,51073
4	0	0,7071	0	0	0	0,7071	0	0
5	0,1141	0,8315	0,0949	0,10353	0,1048	0,8315	0,0872	0,13247
6	0	0,9239	0	0	0	0,9239	0	0
7	0,0307	0,9808	0,0301	0,0235	0,9393	0,9808	0,9212	1
8	0	1	0	0	0	1	0	0
9	0,0528	0,9808	0,0518	0,0314	0,2654	0,9808	0,2603	0,21977
10	0	0,9239	0	0	0	0,9239	0	0
11	0,07	0,8315	0,0582	0,02889	0,1707	0,8315	0,142	0,09806
12	0	0,7071	0	0	0	0,7071	0	0
13	0,1048	0,5556	0,0582	0,02445	0,1141	0,5556	0,0634	0,03705
14	0	0,3827	0	0	0	0,3827	0	0
15	0,2654	0,1951	0,0518	0,01884	0,0528	0,1951	0,0103	0,00522
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0,1545	0,1951	0,0301	0,00968	0,1868	0,1951	0,0364	0,01629

д

Рис. 5. Окна подсистемы синтеза и анализа трехфазных обмоток

После нажатия кнопки "гармонический анализ" открывается панель (рис. 5,д), позволяющая просмотреть результаты гармонического анализа, как обмотки основания, так и многополюсной обмотки. Эти результаты включают в себя значения обмоточных коэффициентов k_{wv} , коэффициентов распределения k_{Dv} и укорочения k_{Yv} , а также относительных амплитуд гармоник H_v в диапазоне порядков v , который задается в левом верхнем окне панели. Кроме того, при необходимости вводится значение шага исследуемой обмотки по пазам и в диапазоне $1 < v < 6Z$ рассчитывается коэффициент дифференциального рассеяния τ_d

$$\tau_d = \sum_{v=1}^{5Z} H_v^2 - 1 = \sum_{v=1}^{Z/2} A_v - 1,$$

где

$$A_v = \frac{p^2 \cdot k_{wv}^2}{k_{wp}^2} \left[\frac{1}{v^2} + \frac{1}{(Z+v)^2} + \frac{1}{(Z-v)^2} + \dots \right]$$

После нажатия кнопки "Сохранить" результаты расчетов сохраняются в отдельном файле.

При использовании модели M_{32} допускается возможность произвольной замены любого из модулей матрицы обмотки-основания и изменения числа циклических перестановок. Для этого в цифровой модели обмотки основания достаточно выделить нужную ячейку курсором и ввести необходимые значения типа модуля j или числа c циклических перестановок в соответствующих окнах ЦМ. Соответствующие изменения в ММ обмотки-основания и построения ЦМ и ММ исследуемой обмотки с заданным числом полюсов $2p$ выполняются автоматически. Выполнение детального гармонического анализа, просмотр и запись полученных результатов выполняется так же, как и в предыдущих случаях.

Подсистема выполнена открытой и предполагает возможность ее дополнения новыми моделями обобщенных спектров гомологических рядов первого рода.

ВЫВОДЫ

1. Предложенное определение понятия гомологии в сочетании с представлением многофазных обмоток в виде обобщенной структурной модели позволило показать, что бесконечное разнообразие структур таких обмоток не хаотично, но закономерно упорядочено тремя типами гомологических связей.

2. Использование гомологического представления обмоток позволяет существенно сократить объем исследований их свойств, ограничив его изучением свойств их двухполюсных модификаций, охватываемых гомологиями первого рода.

3. Однозначное соответствие алгоритмов преобразования структур обмоток, составляющих ГР, с характером изменения физических свойств этих обмоток, отображаемое аналитически, позволяет резко упростить процессы направленного синтеза обмоток и выполнения их гармонического анализа.

4. Разработанная подсистема автоматизированного синтеза и анализа трехфазных обмоток может быть эффективно использована при выполнении про-

ектирования электрических машин и при подготовке специалистов-электромехаников.

5. Кроме того, предложенный подход может послужить основой для выполнения научно обоснованной систематизации многофазных обмоток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. – Л.: Наука, 1987. – 256 с.
2. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
3. Робертс Дж., Касерио М. Основы органической химии. – Том 1. – М.: Мир, 1978. – 842 с.
4. Дегтев В.Г. Гармонический анализ дробных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 2. – С. 29-33.
5. Дегтев В.Г. Смирнов С.Б., Бабушанов А.В. Гомологические ряды симметричных двухфазных обмоток // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – № 67. – С. 98-104.
6. Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Лаврук И.С., Самойлов Г.А. Синтез гомологических рядов трехфазных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 1. – С. 17-21.
7. Дегтев В.Г. Обобщенная структурная модель многофазных обмоток // Электричество. – 1990. – № 11. – С. 40-45.
8. Дегтев В. Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 1. – С. 23-27.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – СПб: Питер, 2008. – 350 с.

Поступила (received) 23.10.2013

Bibliography (transliterated) 1. Vavilov N.I. *The law of homologous series in hereditary variation*. Leningrad, Nauka Publ., 1987. 256 p. 2. Shynkarenko V.F. *The basics of evolution theory of electromechanical system*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2002. 288 p.

3. Roberys J.D., Caserio M.C. *Basic principles organic chemistry. Vol 1*. Moscow, Mir Publ., 1978. 842 p. 4. Degtev V.G. Fractional windings harmonic analysis. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.2, pp. 29-33. 5. Degtev V.G., Smirnov S.B., Babushanov A.B. Homology series of symmetrical two-phase windings. *Electromachinobuduvannya ta elektroobladnannya*, 2006, no.67, pp. 98-104. 6. Degtev V.G., Babushanov A.B., Lavruk I.S., Samojlov G.A. Synthesis of homology series of three-phase windings. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.1, pp. 17-21. 7. Degtev V.G. The generalized structural model of multiphase windings. *Electrichestvo*, 1990, no.11, pp. 40-45. 8. Degtev V.G. Multiphase windings symmetry and properties. *Electrical engineering & electromechanics*, 2002, no.1, pp. 23-27. 9. Voldek A.I., Popov V.V. *Electric machines. Alternating current machines. High school book*. St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 350 p.

*Дьогтев Володимир Григорович¹, д.т.н., проф.,
Лаврук Ігор Семенович¹,*

¹ Одеський національний політехнічний університет,
65044, Одеса, пр. Шевченка, 1,
тел/phone +38 063 9779569, +38 067 7875279,
e-mail: kem.deg@gmail.ru, groot@mail.ru

V.G. Degtev¹, I.S. Lavruk¹

¹ Odessa National Polytechnic University
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

Multiphase winding homologous series synthesis and harmonic analysis.

Multiphase windings are shown to form three types of homology. A bipolar winding homology formation algorithm is developed. Change in electromagnetic properties of the windings forming a homologous series proves to uniquely comply with the law of the winding series structure transformation. Through application of the compliance specified, an automated three-phase winding synthesis and harmonic analysis subsystem is designed.

Key words – homologous series, multiphase windings, generalized structural model, subsystem of automated synthesis, harmonic analysis.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО КРИТЕРИЯ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ

Пропонується модифікація критерію зведених витрат за рахунок використання коефіцієнтів значимості експлуатації та пріоритету врахування активних витрат, що дозволяє узгодити максимум ККД та мінімум зведених витрат. Проведено аналіз впливу коефіцієнту інфляції на критерій зведених витрат.

Предлагается модификация критерия приведенных затрат за счет использования коэффициентов значимости эксплуатации и приоритета учета активных потерь, что позволяет согласовать максимум КПД и минимум приведенных затрат. Проведен анализ влияния коэффициента инфляции на критерий приведенных затрат.

ВВЕДЕНИЕ

Определяющим фактором для отечественных потребителей асинхронных двигателей (АД) на сегодняшний день есть их цена. Вместе с тем мировая практика показывает, что стремительное повышение стоимости энергоресурсов требует разработки и производства энергосберегающих двигателей с повышенными энергетическими показателями и сниженными эксплуатационными затратами, несмотря на некоторое повышение стоимости таких двигателей.

Эффективность решения задачи оптимального проектного синтеза определяется обоснованностью проектного критерия. Выбор критерия зависит от назначения электрической машины (ЭМ), условий ее эксплуатации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние десятилетия много стран в качестве критерия при проектировании АД используют КПД, максимум которого достигается в результате параметрической оптимизации. Но критерий КПД не может учесть много финансовых аспектов, таких как затраты на изготовление и эксплуатацию двигателя, коэффициент инфляции и другое.

При проектировании серий АД используется критерий приведенных затрат (ПЗ) [1-3]. При разработке энергосберегающих АД проектным критерием является КПД и определение экономической эффективности основывается на расчетах экономии электроэнергии и стоимости компенсации реактивной энергии [4]. Также может быть использован критерий ПЗ, если он модифицирован с учетом следующих обстоятельств [5]: необходимо учитывать влияние на критерий инфляционных процессов, поскольку нормативные сроки окупаемости АД достаточно продолжительные (5-8 лет), за время службы двигателя энергетическая составляющая критерию ПЗ в несколько раз превышает составляющую, связанную с капитальными затратами, поэтому вопрос об оптимизации энергетической составляющей является особенно важным.

Для того, чтобы использовать модифицированный критерий ПЗ, необходимо согласовать критерий ПЗ с критерием КПД, т.е. приблизить их экстремумы. Этого можно достичь, используя два коэффициента: коэффициент значимости эксплуатации $k_{зз}$ и коэффициент приоритета учета активных потерь $k_{нап}$. Целесообразно также введение в модифицированный критерий ПЗ

коэффициента инфляции $k_{инф}$, который учитывает процессы обесценивания денежной массы (инфляцию) [6].

С этой целью было выполнено корректирование алгоритма расчета ПЗ программы DIMASDrive[7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С учетом вышесказанного выражение для модифицированного критерия ПЗ имеет вид

$$ПЗ = \frac{C_{дв} + C_{зп}}{k_{зз}} + (C_{дв} + C_{зп}) \cdot (k_{ам} + k_{об}) \cdot k_{инф} + C_{на} \cdot k_{нап} \cdot k_{инф},$$

где $C_{дв}$ – стоимость двигателя; $C_{на}$ – стоимость потерь активной энергии; $C_{зп}$ – стоимость затрат, соответствующих компенсации потребляемой реактивной мощности; $k_{ам}$ – коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления; $k_{об}$ – коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание двигателя; $k_{нап}$ – коэффициент приоритета учета активных потерь; $k_{зз}$ – коэффициент значимости эксплуатации $k_{зз}$; $k_{инф}$ – коэффициент инфляции).

Значение $k_{инф}$ рассчитывается следующим образом

$$k_{инф} = \frac{\sum_{m=0}^{T_n-1} \left(1 + \frac{d_{инф}}{100\%}\right)^m}{T_0},$$

где T_n – нормативный срок окупаемости АД; $d_{инф}$ – усредненный показатель годовой инфляции (в %).

Подбор коэффициентов для согласования максимума КПД и минимума ПЗ выполнен на примере двигателя 4A160S4Y3 [8]. Чтобы найти экстремумы критериев КПД и ПЗ проведено оптимизацию двигателя с помощью DIMASDrive, изменяя значения двух варьируемых параметров: коэффициента изменения магнитного потока $k_{имп}$ (числа витков обмотки статора с учетом допустимого коэффициента заполнения паза статора) в диапазоне от 0,9 до 1,1 и длины статора L в диапазоне от 112 до 196 мм.

Оптимум КПД получено при значениях $k_{имп}$ и L соответственно 0,9 и 173 мм (рис. 1). Оптимум ПЗ получено при значениях $k_{имп}$ и L соответственно 0,9 и 156 мм (рис. 2).

Расчеты с использованием традиционного выражения ПЗ показывают существенное расхождение значений длины машины, которые отвечают максимуму КПД и минимуму ПЗ. При введении коэффициентов $k_{нап} = 9$, $k_{зз} = 8$ экстремумы практически совпадают.

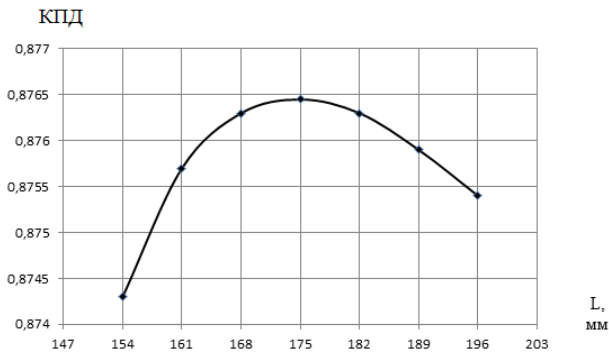


Рис. 1. Зависимость КПД от L при значении $k_{инф}$, равном 0,9

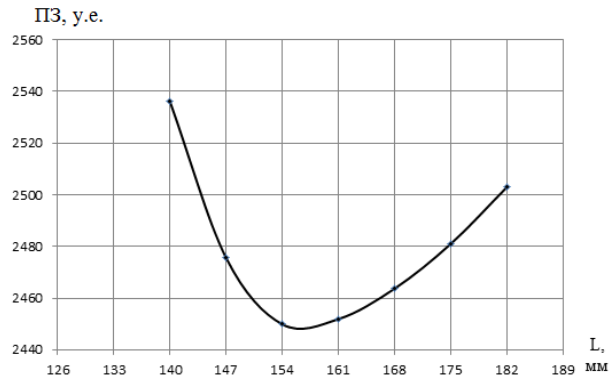


Рис. 2. Зависимость ПЗ от L при значении $k_{инф}$, равном 0,9

Положение экстремума модифицированного критерия ПЗ показано на рис. 3.

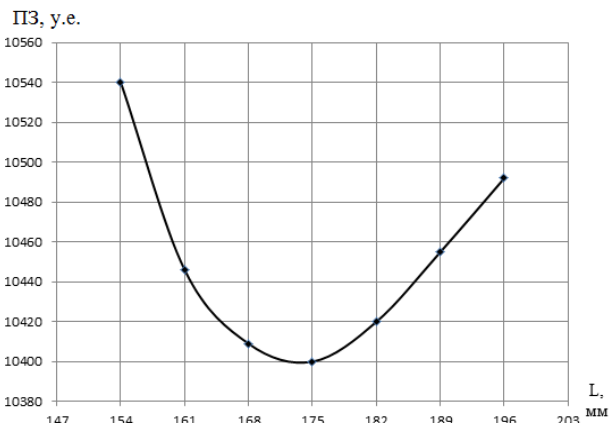


Рис. 3. Зависимость модифицированных ПЗ от L при значении $k_{инф}$, равном 0,9, и коэффициентах $k_{нап}$ и $k_{эз}$, значения которых равны 9 и 8 соответственно

Коэффициент $k_{нап}$ значительно больше влияет на значение ПЗ чем коэффициент $k_{эз}$. Сравнение серийного и оптимизированного двигателей, а также оптимизированного АД с коэффициентами $k_{нап}$ и $k_{эз}$ представлено в табл. 1. Как видно из табл. 1, коэффициенты $k_{нап}$ и $k_{эз}$ влияют только на значения ПЗ.

Анализ коэффициента $k_{инф}$ был проведен для того же двигателя 4A160S4Y3, но уже с найденными коэффициентами $k_{нап}$ и $k_{эз}$. Для примера показатель инфляции $d_{инф}$ составляет 2 %, а срок окупаемости T_n – 8 лет. При таких значениях $d_{инф}$ и T_n коэффициент $k_{инф}$ равен 1,073.

Чтобы проверить влияние $k_{инф}$ на критерий ПЗ, было проведено оптимизацию двигателя с помощью DIMASDrive, изменяя значения коэффициента изменения магнитного потока $k_{инф}$ в диапазоне от 0,9 до 1,1 и длины

статора L в диапазоне от 112 до 196 мм. Как видно из рис. 4 положение экстремума не изменилось и осталось при значениях $k_{инф}$ и L соответственно 0,9 и 173 мм, но величина ПЗ увеличилась, что также видно из табл. 2.

Таблица 1
Сравнение показателей модификаций двигателя 4A160S4Y3

Показатели \ Двигатели	Серийный	Оптимизированный по критерию ПЗ	Оптимизированный по критерию КПД	Оптимизированный по критерию ПЗ
ПЗ АД, у.е.	2488	2449	2481	10407
η АД	0,866	0,875	0,876	0,876
cos ϕ АД	0,868	0,859	0,888	0,888
Масса АД, кг	121	129	139	139
Стоимость АД, у.е.	573	602	637	637
Объем АД, дм ³	10,36	11,54	12,95	12,95
Макс. перегрев обмотки статора, °С	92	76	71	71
Коэффициент изменения потока $k_{инф}$	1	0,9	0,9	0,9
Длина статора L , мм	140	156	173	173

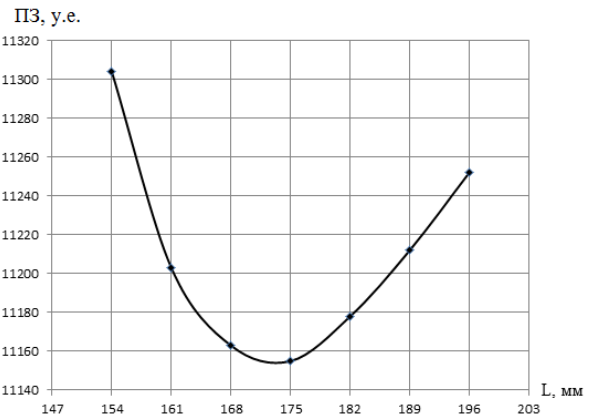


Рис. 4. Зависимость ПЗ от L при $k_{инф}$, равном 0,9, и коэффициентах $k_{нап}$ и $k_{эз}$ и $k_{инф}$ 9, 8 и 1,073 соответственно

Таблица 2
Сравнение показателей модификаций двигателя 4A160S4Y3 без учета $k_{инф}$ и с учетом $k_{инф}$

Показатели \ Двигатели	Оптимизированный по модифицированному критерию ПЗ без $k_{инф}$	Оптимизированный по модифицированному критерию ПЗ с $k_{инф}$
ПЗ АД, у.е.	10407	11155
η АД	0,876	0,876
cos ϕ АД	0,888	0,888
Масса АД, кг	139	139
Стоимость АД, у.е.	637	637
Объем АД, дм ³	12,95	12,95
Макс. перегрев обмотки статора, °С	71	71
Коэффициент изменения потока $k_{инф}$	0,9	0,9
Длина статора L , мм	173	173

Проектные ограничения определены требованиями стандартов, технических заданий, возможностями производства и могут быть разделены на две группы: конструктивно-технологическую и функциональную. В составе первой группы ограничения геометрических размеров конструкции АД. Вторая включает в себя механические, тепловые, динамические и виброакустические ограничения.

ВЫВОДЫ

1. Расчеты с использованием традиционного выражения критерия ПЗ показали существенное различие значений длины машины, которые отвечают максимуму КПД и минимуму ПЗ. Для приближения этих экстремумов в модифицированном критерии ПЗ были использованы коэффициенты значимости эксплуатации $k_{эз}$ и приоритета учета активных потерь $k_{нан}$.

2. Значения модифицированного критерия ПЗ значительно превышают значения немодифицированного.

3. $k_{инф}$ определяет только значение ПЗ, не влияя на положение минимума критерия ПЗ. Однако поскольку при учете $k_{инф}$ величина ПЗ увеличивается, учет $k_{инф}$ необходим при проектировании.

4. Такая же закономерность наблюдается при большем количестве варьируемых проектных переменных.

5. Аналогичным образом может быть осуществлено оптимизационное проектирование по модифицированному критерию ПЗ энергосберегающих АД других мощностей, частот вращения, конструктивных исполнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуринов Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
2. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 503 с.
3. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // *Электромашиностроения та електрообладнання*: Респ. міжвід.наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51-54.
4. Попов В.И., Ахундов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серия РА. – М.: Изд-во "Знак", 1999. – 256 с.
5. Петрушин В.С., Якимец А.М., Волощук Н.А. Використання модифікованого критерію зведених витрат при розробці високоефективних асинхронних двигунів // *Науково-технічний журнал "Електроінформ"*. – № 2. – 2008. – С. 6-7.
6. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 303 с.

7. 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). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gurin Ja.S., Kuznecov B.I. *Proektirovanie serij jelektricheskikh mashin*. Moscow, Jenergija Publ., 1978. 479 p. 2. Dombrovskij V.V., Hutoreckij G.M. *Osnovy proektirovanija jelektricheskikh mashin peremennogo toka*. Leningrad, Jenergija Publ., 1974. 503 p. 3. Petrushin V.S. *Privedenные затраты asinhronnykh dvigatelej v chastotnom jelektroprivoде pri razlichnykh zakonah upravlenija*. *Elektromashinobuduvannja ta elektroobladnannja*, 2001, no.56, pp. 51-54. 4. Popov V.I., Ahunov T.A., Makarov L.N. *Sovremennye asinhronnye jelektricheskie mashiny: Novaja Rossijskaja serija RA*. Moscow, Znak Publ., 1999. 256 p. 5. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Voloshchuk N.A. *Vykorystannja modyfikovanoho kryteriiu zvedenykh vytrat pry rozrobtsi vysokoefektyvnykh asynkhronnykh dvyhuniv*. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal "Elektroinform"*, 2008, no.2, pp. 6-7. 6. Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom jelektroprivoде: Ucheb. posob. dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij*. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 303 p. 7. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Yakimets A.M. *Programmnyj produkt "DIMASDrive"*. *Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoда (svidetel'stvo o registracii programmy PA№4065)*. Kiev: Ministerstvo obrazovanija i nauki Ukrainy. Gosudarstvennyj departament intelektual'noj sobstvennosti, 26.03.2001. 8. Kravchik A.Je., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaja E.A. *Asinhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1982. 504 p.

Поступила (received) 15.09.2013

*Петрушин Виктор Сергеевич, д.т.н., проф.,
Одесский национальный политехнический университет,
кафедра "Электрические машины",
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +380 048 7058494, e-mail: victor_petrushin@ukr.net*

*V.S. Petrushin
Odessa National Polytechnic University
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine*
Energy-efficient induction motors designing with application of a modified criterion of reduced costs.
The paper introduces a modified criterion of reduced costs that employs coefficients of operation significance and priority of ohmic loss accounting to allow matching maximum efficiency with minimum reduced costs. Impact of the inflation factor on the criterion of reduced costs is analyzed.
Key words – induction motor, optimization design, criterion of reduced costs, modification, rate of inflation.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВЕНТИЛЬНОМУ ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

На основі вихідних допущень створено математичну модель, яка описує електромеханічні процеси у вентиляльному двигуні постійного струму з явнополюсним статором і збудженням від постійних магнітів.

На основе исходных допущений создана математическая модель, описывающая электромеханические процессы в вентиляльном двигателе постоянного тока с явнополюсным статором и возбуждением от постоянных магнитов.

ВСТУП

У процесі технологічної еволюції виробники промислового устаткування та побутової техніки почали широко використовувати вентиляльні двигуни з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі. Це є цілком логічно, оскільки двигуни цієї конструкції мають ряд переваг, а саме: нема рухомих контактів, отже не потрібне постійне обслуговування, а тому вони дешеві в обслуговуванні; тривалий термін служби і висока надійність; висока швидкодія.

Переваги вентиляльних двигунів постійного струму забезпечують їх конкурентноздатність в порівнянні з іншими типами електричних двигунів. Відтак виникає необхідність синтезу та аналізу роботи такого двигуна, а значить і в створенні його математичної моделі.

Мета роботи – отримати систему рівнянь, яка описує електромеханічні процеси у вентиляльному двигуні постійного струму з явнополюсним статором і збудженням від постійних магнітів.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом досліджень є трифазний вентиляльний двигун постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі. Принципова електрична схема даного двигуна зображена на рис. 1 [1]. Предметом дослідження є магнітні, електромагнітні, та електромеханічні процеси, які відбуваються в вентиляльному двигуні під час його роботи.

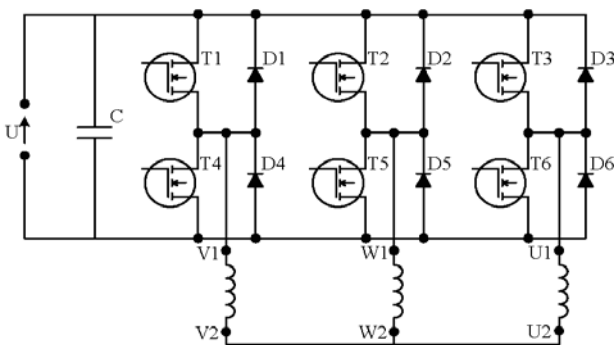


Рис. 1. Принципова електрична схема вентиляльного двигуна

Вихідні допущення:

- магнітні зв'язки між секціями відсутні;
- крива розмагнічення постійного магніту є прямолінійною;
- робоча точка постійного магніту лежить на прямій повернення для всіх режимів роботи двигуна;
- потокозчеплення обмотки секції є функцією кута повороту ротора і струму та змінюється гармонічно;

- потокозчепленням, спричиненим потоками розсіяння нехтуємо;
- перехідні процеси ввімкнення і вимкнення силових транзисторів відбуваються миттєво;
- опір транзистора в закритому стані як і опір діода у зворотному напрямку вважатимемо безмежним.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

За прийнятих допущень спад напруги на j -му транзисторі визначатиметься за формулою:

$$\Delta U_{T_j} = U_{KE.0} + i_{k_j} \cdot R_{KE.НАС}, \quad (1)$$

де $U_{KE.0}$ і $R_{KE.НАС}$ – паспортні дані транзистора, i_{k_j} – струм транзистора, $j = 1 \dots 2m$ – номер транзистора, m – кількість секцій ВД, а

$$k_j = \begin{cases} j, & \text{якщо } j \leq m \\ (j-m), & \text{якщо } j > m. \end{cases}$$

Стан транзисторів і діодів ВД описується цілочисельними масивами KT і KD відповідно. j -ий елемент цього масиву рівний нулю, за умови, що транзистор (чи діод) з j -им номером закритий і одиниці, якщо відкритий. Стан кожного транзистора залежить від кута положення ротора двигуна відносно статора, і описуватиметься такою системою логічних рівнянь:

$$KT_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \beta < \theta_e + \frac{2\pi}{m}(m-1) \leq \beta + \gamma; \\ 0, & \text{в усіх інших випадках;} \end{cases} \quad (2)$$

$$KT_{i+m} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \beta < \theta_e + \frac{2\pi}{m}(m-1) + \pi \leq \beta + \gamma; \\ 0, & \text{в усіх інших випадках;} \end{cases}$$

де θ_e – електричний кут положення ротора, $\gamma = 2\pi/m$ – кут комутації транзистора.

За прийнятих допущень спад напруги на j -му діоді визначатиметься за формулою:

$$\Delta U_{D_j} = \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{i_{k_j} + I_0}{I_0}, \quad (3)$$

де I_0 і b – паспортні дані транзистора, i_{k_j} – струм діода.

Елементи масиву KD визначатимуться згідно з фізикою процесів, які проходять в ВД: в момент часу, коли закривається транзистор в певній секції, в ній відкривається діод ($KD_j = 1$) (так, щоб струм секції протікав в тому ж напрямку що й до закриття транзистора), переходить діод в закритий стан ($KD_j = 1$), за умови, що струм, який протікає через нього спаде до нуля.

В залежності від того, через транзистор чи через діод протікає струм секції, спад напруги в її електричному колі визначатиметься одним з двох виразів:

$$U_{CT_{k_j}} = (U_{KE.0} + i_{k_j} \cdot R_{KE.НАС}) + i_{k_j} \cdot R + \frac{d\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j})}{dt}, \quad (4)$$

$$U_{CD_{k_j}} = \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{i_{k_j} + I_0}{I_0} + i_{k_j} \cdot R + \frac{d\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j})}{dt}, \quad (5)$$

де i_{k_j} – струм секції, R – активний опір секції, $\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j})$ – потокозчеплення секції.

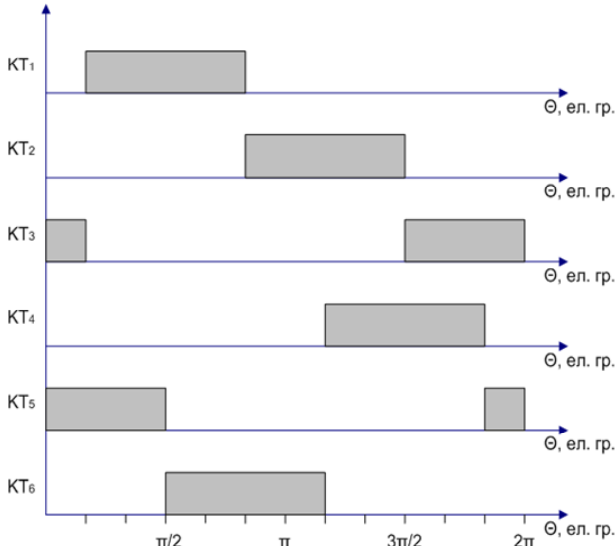


Рис. 2. Діаграма сигналів керування транзисторами інвертора напруги ВД ПС

Потокозчеплення секції, яке є функцією від її струму і кута повороту ротора, згідно з прийнятих допущень визначається за формулою:

$$\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j}) = 16 \cdot \frac{\Phi_{max} \cdot \lambda_\delta + w_z \cdot \lambda_\sigma \cdot (\lambda_m + \lambda_\sigma) \cdot i_{k_j}}{\lambda_m + \lambda_\delta + \lambda_\sigma} \times (6)$$

$\times w_z \cdot \cos(\theta_e)$,

де Φ_{max} – амплітуда магнітного потоку, який створюється постійним магнітом ротора; λ_δ , λ_σ , λ_m – магнітні провідності повітряного проміжку, розсіяння постійного магніту відповідно; w_z – число витків зубця секції статора.

Відповідно

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j})}{dt} &= \frac{d\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j})}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} + \frac{d\psi_{k_j}(\theta_e, i_{k_j})}{di_{k_j}} \cdot \frac{di_{k_j}}{dt} = \\ &= \left(\frac{16 \cdot w_z \cdot \lambda_\delta \cdot w_z \cdot (\lambda_m + \lambda_\sigma)}{\lambda_m + \lambda_\delta + \lambda_\sigma} \right) \cdot \cos(\theta_e) \cdot \frac{di_{k_j}}{dt} - \\ &= \frac{\left(\Phi_{max} \cdot \lambda_\delta + w_z \cdot \lambda_\sigma \cdot (\lambda_m + \lambda_\sigma) \cdot i_{k_j} \right) \cdot 16 \cdot w_z \cdot \sin(\theta_e)}{\lambda_m + \lambda_\delta + \lambda_\sigma} \cdot \omega \cdot p. \end{aligned} \quad (7)$$

Системи рівнянь, що описують стан електричної рівноваги секції для кожного з приведених станів на рис. 3, матимуть вигляд:

$$\begin{cases} \Delta U_{T_1} + i_1 \cdot R + \frac{d\psi_1(\theta_e, i_1)}{dt} + \Delta U_{T_5} + i_2 \cdot R + \frac{d\psi_2(\theta_e, i_2)}{dt} = U, \\ \Delta U_{T_5} + i_2 \cdot R + \frac{d\psi_2(\theta_e, i_2)}{dt} - \left(\Delta U_{D_6} + i_3 \cdot R + \frac{d\psi_3(\theta_e, i_3)}{dt} \right) = 0, \\ i_1 = i_2 + i_3, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{T_1} + i_1 \cdot R + \frac{d\psi_1(\theta_e, i_1)}{dt} + \Delta U_{T_5} + i_2 \cdot R + \frac{d\psi_2(\theta_e, i_2)}{dt} = U, \\ i_1 = i_2, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{T_1} + i_1 \cdot R + \frac{d\psi_1(\theta_e, i_1)}{dt} + \Delta U_{T_6} + i_3 \cdot R + \frac{d\psi_3(\theta_e, i_3)}{dt} = U, \\ \Delta U_{T_6} + i_3 \cdot R + \frac{d\psi_3(\theta_e, i_3)}{dt} - \left(\Delta U_{D_2} + i_2 \cdot R + \frac{d\psi_2(\theta_e, i_2)}{dt} \right) = U_c, \\ i_1 = i_3 - i_2, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{T_1} + i_1 \cdot R + \frac{d\psi_1(\theta_e, i_1)}{dt} + \Delta U_{T_6} + i_3 \cdot R + \frac{d\psi_3(\theta_e, i_3)}{dt} = U, \\ i_1 = i_3. \end{cases} \quad (11)$$

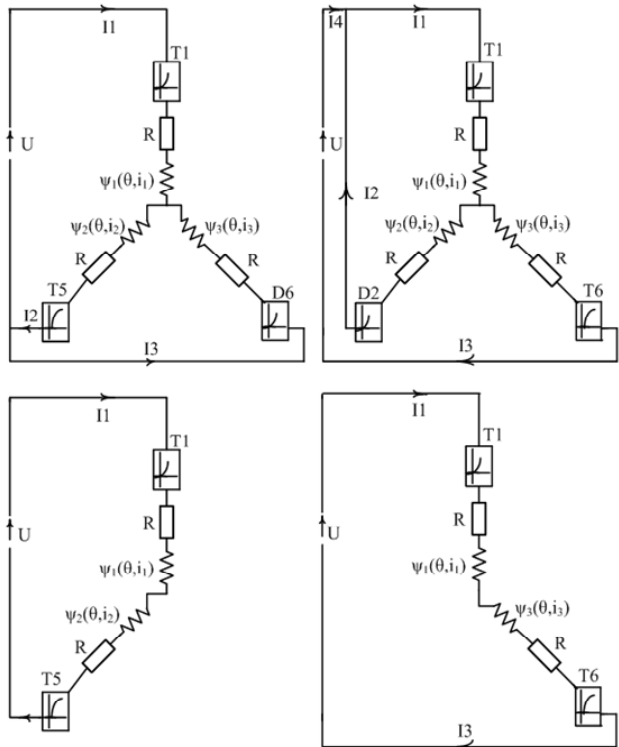


Рис. 3. Схема силового електричного кола ВД ПС при комутації першої секції

Враховуючи приведені викладки система рівнянь, яка описуватиме стан електричної рівноваги першої секції, матиме вигляд:

$$\begin{cases} KT_1 \cdot U_{CT_1} + KT_5 \cdot U_{CT_2} + KT_6 \cdot U_{CT_3} = U; \\ KT_5 \cdot KD_6 \cdot (U_{CT_2} + U_{CD_3}) + \\ + KT_6 \cdot KD_2 \cdot (U_{CT_3} - U_{CD_2}) = 0; \\ i_1 = i_2(KT_5 - KD_2) + i_3(KT_6 + KD_6). \end{cases} \quad (12)$$

Система рівнянь, яка описуватиме стан електричної рівноваги двигуна, матиме вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^3 (KT_j + KT_{j+m}) \cdot U_{CT_{k_j}} = U, \\ \sum_{j=1}^m \left(KT_{m+k_{j+1}} \cdot KD_{m+k_{j+2}} \cdot (U_{CT_{k_{j+1}}} + U_{CD_{k_{j+2}}}) + \right. \\ \left. + KT_{m+k_{j+2}} \cdot KD_{k_{j+1}} \cdot (U_{CT_{k_{j+2}}} - U_{CD_{k_{j+1}}}) \right) = 0, \\ \sum_{j=1}^m (i_j \cdot KT_j) = \sum_{j=1}^m \left(i_j \cdot (KT_{k_{j+1}} \cdot (KT_{j+m} + KD_{j+m}) + \right. \\ \left. + KT_{k_{j+2}} \cdot (KT_{j+m} - KD_j) \right). \end{cases} \quad (13)$$

Продиференціювавши третє рівняння системи, отримаємо:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^3 (KT_j + KT_{j+m}) \cdot U_{CT_{k_j}} = U, \\ \sum_{j=1}^m \left(KT_{m+k_{j+1}} \cdot KD_{m+k_{j+2}} \cdot (U_{CT_{k_{j+1}}} + U_{CD_{k_{j+2}}}) + \right. \\ \left. + KT_{m+k_{j+2}} \cdot KD_{k_{j+1}} \cdot (U_{CT_{k_{j+2}}} - U_{CD_{k_{j+1}}}) \right) = 0, \\ \sum_{j=1}^m \left(\frac{di_j}{dt} \cdot KT_j \right) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{di_j}{dt} \cdot (KT_{k_{j+1}} \cdot (KT_{j+m} + KD_{j+m}) + \right. \\ \left. + KT_{k_{j+2}} \cdot (KT_{j+m} - KD_j) \right) \end{cases} \quad (14)$$

Електромагнітний момент вентилювального визначається як сума електромагнітних моментів, які створюють його секції:

$$M_e = \sum_{j=1}^m M_{k_j}(\theta_e, i_j). \quad (15)$$

Електромагнітний момент, який створюється однією секцією, визначається як похідна магнітної коенергії цієї секції за кутом повороту ротора при постійному струмі секції:

$$M_{k_j}(\theta_e, i_j) = \left. \frac{\partial W_{k_j}(\theta_e, i_j)}{\partial \theta_e} \right|_{i_j = \text{const}}, \quad (16)$$

де W_k – магнітна коенергія секції; I_C – струм секції; θ – геометричний кут між осями зубця статора і постійним магнітом ротора.

Магнітну коенергію секції можна визначити, як:

$$W_j(\theta_{e_j}, i_j) = \int_0^{i_j} \Psi_{c_j}(i_j, \theta_j) di. \quad (17)$$

Враховуючи (15) – (17), та прийняті допущення вираз, для обчислення електромагнітного моменту, який створює двигун є таким:

$$M_e = \sum_{j=1}^m \left(4 \cdot p \left(\frac{w_z \Phi_{\max} \lambda_{\delta}}{\lambda_m + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} I_j + \frac{w_z^2 \lambda_{\delta} (\lambda_m + \lambda_{\sigma})}{\lambda_m + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} I_j^2 \right) \sin(\theta_{e_j}) \right). \quad (18)$$

Враховуючи вищевказане, можемо сформулювати систему рівнянь (19), яка описує електромеханічні процеси у вентилювальному двигуні постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^3 (KT_j + KT_{j+m}) \cdot U_{CT_{k_j}} = U; \\ \sum_{j=1}^m \left(KT_{m+k_{j+1}} \cdot KD_{m+k_{j+2}} \cdot (U_{CT_{k_{j+1}}} + U_{CD_{k_{j+2}}}) + \right. \\ \left. + KT_{m+k_{j+2}} \cdot KD_{k_{j+1}} \cdot (U_{CT_{k_{j+2}}} - U_{CD_{k_{j+1}}}) \right) = 0; \\ \sum_{j=1}^m \left(\frac{di_j}{dt} \cdot KT_j \right) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{di_j}{dt} \cdot (KT_{k_{j+1}} \cdot (KT_{j+m} + KD_{j+m}) + \right. \\ \left. + KT_{k_{j+2}} \cdot (KT_{j+m} - KD_j) \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \left(\sum_{j=1}^m \left(4 \cdot p \left(\frac{w_z \Phi_{\max} \lambda_{\delta}}{\lambda_m + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} I_{k_j} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{w_z^2 \lambda_{\delta} (\lambda_m + \lambda_{\sigma})}{\lambda_m + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} I_{k_j}^2 \right) \sin(\theta_{e_{k_j}}) \right) - M_c \right) \cdot \frac{1}{J}; \\ \frac{d\theta}{dt} = p \cdot \omega; \\ \text{де } U_{CT_{k_j}} = (U_{KE.0} + i_{k_j} \cdot R_{KE.HAC}) + i_{k_j} \cdot R + \frac{d\psi_{k_j}(\theta_{e_{k_j}}, i_{k_j})}{dt}; \\ U_{CD_{k_j}} = \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{i_{k_j} + I_0}{I_0} + i_{k_j} \cdot R + \frac{d\psi_{k_j}(\theta_{e_{k_j}}, i_{k_j})}{dt}; \end{cases} \quad (19)$$

ВИСНОВКИ

Запропонована математична модель дає змогу моделювати різноманітні режими роботи вентилювального двигуна постійного струму, що своєю чергою, дає змогу використати її для розроблення електромеханічних систем, до складу яких входять такі двигуни. Модель також може бути використана для проектування двигуна, що дасть змогу ще на стадії розробки отримати його робочі характеристики і параметри.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткачук В.І. Електромеханотроніка: Підручник – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 440 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tkachuk V.I. *Elektromekhanotronika: Pidruchnyk*. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2006. 440 p.

Надійшла (received) 07.10.2013

Ткачук Василь Іванович¹, д.т.н., проф.,

Жук Володимир Іванович¹, аспірант,

¹ Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра електричних машин та апаратів,

79013, Львів, вул. Степана Бандери, 12,

тел/phone +38 032 2582160, +38 097 8608104,

e-mail: tkachuk@polynet.lviv.ua, 1volk@ukr.net

V.I. Tkachuk¹, V.I. Zhuk¹

¹ Lviv Polytechnic National University

12, Bandera Street, Lviv, 79013, Ukraine

Mathematical modeling of electromechanical processes in a brushless DC motor.

On the basis of initial assumptions, a mathematical model that describes electromechanical processes in a brushless DC electric motor with a salient-pole stator and permanent-magnet excitation is created.

Key words – mathematical model, electromechanical processes, brushless DC electric motor.

УМЕНЬШЕНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТАТОРОВ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, ВЫЗВАННЫХ ВИБРАЦИЕЙ В ТОРЦЕВОЙ ЗОНЕ (АНАЛИЗ, ГИПОТЕЗЫ, ЭКСПЕРИМЕНТ)

Аналіз відмов турбогенераторів ТВВ-1000-2 засвідчив, що найбільш вразливою ланкою є статор ТГ, особливо такі елементи статора, як стяжні призми, зубці крайніх пакетів осердя статора, вивідні та з'єднувальні шини обмотки статора. Основною причиною руйнування вищезазначених елементів конструкції статора є утомні явища, викликані підвищеною вібрацією під впливом осевих змінних сил електромагнітного походження. Запобігти руйнації згаданих елементів конструкції можливо впровадженням вібромоніторингу і вібродіагностики.

Аналіз отказов турбогенераторов ТВВ-1000-2 показал, что наиболее уязвимым звеном является статор ТГ, такие его элементы, как стяжные призмы, зубцы крайних пакетов сердечника, выводные и соединительные шины обмотки статора. Основной причиной разрушения вышеназванных элементов является усталость металлов, вызванная повышенной вибрацией под влиянием осевой переменной силы электромагнитного происхождения. Предотвратить разрушения элементов конструкции возможно внедрением вибромониторинга и вибродиагностики.

В настоящее время в электроэнергетике Украины большая часть оборудования отработала либо приближается к отработке рабочего ресурса, что вызывает его повышенную повреждаемость. К такому оборудованию относятся пять турбогенераторов ТВВ-1000-2УЗ на 3000 об/мин, установленных на трёх атомных электростанциях – Южноукраинской, Хмельницкой и Ровенской.

Аналитический обзор и системный анализ отказов и дефектов статоров турбогенераторов ТВВ-1000-2УЗ

производства ОАО "Электросила", выявленных на пяти турбогенераторах за многие годы их эксплуатации, показал [7], что к числу наиболее повреждаемых элементов конструкции статора данных турбогенераторов относятся:

- тяжёлые призмы статора (рис. 1);
- зубцы крайних пакетов сердечника статора (рис. 2);
- выводные и соединительные шины лобовых частей обмотки статора (рис. 3).



Рис. 1. Усталостный излом хвостовика стяжной призмы по резьбе М64х4 турбогенератора ТВВ 1000-2УЗ

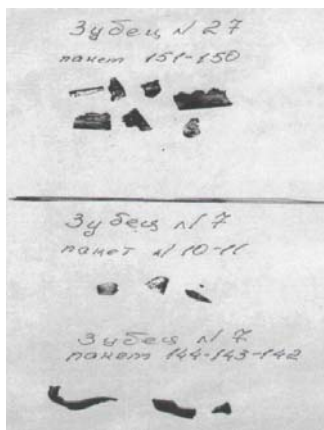


Рис. 2. Фрагменты разрушенных зубцов сердечника статора турбогенератора ТВВ 1000-2У

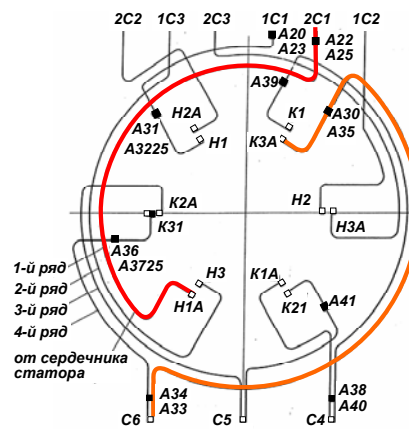


Рис. 3. Схема установки виброакселерометров FOA-100 и датчиков ИПА-9. Условные обозначения: ■ – датчики. Буквенные обозначения: **С** – секция шины; **Н** – начало шины; **К** – конец шины; **А** – датчик

При анализе причин разрушения тяжёлых призм в основу была положена теория усталостного разрушения материалов, с помощью которой были получены расчетные результаты, позволяющие определить время эксплуатации ТГ (в виде количества циклов знакопеременной силы, изменяющейся с частотой 100 Гц) до разрушения хвостовиков тяжёлых призм.

В предположении 10-летнего периода эксплуатации ТГ, оценка циклически изменяющейся осевой силы, приложенной к торцевым элементам сердечника и способной вызвать разрушение тяжёлых призм, была выполнена на основе теории усталостного разрушения и составила 514 кН (52,41 тонны) [4, 6]. При этом 10 годам непрерывной работы ТГ соответствовало $3.153 \cdot 10^{10}$ циклов изменения осевой силы с частотой 100 Гц.

Параллельно было проведено математическое моделирование электромагнитных вибровозмущающих

осевых сил в сердечнике статора для разных режимов работы ТГ. Эти силы воздействуют на крайние пакеты, экран, нажимную плиту и нажимные пальцы торцевых зон сердечника статора и **передаются тяжёлым призмам**. Моделирование выполнялось с помощью методов теории электромагнитного поля с использованием двухмерной и трехмерной моделей торцевой зоны. При этом амплитуда действующей на сердечник суммарной осевой электромагнитной вибровозмущающей силы, полученная для номинального режима работы ТГ составила 541,6 кН (55,22 тонны) [4, 8].

Сравнение найденного значения электромагнитной силы в 55,22 тонны со значением силы в 52,41 тонны, рассчитанной по условиям усталостного разрушения хвостовиков тяжёлых призм, демонстрирует

достаточно хорошее совпадение двух результатов, что свидетельствует об адекватности разработанной методики расчета вибровозмущающих сил. Некоторое расхождение величины силы, полученной в результате электромагнитных расчетов, от величины силы, полученной методами сопротивления материалов деформации и разрушению, может быть объяснено влиянием следующих причин:

- в реальной конструкции ТГ действует сложное сочетание различных факторов, влияющих на усталостную прочность призм, которые практически не поддаются строгому анализу;
- характеристики материала стяжных призм получены на опытных образцах в лабораторных условиях, при которых невозможно учесть поведение той или иной конструктивной детали, выполненной из данного материала, в реальном сложном изделии, каким является турбогенератор;
- кроме того, выполненные оценки не учитывают изменения температуры призм и возникающих при этом термомеханических напряжений.

Несмотря на то, что полученные выше результаты носят приближенный характер, они раскрывают тенденции поведения стяжных призм под воздействием осевых знакопеременных сил в процессе длительной эксплуатации ТГ.

Исходя из результатов системного анализа отказов и дефектов статоров турбогенераторов ТВВ-1000-2У3, было также проведено моделирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора [3]. Была предложена расчетная модель, позволяющая объяснить явление разрушения зубцов резонансными процессами, обусловленными вибрациями сердечника статора.

Известно, что с целью уменьшения вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора выполняется их скос. Другими словами, ряд примыкающих к торцу сердечника пакетов выполняется с различной высотой зубцов, причем, чем ближе расположен пакет к торцу, тем меньше высота его зубца. Например, в турбогенераторе ТВВ-1000-2У3 высота зубцов статора изменяется от 222 мм (пакеты в центральной активной зоне) до 50 мм (на торце статора).

При оценке прочности зубца было учтено изменение характеристик его шихтованной (клеевой) структуры при длительном многоцикловом нагружении, так как под влиянием температуры нагрева и вибрации существенно снижаются прочность и диэлектрические свойства клеевых эпоксидных соединений.

Предположив, что вследствие разрушения клевого слоя расслоение зубца произошло лишь в одном месте пакета, две отдельные части зубца могут резонировать самостоятельно. В экстремальном случае зубец может быть расслоен (распушен) на отдельные листы стали. Для нескольких характерных случаев расслоения зубца расчёты показали, что с уменьшением толщины отслоенной части зубца происходит снижение собственных частот его поперечных колебаний, т.е. отдельные его части могут резонировать самостоятельно. Это может вызывать резкое повышение амплитуды колебания и, как следствие, возрастание деформации и механических напряжений, что ускоряет процесс разрушения зубца.

Таким образом, предложенная гипотеза объясняет причины, приводящие к разрушению зубцов, расслоением склеенных пакетов сердечника вследствие потери склеивающих и изолирующих свойств клея при длительной эксплуатации турбогенератора и повышенной вибрацией отдельных групп листов электротехни-

ческой стали под воздействием вибровозмущающих сил разного происхождения.

Заслуживают внимания результаты экспериментальных исследований вибраций на ТГ третьего блока ЮУ АЭС с целью определения причин повреждаемости междуфазных соединительных шин обмотки статора турбогенератора (рис. 3.)

При измерении вибраций использовалась не принятая на станции характеристика вибрации – виброперемещение (измеряемая в микронах), а виброускорение, непосредственно регистрируемое вибродатчиками.

Запись вибраций происходила на протяжении примерно 14 часов на стадии запуска турбоблока после внеочередного ремонта ТГ.

Экспериментально показано, что ряд соединительных шин совершают вынужденные колебания на частотах 100, 200, 300 и других частотах, кратных 100 Гц (рис. 4, 5).

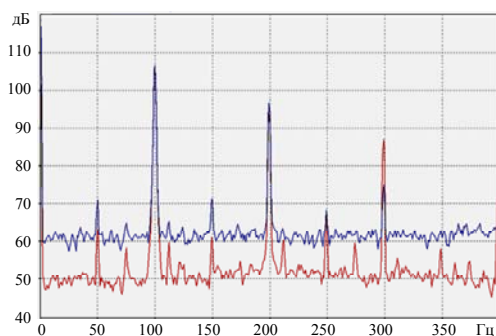


Рис. 4. Фрагмент спектрограммы вибрации соединительной шины обмотки статора ТГ ТВВ 1000-2У3 в начале набора активной мощности

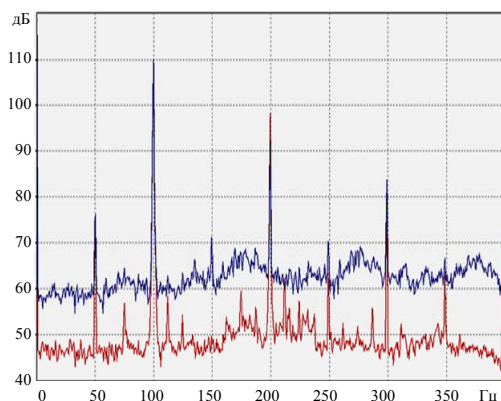


Рис. 5. Спектры вибраций шин через 10 час. 30 мин от начала набора мощности ТГ (шум, в основном, в области 50 – 400 Гц)

Наиболее интенсивные колебания, кроме частоты 100 Гц, происходят на частоте 200 Гц. Было установлено, что количество шин, имеющих собственные частоты, близкие к частоте 200 Гц, весьма велико, а это означает, что эти шины статора постоянно вибрируют в условиях, близких к резонансу на частоте 200 Гц, что и обуславливает их высокую повреждаемость [2].

Поэтому существенным резервом снижения повреждаемости соединительных шин являются:

- дополнительная подпрессовка сердечника статора, а также изменение конструкции и способа крепления лобовых частей и соединительных шин обмотки статора;
- установка вибродатчиков на опорных колоннах, на нажимных фланцах и пальцах сердечника статора для фиксации нежелательной виброактивности сердечника статора;

• существующие технические условия на отстройку от резонансов только лишь для 100 Гц не являются достаточными. Необходимо считаться с наличием существенных уровней вибраций как на высших гармониках, так и субгармониках;

• наиболее радикальным средством явилась замена обмотки статора производства ОАО "Электросила" на обмотку статора компании "Альстом".

В условиях исчерпания эксплуатационного ресурса необходим переход от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактической необходимости. Реализация такого перехода предъявляет качественно новое требование к системе мониторинга и диагностики: Необходимо работать на упреждение отказов, на ранней стадии выявляя источники потенциально опасных явлений;

• необходимо увеличивать количество и чувствительность датчиков; методы и разрешающая способность анализа должны становиться более адекватными.

При исчерпании эксплуатационного ресурса всё большую роль играют "внезапные" отказы, на которые традиционные системы не реагируют или реагируют слишком поздно. В действительности отказы не случайны. Их причиной могли быть ошибки проектирования, технология изготовления и монтажа, а также несоблюдение правил эксплуатации. Длительный период развития частых отказов, скрытых для грубых методов наблюдения, приводит к тому, что лавинообразное развитие дефектов на конечной стадии приводит в лучшем случае к отказу системы, а в худшем - к аварии. Поэтому внедрение автоматизированной системы вибромониторинга и вибродиагностики, предназначенных для поддержания технического состояния турбогенератора как элемента турбоагрегата атомных электростанций, является необходимой [1, 5, 7].

ВЫВОДЫ

1. Приводятся результаты системного анализа причин отказов турбогенератора ТВВ-1000-2У3 вследствие повышенной вибрации статора, вызванной осевыми электромагнитными силами.

2. Наиболее уязвимыми элементами конструкции являются стяжные призмы (хвостовики стяжных призм) и зубцы крайних пакетов сердечника статора.

3. При оценке виброактивности выводных и соединительных шин обмотки статора необходимо считаться с тем, что вынужденные колебания наблюдаются на частоте 100 Гц и частотах, кратных 100 Гц. Наиболее заметны колебания на частоте 200 Гц. Принятая в настоящее время отстройка собственных частот выводных шин от 100 Гц не является достаточной.

4. Наиболее радикальным средством снижения последствий интенсивных вибраций элементов обмотки статора явился переход на обмотку статора компании "Альстом".

5. Рекомендуются внедрить вибромониторинг и вибродиагностику в качестве эффективных средств предотвращения отказов и аварийных остановок турбоблоков АЭС Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумилов Ю.А., Демидюк Б.М., Штогрин А.В. Вибродиагностика как составляющая часть мониторинга технического состояния силовых агрегатов электростанций // Праці ІЕД НАН України. – 2008. – № 1. – С. 76-80.
2. Шумилов Ю.А., Демидюк Б.М., Штогрин А.В. Результаты экспериментальных исследований вибраций турбогенератора ТВВ-1000-2У3 энергоблока № 3 ЮУ АЭС // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 5. – С. 32-36.
3. Васьковський Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Мо-

делирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора мощных турбогенераторов // Вісник НТУ "ХПІ". – 2009. – № 41. – С. 22-27.

4. Васьковський Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Аналіз вібровозмущаючих осевих сил в сердечнику статора потужного турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 21-26.

5. Шумилов Ю.А., Васьковський Ю.Н., Чумак В.В., Штогрин А.В. Вибродіагностика і моніторинг турбогенераторів атомних електростанцій // Гідроенергетика України. – 2009. – №1. С. – 28-31.

6. Шумилов Ю.А., Васьковський Ю.Н., Штогрин А.В. Вибровозмущаючі осеві сили і механіка руйнування елементів конструкції статора потужного турбогенератора // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Севастополь, 2009. – С. 77-78.

7. Шумилов Ю.А., Васьковський Ю.Н., Штогрин А.В. Системний моніторинг і діагностика турбоагрегатів на АЕС // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Севастополь, 2010. – С. 5-7.

8. Гайдено Ю.А., Вишневіський Т.С., Штогрин О.В. 3D-моделювання для визначення осевих сил, діючих на елементи торцевої зони потужного турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 6. – С. 73-78.

Bibliography (transliterated): 1. Shumilov Yu.A., Demidjuk B.M., Shtogrin A.V. Vibrodiagnostika kak sostavl'jajushhaja chast' monitoringa tehničeskogo sostojanija silovyh agregatov jelektrostancij. *Pratsi IED NAS Ukraine*, 2008, no.1, pp. 76-80. 2. Results of experimental research on THUKr nuclear power station power plant № 3 turbogenerator TVV-1000-2U3 vibrations *Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.5, pp. 32-36. 3. Vas'kovsky Y.N., Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Simulation of the tooth fatigue destruction process in the end packets of powerful turbogenerator stator core. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2009, no.41, pp. 22-27. 4. Vas'kovsky Y.N., Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Analysis of vibration-exciting axial forces in a powerful turbogenerator stator core. *Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.2, pp. 21-26. 5. Shumilov Yu.A., Vas'kovsky Y.N., Chumak V.V., Shtogrin A.V. Vibrodiagnostika i monitoring turbogeneratorov atomnyh jelektrostancij. *Gidroenergetika Ukrainy*, 2009, no.1, pp. 28-31. 6. Shumilov Yu.A., Vas'kovsky Y.N., Shtogrin A.V. Vibrovoshhahajushhie oseyve sily i mehanika razrusheniya jelementov konstrukcii statora moshhnogo turbogeneratora. *Materijali mezhdunarodnoj naučno-tehničeskij konferencii. Sevastopol'*, 2009, pp. 77-78. 7. Shumilov Yu.A., Vas'kovsky Y.N., Shtogrin A.V. Sistemnyj monitoring i diagnostika turboagregatov na AES. *Materijali mezhdunarodnoj naučno-tehničeskij konferencii. Sevastopol'*, 2010, pp. 5-7. 8. Gaydenko Y.A., Vishnevskiy T.S., Shtogrin A.V. 3D-modeling for determination of axial forces acting in elements of the end zone of power turbogenerators. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 73-78.

Поступила (received) 10.10.2013

Шумилов Юрий Андреевич¹, д.т.н., проф.,
Штогрин Александр Валерьевич², инженер,
¹ ЗАО "Укратомэнергострой",
03035, Киев, ул. Урицкого, 45, оф. 606,
тел/phone: +38 044 2460989, e-mail: yuri2007@voliacable.com
² ОП "Хмельницькая АЭС",
30100, Хмельницькая обл., Нетешин,
тел/phone: +38 098 2253293

Yu.A. Shumilov¹, A.V. Shtogrin²

¹ ZAT Ukratomenergobud,
45, Urytskogo Str., office 606, Kyiv, 03035, Ukraine

² Khmelnytskyi Nuclear Power Plant
Netishyn, Khmelnytskyi region, 30100, Ukraine

Decrease in the damage of powerful turbogenerator stator caused by vibration in the end zones (analysis, hypotheses, experiment).

The analysis of the turbogenerators' TVB-1000-2Y3 failure has shown that the most vulnerable link in the stator is such of their elements as tightening prisms, the teeth of the end packet core, lead-out and connecting buses of the stator winding. The basic reason for the destruction of the elements mentioned is metal fatigue caused by excessive vibration under the influence of variable axial forces of electromagnetic origin. Preventing the destruction of the structural elements may be achieved by vibration monitoring and diagnostics. **Key words – turbogenerator, tightening prisms, the teeth, axial forces, monitoring and diagnostics.**

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Проведено аналіз та дослідження властивостей й параметрів різних типів шихтованих магнітопроводів силових трифазних трансформаторів. Встановлено, що більшість нових конструкцій шихтованих магнітопроводів мають серйозні недоліками, викликані конструкційними й технологічними особливостями процесу їх виготовлення. Ці недоліки ведуть до збільшення активних втрат у магнітопроводі, що нівелює їх переваги та не дозволяє їм конкурувати із класичною шихтованою конструкцією магнітопроводу.

Проведен анализ и исследование свойств и параметров различных типов шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов. Установлено, что большинство новых конструкций шихтованных магнитопроводов, обладают серьезными недостатками, вызванными конструктивными и технологическими особенностями процесса их изготовления. Эти недостатки ведут к увеличению активных потерь в магнитопроводе, что нивелирует их достоинства и не позволяет им конкурировать с классической шихтованной конструкцией магнитопровода.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных элементов электроэнергетики и электротехники являются силовые трехфазные трансформаторы. От их характеристик и параметров зависят качество и эффективность энергоснабжения, а также технико-экономические показатели электротехнических устройств и установок.

Особенностью работы силовых трехфазных трансформаторов является циклическое изменение уровня их нагрузки в течение суток. Максимальная нагрузка наблюдается днем, минимальная – ночью. В ночное время при малой нагрузке трансформаторов потери холостого хода (ХХ) становятся преобладающими и являются одной из важнейших характеристик трансформаторов.

Потери ХХ определяются конфигурацией и материалами магнитопровода трансформаторов. В современных условиях удорожания электроэнергии задача снижения потерь ХХ, повышения коэффициента полезного действия (КПД), снижение стоимости и уменьшение габаритов трансформатора является актуальной задачей.

Можно выделить три основных типа магнитопроводов, используемых при построении современных силовых трехфазных трансформаторов: шихтованные, витые и порошковые.

Применение порошковых магнитопроводов пока ограничено их высокой стоимостью, малым сортаментом и низкой магнитной индукцией – до 1 Тл [1]. Пока такие типы магнитопроводов применяют для построения специальных трансформаторов.

Все более широкое применение при изготовлении силовых трехфазных трансформаторов малой и средней мощности находят витые магнитопроводы. Их конструкции развиваются наиболее быстрыми темпами. Исследование свойств и параметров различных конфигураций витых магнитопроводов является темой отдельной статьи.

В настоящее время наиболее массовыми остаются трехфазные силовые трансформаторы с шихтованными магнитопроводами. Эти трансформаторы перекрывают весь диапазон мощностей и напряжений: от малых до больших.

Целью статьи является анализ современных конструкций шихтованных магнитопроводов трехфазных

трансформаторов для выявления среди них наиболее технологичных и с лучшими технико-экономическими показателями.

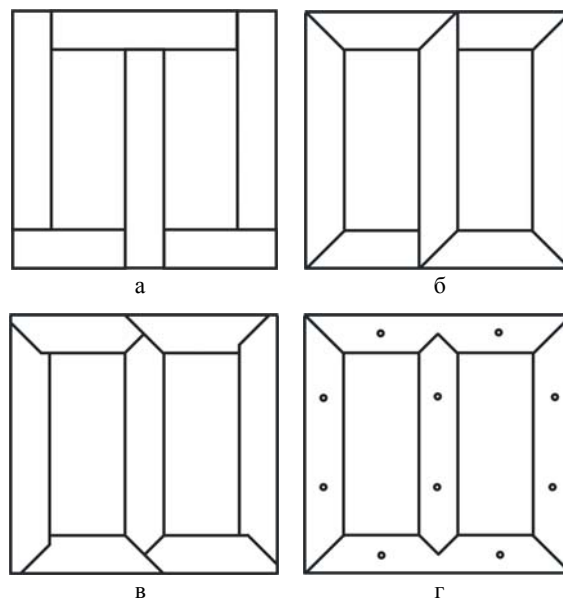


Рис. 1. Разновидности шихтованных магнитопроводов трехфазных трансформаторов [2]

Таблица 1
Особенности конструкций магнитопроводов на рис. 1, а-г

Тип магнитопровода на рис. 1	Количество пластин/типоразмеров		
	в одном слое	в стречнях	в ярямах
а	6/3	3/1	3/2
б	7/4	3/2	4/2
в	7/4	3/2	4/2
г	5/3	3/2	2/1

Следует выделить три основных конструкции шихтованных магнитопроводов трехфазных трансформаторов: BUTT-LAP (классический шихтованный с прямым резом стыка), 1/2 MITRE CORE, MITRED CORE, а также MULTI (SINGLE) STEP-LAP CORE, (см. рис. 1, а-г соответственно) [2, 3]. Несмотря на наличие при производстве до 4...8 % отходов [2] в последнее время доминирующее положение среди этих

конструкций занимает MULTI-STEP LAP CORE (рис. 1,г). Это связано с более простой сборкой магнитопровода, так как при такой шихтовке используется наименьшее количество пластин электротехнической стали (ЭТС) в слое и наименьшее количество их типоразмеров (см. табл. 1). При сборке стержней необходимо использовать 3 пластины 2-х типоразмеров, а при сборке ярем соответственно 2 и 1. Из-за наличия штампованных отверстий подобная технология позволяет использовать до 5 одинаковых пластин в одном слое, что делает возможным автоматизировать процесс сборки магнитопровода.

Стоимость ЭТС классического шихтованного магнитопровода BUTT-LAP на 6...10 % меньше стоимости магнитопровода MULTI-STEP LAP из-за необходимости компенсации отходов производства при использовании последнего.

АНАЛИЗ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрим структуру магнитопровода в зоне сочленения стержней с ярами. На рис. 2 схематически представлены виды соединений STEP LAP и BUTT-LAP. При шихтовке BUTT-LAP магнитная индукция в зоне соединений пластин может достигать 160 % номинальной рабочей индукции [3]. Это вызывает глубокое насыщение ЭТС в этих зонах, вызывая значительное увеличение активных потерь в магнитопроводе. При применении MULTI-STEP LAP шихтовки наблюдается меньшее увеличение магнитной индукции – до 120 % [3], а так же снижение активных потерь в магнитопроводе до 13% и уровня шума на 9 дБ [2, 3, 5], что связано с увеличением площади поверхности перехода магнитного потока в зонах сочленения ярем и стержней.

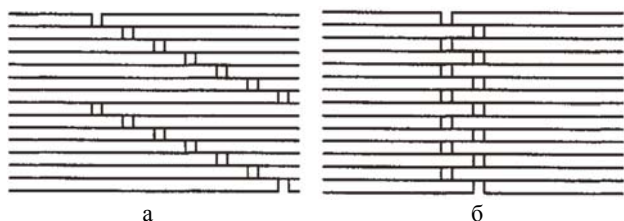


Рис. 2. STEP LAP (а) и традиционно шихтованное (Mitred) соединение BUTT-LAP (б) [4]

На рис. 3 [5] приведен пример распределения магнитного потока при использовании витого магнитопровода с распределенным зазором (wound DG-core [6, 7]) которое в полной мере повторяется при использовании MULTI-STEP LAP магнитопровода. Как видно из рисунка большая часть магнитных силовых линий переходит в соседние слои через боковые поверхности пластин, а меньшая часть – из торца в торец пластин одного слоя. Следовательно, магнитное сопротивление торцов пластин у зазора между пластинами в одном слое больше чем магнитное сопротивление между параллельными пластинами.

Следует отметить, что рис. 3 не совсем точно воспроизводит структуру магнитного поля в зоне, примыкающей к стыку. В этой зоне происходит выравнивание магнитной индукции во всех пластинах и

недогруженных магнитным полем пластин (как в левом верхнем и правом нижнем углах рисунка) не возникает. Но этот рисунок показывает, что при шихтовке типа MULTI-STEP LAP магнитный поток, проходящий поперек пластин, составляет 50 % и более от общего потока из-за отсутствия насыщения пластин, что приводит к резкому возрастанию потерь на вихревые токи. Здесь ширина зоны перехода потока значительно больше толщины пластины, а потери от вихревых токов пропорциональны квадрату этой ширины. При соединении BUTT-LAP магнитный поток, проходящий поперек пластин, составляет 20...25 % от общего потока из-за насыщения пластин, в которые частично переходит магнитный поток, что приводит к уменьшению потерь на вихревые токи.

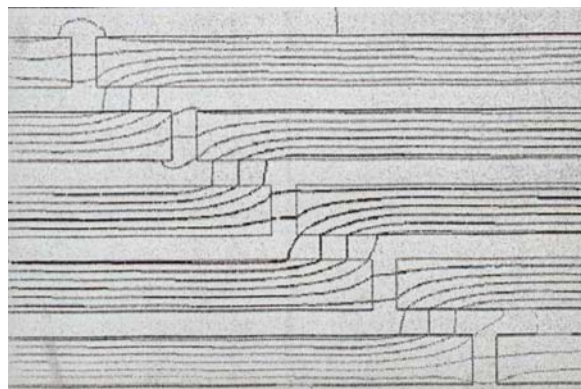


Рис. 3. Распределение магнитного потока в зоне шихтованного стыка STEP LAP пластин магнитопровода [5]

Основная часть магнитного потока переходит из листа в лист поперек направления прокатки, что еще больше увеличивает потери в стали.

Листы анизотропной ЭТС имеют магнитно-структурированный характер, что определяет их различные магнитные свойства в различных направлениях в плоскости листа [8, 9]: в направлении прокатки магнитное сопротивление меньше, поперек прокатки – существенно больше, что неблагоприятно сказывается на прохождении магнитного потока под углами, отличными от направления прокатки.

Косой рез в MULTI-STEP LAP магнитопроводах, с одной стороны, позволяет увеличить поперечное сечение поверхности перехода магнитного потока из стержней в яра, но с другой стороны, с уменьшением ширины пластины значительно увеличиваются удельные активные потери в стали магнитопровода [9]. На рис. 4 показаны изменения удельных потерь при резке-штамповке листов ЭТС различных толщин на полосы различных ширин. При резке-штамповке под углом (MULTI-STEP LAP) наблюдается сходная картина, когда в начале реза угла имеется наибольшее увеличение (до 100 %) удельных потерь – темная область на рис. 5,б, с их уменьшением (до 2...3 %) в продолжение реза.

Иная картина наблюдается при прямом резе листа ЭТС, см. рис. 5,а, где в объеме с деформированной сталью по длине всего реза происходит равномерное увеличение потерь на уровне 3...12 %.

Согласно [9] при резке-штамповке образуется местный наклеп, что также приводит к снижению магнитной проницаемости ЭТС. На рис. 6 представ-

лена зависимость магнитной проницаемости от ширины полосы ЭТС после повторного отжига в течении 2 часов при температуре 800 °С с целью улучшения магнитных свойств. Как видно из рисунка, с уменьшением ширины полосы в значительной мере ухудшаются магнитные свойства ЭТС.

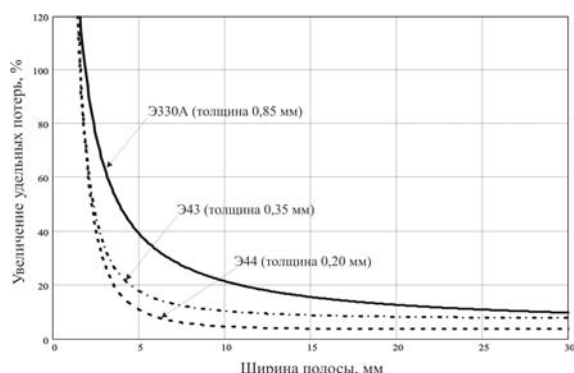


Рис. 4. Изменение удельных потерь при резке ЭТС

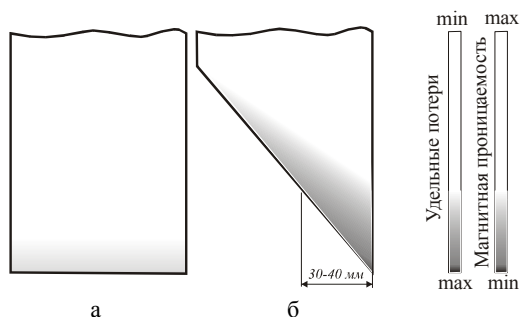


Рис. 5. Изменение удельных потерь и магнитной проницаемости при косом резе и прямом резе полосы ЭТС

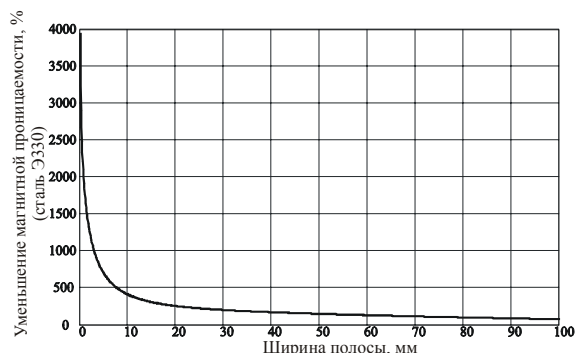


Рис. 6. Зависимость изменения магнитной проницаемости стали Э330 (3413) от ширины полосы при наклепе как результате резки-штамповки [9]

Как правило, предприятия, которые изготавливают пластины ЭТС для магнитопроводов, в послед-

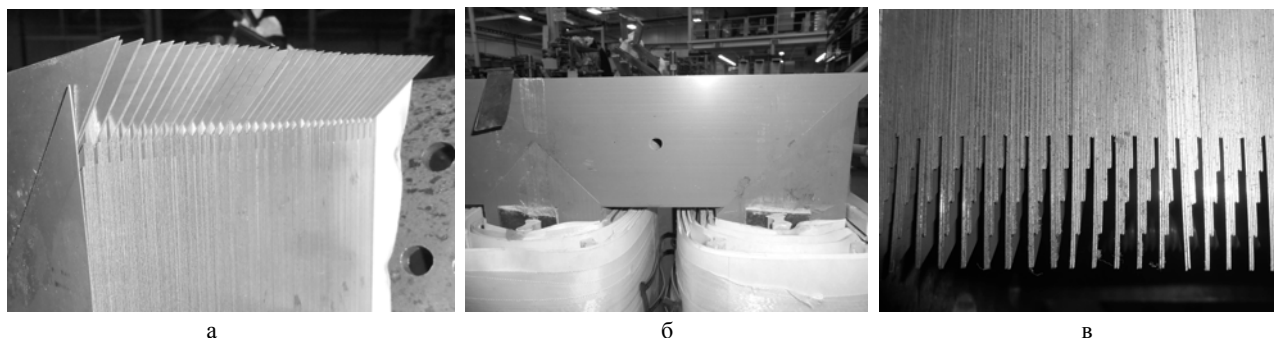


Рис. 8. Внешние виды магнитопровода трансформатора 75 кВ·А типа MULTI STEP LAP-CORE

нее время не делают нормализационного отжига нарубленных пластин, в связи с чем магнитная проницаемость стали существенно снижается [9].

Имеет место обратный эффект применения MULTI-STEP LAP магнитопроводов – вместо уменьшения потерь и улучшения условий перехода магнитного потока из стержней в ярма, происходит увеличение удельных потерь и ухудшение магнитных свойств стали. Отметим также, что объем частей магнитопровода с деформированной сталью при косом резе больше, чем при прямом резе, что также отражается на величине активных потерь в магнитопроводе.

Таким образом, все достижения применения новых видов шихтовок нивелируются побочными эффектами технологического цикла изготовления пластин ЭТС.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для определения эффективности работы различных типов шихтованных магнитопроводов были рассчитаны и построены трехфазные трансформаторы различной мощности с применением разных типов шихтованных магнитопроводов, проведены серии экспериментов с целью изучения их свойств.

При сравнительном анализе свойств магнитопроводов рис. 1,а и рис. 1,г использовались трехфазные трансформаторы одинаковой мощности, размеров и параметров. Мощность трехфазных трансформаторов составляла 75 и 300 кВ·А. На рис. 7 представлены внешние виды трансформаторов с применением MULTI-STEP LAP магнитопроводов (см. рис. 1,г).

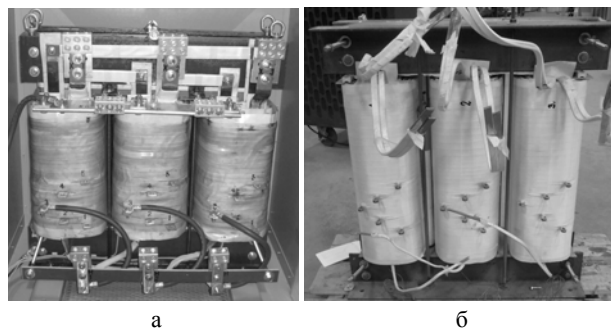


Рис. 7. Трансформаторы с MULTI-STEP LAP CORE магнитопроводами: а – трансформатор 300 кВ·А, 480/208 В; б – трансформатор 75 кВ·А, 480/208 В

На рис. 8 представлены внешние виды углов и ярем трансформатора 75 кВ·А с MULTI-STEP LAP магнитопроводом.

С использованием аналогичного типа шихтовки был построен трансформатор 300 кВ·А. Как видно из рисунка, в каждом слое использовались две одинаковые пластины при этом один ВООК (пластины которые последовательно собраны в определенной очередности с последующим повторением при построении магнитопровода) содержал 10 пластин пяти типоразмеров (пять ступеней, см. рис. 8,в).

Параметры трансформатора 75 кВ·А составляли: первичное напряжение – 480 В; первичная обмотка – 136 витков; соединение первичной обмотки – треугольник; набор пакета магнитопровода – 114 мм; ширина пластин стржня и ярма – 102 мм; высота и ширина окна магнитопровода – 490 и 95 мм; марка ЭТС – 27М4 и 35М6.

Параметры трансформатора 300 кВ·А составляли: первичное напряжение – 480 В; первичная обмотка – 41 виток; соединение первичной обмотки – треугольник; набор пакета магнитопровода – 230 мм; ширина пластин стржня и ярма – 165 мм; высота и ширина окна магнитопровода – 381 и 127 мм; марка ЭТС – 27М4.

Для сравнительной оценки свойств и характеристик магнитопроводов типа MULTI-STEP LAP и стандартного BUTT-LAP проведены серии тестов с использованием трансформаторов 75 и 300 кВ·А. Тесты заключались в подаче на первичные обмотки изменяемого напряжения с последующим измерением активных потерь и тока намагничивания трансформатора, вторичная обмотка разомкнута (опыт XX).

На рис. 9 представлены графики зависимости удельных потерь трансформаторов 75 кВ·А с магнитопроводами типа MULTI-STEP LAP, где применена сталь 27М4 (кривая 1) и стандартными BUTT-LAP (прямые стыки) магнитопроводами с применением сталей 35М6 (кривая 2) и 27М4 (кривая 3).

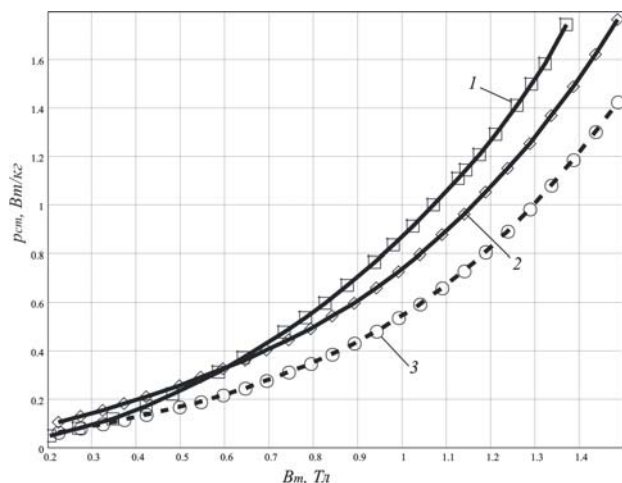


Рис. 9. Удельные активные потери трансформаторов 75 кВ·А

Согласно рис. 9 удельные потери XX в трансформаторе 75 кВ·А с применением MULTI-STEP LAP магнитопровода из ЭТС марки 27М4 больше на 40...50 % удельных потерь в аналоге, где применена стандартная BUTT-LAP конфигурация магнитопровода (см. рис. 1,а) с использованием той же марки ЭТС.

Аналогичная картина наблюдается при сравнении удельных потерь XX трансформаторов 300 кВ·А, но различие составило до 15 %.

Разный уровень удельных потерь XX в трансформаторах 75 и 300 кВ·А связан с различными геометрическими размерами и пропорциями магнитопроводов и, как следствие, различными магнитными условиями в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма (см. заштрихованные области на рис. 10).

Имеет место ситуация, где на пути магнитного потока возникают магнитные "пробки" в виде торцов пластин, с значительно ухудшенной магнитной проницаемостью, что заставляет поток переходить в параллельные пластины и, как следствие, имеем увеличение удельных потерь от вихревых токов.

Исследование зависимости потерь XX трансформаторов от объема деформированной стали и уровня потерь, вызываемых вихревыми токами, является темой для отдельной статьи и здесь не приведено.

Нормализационный отжиг позволяет снизить уровень внутренних напряжений в листах ЭТС уменьшить уровень потерь в стали [9]. Но подобный отжиг ведет к удорожанию стоимости магнитопровода и, как правило, в технологическом процессе подготовки листов ЭТС применяется редко.

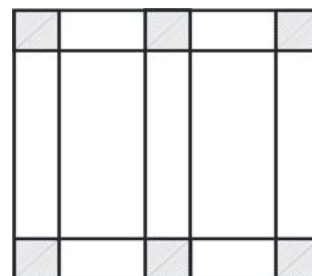


Рис. 10. Области прохождения магнитного потока из стержней в ярма

Следует отметить, что с увеличением геометрических размеров магнитопроводов влияние изменения магнитных свойств пластин магнитопровода в результате рубки-штамповки будет уменьшаться. Это подтверждает разность в удельных потерях в трансформаторах 75 и 300 кВ·А.

В данной статье были проанализированы свойства и параметры сухих трансформаторов малой и средней мощности с напряжением до 1 кВ. В сухих и масляных трансформаторах большой мощности со средним и высоким уровнем напряжения, где используются большие магнитопроводы, недостатки MULTI-STEP LAP конструкции магнитопровода могут нивелироваться, и в полной мере обеспечивать все их достоинства.

Дальнейшие исследования должны быть посвящены анализу свойств и параметров различных конфигураций витых магнитопроводов трехфазных трансформаторов.

ВЫВОДЫ

Несмотря на увеличение поверхности перехода магнитного потока из стержней в ярма при применении MULTI-STEP LAP магнитопровода трехфазного трансформатора, уровень потерь холостого хода в нем оказывается значительно большим по сравнению с аналогичным трансформатором, изготовленным с BUTT-LAP магнитопроводом. Это обусловлено тем, что при MULTI-STEP LAP шихтовке значительно возрастает

доля магнитного потока, проходящего поперек пластин.

Применение MULTI-STEP LAP магнитопровода в трансформаторах малой и средней мощности приводит к значительному увеличению потерь холостого хода (на 15...50 %), а также сопровождается технологическими отходами стали (5...7 %). Указанные недостатки не компенсируются достоинствами подобного типа магнитопроводов, такими как быстрота и удобство сборки, возможность автоматизации процесса и малого шума при работе трансформатора.

Применение нормализационного отжига листов электротехнической стали может снизить уровень потерь в стальных листах, но ожидать, что эти меры позволят уменьшить дополнительные потери в трансформаторах малой и средней мощности при использовании MULTI-STEP LAP магнитопроводов до уровня BUTT-LAP магнитопроводов не приходится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.mag-inc.com/products/powder-cores>.
2. <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Multi-Step-Lap-Core-Technical-Final.pdf>.
3. <http://dotorresg.files.wordpress.com/2011/12/4-transformer-engineering-design-and-practice-s-v-kulkarnis-a-khparde2004.pdf>.
4. <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Uncut-Toroidal-Cores-Final.pdf>.
5. http://www.academia.edu/2165784/impact_of_the_core_join_t_design_parameters_on_transformer_losses.
6. <http://www.aemcores.com.au/technology/unicore/distributed-gap-dg-cores>.
7. <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Distributed-Gap-Wound-Cores-Final.pdf>.
8. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М. : Высш. школа, 1983 – 463 с.
9. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М. : Энергия, 1974 – 240 с.

Bibliography (transliterated): 1. Available at: <http://www.mag-inc.com/products/powder-cores> (accessed 20 August 2013). 2. Available at: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Multi-Step-Lap-Core-Technical-Final.pdf> (accessed 20 August 2013). 3. Available at: <http://dotorresg.files.wordpress.com/2011/12/4-transformer-engineering-design-and-practice-s-v-kulkarnis-a-khparde2004.pdf> (accessed 20 August 2013).

4. Available at: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Uncut-Toroidal-Cores-Final.pdf> (accessed 20 August 2013).
5. Available at: http://www.academia.edu/2165784/impact_of_the_core_join_design_parameters_on_transformer_losses (accessed 20 August 2013).
6. Available at: <http://www.aemcores.com.au/technology/unicore/distributed-gap-dg-cores> (accessed 20 August 2013).
7. Available at: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Distributed-Gap-Wound-Cores-Final.pdf> (accessed 20 August 2013).
8. Matveev A.N. *Jelektrichestvo i magnetizm*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 463 p.
9. Druzhinin V.V. *Magnitnye svojstva jelektrrotehnicheskoy stali*. Moscow, Jenegija Publ., 1974. 240 p.

Поступила (received) 20.09.2013

Levin Michael I.¹, P. Engineer, Vice President, Pentegov Игорь Владимирович², д.т.н., проф., в.н.с., Рymar Сергей Владимирович², д.т.н., с.н.с., в.н.с., Lavreniuk Andrii V.¹, Ph. D., R&D engineer,

¹ Mirus International Inc.,
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6,
phone (905) 4941120, e-mail: michael@mirusinternational.com,
andrii@mirusinternational.com.

² Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,
отдел электротермии,
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11,
тел/phone +38 044 2061388, e-mail: magn@i.com.ua,
elmag@paton.kiev.ua

M.I. Levin¹, I.V. Pentegov², S.V. Rymar², A.V. Lavreniuk¹

¹ Mirus International Inc.,

31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6

² The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
11, Bozhenko Street, Kiev, 03150, Ukraine

Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs.

Analysis and research into properties and parameters of different-type laminated magnetic cores of three-phase power transformers are conducted. Most of new laminated magnetic core designs are found to have significant shortcomings resulted from design and technological features of their manufacturing. These shortcomings cause increase in ohmic loss in the magnetic core, which eliminates advantages of the new core configurations and makes them uncompetitive as compared with the classical laminated magnetic core design.

Key words – laminated magnetic core designs, three-phase power transformer, ohmic loss, efficiency.

ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

Обґрунтовано використання термінів "енергія", "активна потужність", "реактивна потужність" щодо систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і накопичувачами енергії. Представлені способи розрахунку таких систем електропостачання.

Обосновано использование терминов "энергия", "активная мощность", "реактивная мощность" применительно к системам электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. Представлены способы расчета энергетической эффективности таких систем электроснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время силовая электроника, быстрому развитию которой положили начало в конце пятидесятих годов прошлого столетия разработка и промышленное производство силовых полупроводниковых приборов, близка к зениту своих возможностей. С применением современных полупроводниковых ключей могут быть разработаны и изготовлены преобразователи электрической энергии практически с любыми требуемыми характеристиками в диапазоне номинальных мощностей от нескольких ватт до сотен мегаватт [36-41].

Многочисленные научные публикации по силовой электронике и системам электроснабжения (СЭ) с полупроводниковыми преобразователями в изданиях Украины, России, США, Европейских стран, Японии, как правило, базируются на корректном использовании принятой международными стандартами терминологии и на адекватном представлении об электромагнитных процессах в рассматриваемых системах.

К сожалению, это не всегда можно отнести к авторефератам диссертаций и к статьям в трудах конференций, условия проведения которых не предусматривают издательское рецензирование публикаций. В этих работах можно встретить нечетко сформулированные определения, неясные термины и, что особенно печально, устаревшие или вовсе неверные представления об электромагнитных процессах в системах электроснабжения. Наиболее часто недоразумения возникают, когда речь идет о передаче и накоплении энергии или о скорости обмена энергией между отдельными элементами системы электроснабжения.

Одной из причин нечетких представлений об энергии и мощности, вероятно, является отсутствие прогресса в изложении разделов "Активная, реактивная и полная мощность" и "Мгновенная мощность и колебания энергии в цепи синусоидального тока" в учебниках по ТОЭ за период с 1952 г. по настоящее время [42-45]. Последние учебники [44, 45], по сути, повторяют посылки шестидесятилетней давности [42].

В настоящей статье, которую можно считать обобщением и уточнением материалов публикаций авторов [1-18], сделана попытка изложения некоторых положений теории передачи энергии и теории мощности в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. В отличие от [44, 45] как основной вариант рассматриваются не однофазные, а трехфазные трехпроводные или четырехпроводные системы электро-

снабжения с симметричным трехфазным источником синусоидальных напряжений. Однофазные системы электроснабжения при таком подходе представляют собой частный случай асимметричной трехфазной системы с бесконечно большими сопротивлениями в двух из трех фаз нагрузки.

Положения настоящей статьи, как полагают авторы, находятся в согласии с положениями современных теорий мощности, изложенных в монографии [19] и в многочисленных журнальных публикациях, например, [20-35].

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Трехфазные СЭ с источниками синусоидальных симметричных напряжений включают семь основных элементов: генераторы электрической энергии, трансформаторы и реакторы, полупроводниковые преобразователи, фильтро-компенсирующие устройства, накопители энергии, пассивные и активные нагрузки, соединительные кабели.

Схемы соединения элементов СЭ могут быть многообразными и сложными. Тем не менее, при рассмотрении процессов обмена энергией они, как правило, могут быть приведены к простой эквивалентной трехпроводной схеме, представленной на рис. 1, или к четырехпроводной схеме, представленной на рис. 2.

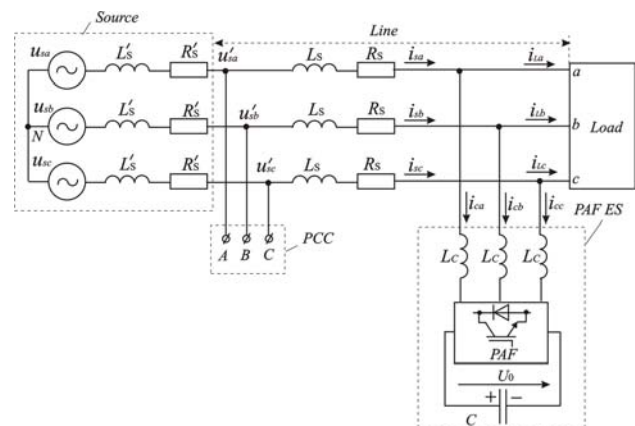


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной трехпроводной СЭ: *Source* – источник трехфазного синусоидального симметричного напряжения; *Load* – нагрузка; *Line* – линия, соединяющая источник с нагрузкой; *PAF ES* – силовой активный фильтр, совмещенный с накопителем энергии; *PCC* – общие точки подключения нагрузок

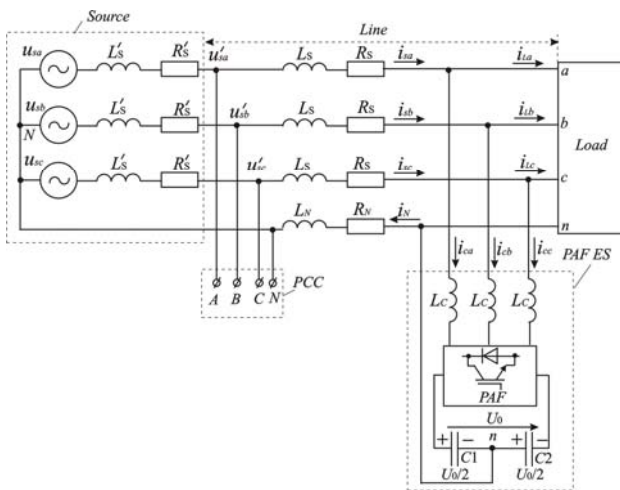


Рис. 2. Эквивалентная схема трехфазной четырехпроводной СЭ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Назначение схем СЭ заключается в передаче электрической энергии из источника в нагрузку или передаче энергии из нагрузки в источник. Внутри блока нагрузки может происходить как преобразование электрической энергии в тепловую, химическую, механическую, световую и другие виды энергии, так и обратное преобразование энергии.

Основными характеристиками СЭ являются:

- количество электрической энергии E , передаваемое за некоторый интервал времени, например, за период повторяемости, в джоулях (J);
- мгновенная и средняя за некоторый интервал времени скорости передачи энергии в ваттах (W), которые в настоящей статье будем называть соответственно мгновенной p или средней P активной мощностью;
- потери энергии в СЭ, ΔE , за рассматриваемый интервал времени;
- коэффициент полезного действия при передаче энергии, η , за любой по длительности рассматриваемый интервал времени.

Указанные выше характеристики СЭ, которые можно назвать количественными, связаны между собой следующими соотношениями:

- передаваемая энергия

$$E = \int_t^{t+T} p dt = P \cdot T, \quad (1)$$

где T – период повторяемости, p – мгновенная активная мощность;

- средняя активная мощность

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p dt; \quad (2)$$

- КПД

$$\eta = \frac{E}{E + \Delta E}, \quad (3)$$

или

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P}, \quad (4)$$

где ΔE – потери энергии, ΔP – средняя за рассматриваемый интервал времени мощность потерь энергии.

Отметим, что знак активной мощности, мгновенной или усредненной, определяет направление потока энергии: при положительной активной мощности энергия передается из источника в нагрузку, при отрицательной активной мощности направление потока энергии обратное.

При анализе энергетической эффективности СЭ, численной оценкой которой является КПД, необходимо определить условия, при выполнении которых достигается максимальный теоретически возможный КПД, а также реальный КПД, соответствующий конкретному режиму работы СЭ. Для определения этих условий достаточно оперировать понятиями, принятыми в соотношениях (1)-(4), а также параметрами схемы электроснабжения и графика мгновенной активной мощности.

Основным качественным показателем СЭ является коэффициент несинусоидальности напряжений (THD) на клеммах в точке общего соединения, PCC, (см. рис. 1, 2), величина которого определяется из соотношения

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{U_d^2 - U_1^2}}{U_1}, \quad (5)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$ – порядок гармоники напряжения, U_k – действующее значение напряжения гармоники с номером k , U_1 – действующее значение основной гармоники напряжения, U_d – действующее значение напряжения с учетом всех гармоник, и регламентируется стандартами.

Другим качественным показателем может быть величина модуля вектора мгновенной реактивной мощности, равного в трехфазной системе электроснабжения векторному произведению пространственного вектора напряжения на пространственный вектор тока. Равенство модуля вектора мгновенной реактивной мощности нулю является одним из двух условий достижения максимального КПД в СЭ.

Отметим несколько особенностей эквивалентных схем.

На характер нагрузки не накладываются какие-либо ограничения: внутри трехполосника (см. рис. 1) или четырехполосника (см. рис. 2) могут содержаться резисторы, конденсаторы, реакторы, нелинейные элементы, источники напряжения и источники тока. Период повторяемости графика мгновенной активной мощности трехфазной нагрузки в общем случае не совпадает с периодом повторяемости напряжения источника. Как правило, период повторяемости графика мгновенной активной мощности значительно, на несколько порядков, больше периода повторяемости напряжения источника

$$T \gg T_S, \quad (6)$$

где T_S – период повторяемости синусоидальных напряжений источника.

На рис. 1, 2 индуктивность L'_S и сопротивление R'_S определяются эквивалентными параметрами генератора и трансформатора источника. Индуктивность L_S и сопротивление R_S определяются параметрами кабелей, реакторов и трансформаторов, через которые передается электрическая энергия. Обычно выдерживаются неравенства

$$L_S \gg L'_S, \quad (7)$$

$$R_S \gg R'_S. \quad (8)$$

На входе блока *PAF ES*, выполняющего роль силового активного фильтра и управляемого накопителя энергии, включаются три реактора с индуктивностью L_C , величина которой обычно значительно больше индуктивности L_S :

$$L_C \gg L_S. \quad (9)$$

МОЩНОСТЬ РЕЗИСТИВНОГО К.З.

При анализе потерь энергии и КПД СЭ целесообразно ввести величину расчетной мощности резистивного короткого замыкания P_{SC} . Мощность резистивного к.з. при направлении потока энергии от источника в нагрузку, P_{SC+} , определяется в соответствии с рис. 3, а при обратном направлении потока энергии, P_{SC-} , – в соответствии с рис. 4.

Как было отмечено выше падения напряжений на омических сопротивлениях и индуктивностях линии значительно меньше напряжений источника и нагрузки. Поэтому в большинстве случаев можно принять, что

$$P_{SC+} = P_{SC-} = P_{SC}. \quad (10)$$

Величина мощности резистивного к.з., P_{SC} , определяется из соотношения [16]:

$$P_{SC} = \frac{3 \cdot U_{sm}^2}{2 \cdot (R_S + R'_S)}, \quad (11)$$

где U_{sm} – амплитуда фазного синусоидального напряжения, R_S – омическое сопротивление линии, R'_S – внутреннее омическое сопротивление источника или нагрузки.

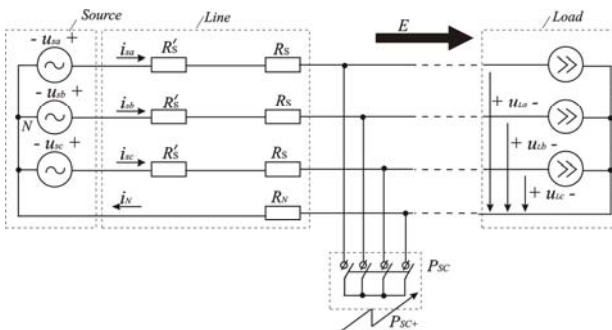


Рис. 3. Определение мощности резистивного к.з. при направлении потока энергии от источника в нагрузку

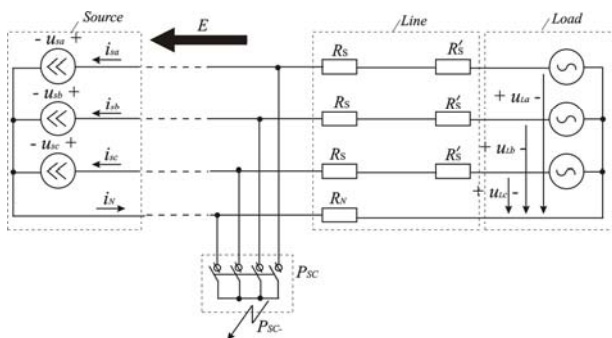


Рис. 4. Определение мощности резистивного к.з. при направлении потока энергии от нагрузки в источник

Моделирование нагрузки на рис. 3 и источника на рис. 4 источниками тока оправдано тем, что при

расчете КПД системы электроснабжения задаются временными графиками модуля пространственного вектора тока или мгновенной активной мощности и их периодом повторяемости [16]. Реализация этих графиков осуществляется с помощью замкнутой системы автоматического регулирования.

РАСЧЕТ КПД СЭ

Возможны три режима работы СЭ:

- режим 1 с однонаправленным потоком энергии от источника к нагрузке во всем периоде повторяемости при $p_s > 0, p_L > 0$;
- режим 2 с однонаправленным потоком энергии от нагрузки к источнику при $p_s < 0, p_L < 0$;
- режим 3 с двунаправленным потоком энергии, когда в периоде повторяемости интервалы времени с положительными мгновенными активными мощностями, $p_s > 0, p_L > 0$, чередуются с интервалами времени с отрицательными мгновенными активными мощностями, $p_s < 0, p_L < 0$.

Будем считать, что во всех трех указанных режимах между мгновенной активной мощностью потерь и мгновенной активной мощностью передачи энергии соблюдаются соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta p &\ll |p_S|, \\ \Delta p &\ll |p_L|. \end{aligned} \quad (12)$$

Мгновенные и средние за период повторяемости значения КПД определяются в зависимости от характера режима по следующим соотношениям.

В режиме 1

$$\eta_{1inst} = \frac{P_{L1}}{P_{S1}}, \quad (13)$$

$$P_{S1} = P_{L1} + \Delta p_1, \quad (14)$$

$$\eta_1 = \frac{\int_t^{t+T} p_{L1} dt}{\int_t^{t+T} p_{S1} dt} = \frac{T \cdot P_{L1}}{T \cdot P_{S1}} = \frac{E_{L1}}{E_{S1}} = \frac{P_{L1}}{P_{S1}}, \quad (15)$$

где T – период повторяемости графика мгновенной активной мощности, η_{1inst} и η_1 – соответственно мгновенный и средний КПД в режиме 1, P_{L1} и P_{S1} – соответственно средние за период повторяемости мощность нагрузки и средняя мощность источника.

В режиме 2

$$\eta_{2inst} = \frac{P_{S2}}{P_{L2}}, \quad (16)$$

$$-P_{L2} = -P_{S2} + \Delta p_2, \quad (17)$$

$$\eta_2 = \frac{\int_t^{t+T} p_{S2} dt}{\int_t^{t+T} p_{L2} dt} = \frac{T \cdot P_{S2}}{T \cdot P_{L2}} = \frac{E_{S2}}{E_{L2}} = \frac{P_{S2}}{P_{L2}}. \quad (18)$$

В режиме 3 КПД определяется путем разбиения графика мгновенной активной мощности на участки, в которых $p_s > 0, p_L > 0$, и участки, в которых $p_s < 0, p_L < 0$, определения двух значений КПД по соотношениям (15) и (18) и определения суммарного КПД из соотношения

$$\eta_{\Sigma 3} = \frac{E_{L31} + E_{L32}}{E_{S31} + E_{S32}}, \quad (19)$$

где

$$E_{S31} > 0, \quad E_{L31} > 0, \quad E_{S32} < 0, \quad E_{L32} < 0. \quad (20)$$

Таким образом, работа СЭ в режиме 3 характеризуется тремя значениями КПД:

КПД передачи энергии из источника в нагрузку

$$\eta_{31} = \frac{E_{L31}}{E_{S31}}. \quad (21)$$

КПД передачи энергии из нагрузки в источник

$$\eta_{32} = \frac{E_{S32}}{E_{L32}}, \quad (22)$$

и суммарным КПД, вычисляемым по (19).

Для определения зависимости между тремя величинами КПД в режиме 3 введем коэффициент возврата энергии в источник:

$$0 \leq k_E = \frac{-E_{S32}}{E_{S31}} \leq 1, \quad (23)$$

где

$$E_{S32} < 0, \quad E_{S31} > 0. \quad (24)$$

Подставив в (19) соотношения (21), (22), (23), после преобразования получим

$$\eta_{\Sigma 3} = \frac{\eta_{31} - k_E}{1 - k_E}. \quad (25)$$

В табл. 1 приведены значения суммарного КПД в режиме 3, рассчитанные для заданных значений η_{31} , η_{32} , в зависимости от коэффициента возврата энергии k_E при допущении, что

$$\eta_{31} = \eta_{32}. \quad (26)$$

По данным табл. 1 построены зависимости суммарного коэффициента полезного действия от коэффициента возврата энергии, представленные на рис. 5. Из рис. 5 видно, что даже при небольших потерях энергии в кабелях и источнике при увеличении коэффициента возврата энергии суммарный КПД резко уменьшается и при некоторых сочетаниях параметров обращается в нуль.

Таблица 1

Суммарный КПД СЭ в режиме 3

k_E	$\eta_{31} = \eta_{32}$								
	0.980	0.960	0.940	0.920	0.900	0.880	0.860	0.840	0.820
0	0.980	0.960	0.940	0.920	0.900	0.880	0.860	0.840	0.820
0.1	0.976	0.951	0.926	0.901	0.877	0.852	0.826	0.801	0.776
0.2	0.970	0.940	0.909	0.878	0.847	0.816	0.784	0.752	0.720
0.3	0.963	0.925	0.887	0.848	0.810	0.770	0.730	0.690	0.649
0.4	0.953	0.906	0.857	0.809	0.759	0.709	0.658	0.606	0.554
0.5	0.940	0.878	0.816	0.753	0.689	0.624	0.557	0.490	0.420
0.6	0.919	0.837	0.754	0.670	0.583	0.499	0.406	0.314	0.221
0.7	0.886	0.769	0.651	0.530	0.407	0.282	0.153	0.022	-
0.8	0.818	0.633	0.445	0.252	0.056	-	-	-	-
0.9	0.616	0.225	0.174	-	-	-	-	-	-

Положив в соотношении (25) $\eta_{\Sigma 3} = 0$, определим зависимость значений однонаправленных КПД, соответствующих нулевому суммарному КПД, от коэффициента возврата энергии:

$$\eta_{31} = \eta_{32} = \sqrt{k_E}. \quad (27)$$

По соотношению (27) построена зависимость, приведенная на рис. 6.

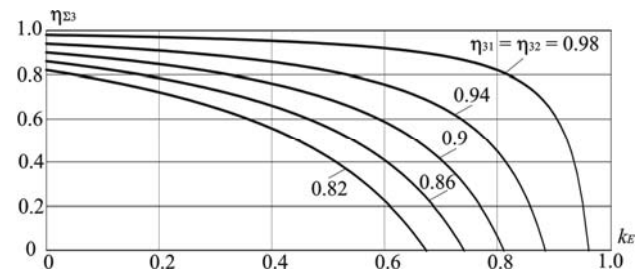


Рис. 5. Суммарный КПД СЭ в режиме 3

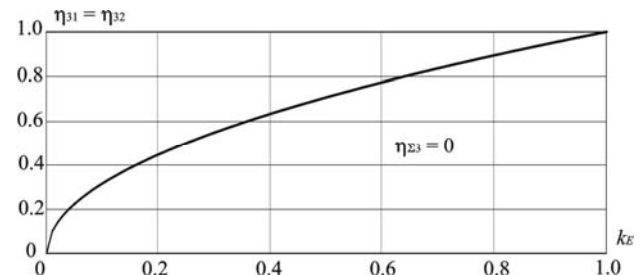


Рис. 6. Зависимость значений однонаправленных КПД СЭ, соответствующих $\eta_{\Sigma 3} = 0$

Отметим, что направление потока энергии в СЭ может быть обусловлено двумя факторами: технологией работы нагрузки, например, необходимостью рекуперативного торможения в системе электропривода, и взаимным обменом энергией между реактивными элементами в разных фазах нагрузки без обмена с питающей сетью трехфазного синусоидального напряжения. В первом случае период повторяемости процесса обмена энергией, как правило, значительно больше периода напряжения источника, а во втором реактивные элементы обмениваются между собой энергией с частотой сети. Оба фактора приводят к снижению суммарного коэффициента полезного действия.

Зависимости, представленные на рис. 5, 6 проверены в виртуальном эксперименте с использованием Matlab-модели, приведенной на рис. 7.

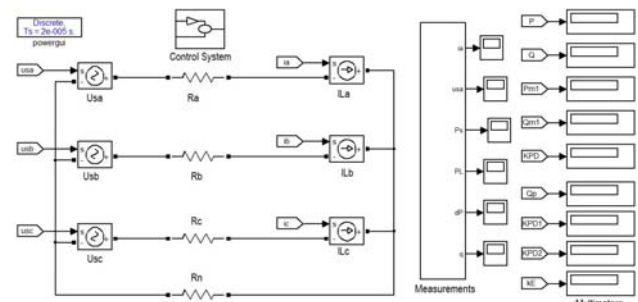


Рис. 7. Matlab-модель для проверки зависимостей на рис. 5

Matlab-модель представляет собой трехфазную четырехпроводную систему электроснабжения состоящую из трехфазного источника Usa, Usb, Usc, выполненной на регулируемых источниках тока ILa, ILb, ILc и соединительных проводов, потери в которых учитываются сопротивлениями резисторов Ra, Rb, Rc и Rn. Результаты моделирования обрабатываются в подсистеме Measurements и выводятся на цифровые осциллографы и мультиметры. Заданием графика мгновенной

активной мощности с помощью регулируемых источников тока в блоке Control System были получены данные аналогичные представленным в табл. 1, на рис. 5, 6.

МАКСИМАЛЬНЫЙ И РЕАЛЬНЫЙ КПД

В [16-18] показано, что максимальный КПД СЭ достигается в трехфазной симметричной СЭ с резистивной симметричной нагрузкой при отсутствии пульсаций мгновенной активной мощности. Численное значение максимального КПД однозначно зависит от параметра отношения мощности резистивного короткого замыкания к полезной мощности, P_{SC}/P_{usf} . В табл. 2 приведена эта зависимость, полученная в [16].

Таблица 2

Максимально возможный КПД СЭ

$\frac{P_{SC}}{P_{usf}}$	4	6	8	10	12	14	16	18
η_{max}	0.5	0.789	0.854	0.887	0.909	0.923	0.933	0.941
$\frac{P_{SC}}{P_{usf}}$	20	25	30	40	50	60	75	100
η_{max}	0.947	0.958	0.965	0.974	0.98	0.983	0.986	0.99

Реальный средний КПД, вычисленный в периоде повторяемости, всегда меньше максимального КПД вследствие пульсаций мгновенной активной мощности трехфазной системы, а также вследствие влияния следующих факторов, обуславливающих фазовый сдвиг суммарного вектора тока относительно суммарного вектора напряжения питающей сети:

- реактивной или смешанного характера нагрузки;
- несимметрии резистивной или смешанной нагрузки;

- нелинейности нагрузки;
- несинусоидальности напряжения питающей сети;
- несимметрии напряжения питающей сети.

Перечисленные выше факторы могут проявляться одновременно в разных сочетаниях. Для трехфазной четырехпроводной СЭ возможны 32 сочетания факторов [11], приведенных в табл. 3, из которых только одно сочетание, – симметричное синусоидальное напряжение и линейная резистивная симметричная нагрузка (ячейка 1.1 в табл. 3) – обеспечивает максимально возможный КПД СЭ. Все остальные сочетания соответствуют более высокому уровню потерь энергии при той же средней активной мощности СЭ, то есть – реальному КПД.

Реальный КПД СЭ можно приблизить к максимально возможному КПД путем подключения параллельно нагрузке силового активного фильтра с накопителем энергии (PAF ES). Параметры схемы и алгоритм работы PAF ES при синусоидальности и симметрии напряжений сети должны обеспечивать синусоидальную форму токов сети i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} , и их совпадение по фазе с соответствующими напряжениями. Очевидно, что потери энергии в самом PAF ES должны быть существенно меньшими величины, на которую уменьшаются потери в СЭ после подключения PAF ES.

Примеры расчета максимального и реального КПД трехфазной четырехпроводной СЭ при асимметрии и нелинейности нагрузки приведены в [17], где показано, что уменьшение реального КПД по сравнению с максимальным может превышать 10%.

Таблица 3

Сочетания параметров напряжения сети и нагрузки, от которых зависит КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения

Напряже- ние сети		Нагрузка							
		Симметричная				Несимметричная			
		Линейная		Смешанная	Нелинейная	Линейная		Нелинейная	
Резистивная	Реактивная	Резистивная	Реактивная			Смешанная			
Синусоидальное	Симметричное	$p = P = const$ $I_q = 0, I_r = 0$ $\eta = \eta_{max}$	$p = 0$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $\eta = 0$	$p = P = const$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
	Несимметричное	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
Несинусоидальное	Симметричное	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
	Несимметричное	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$

p – мгновенная активная мощность; P – средняя за период повторяемости активная мощность; p_{\sim} – переменная составляющая мгновенной активной мощности; I_q – модуль проекции пространственного вектора тока на ось q ; I_r – модуль проекции пространственного вектора тока на ось r

ОБМЕН ЭНЕРГИЕЙ, МГНОВЕННЫЕ АКТИВНАЯ И РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТИ

Как показано выше, двунаправленный обмен энергией между источником и нагрузкой приводит к значительному снижению КПД СЭ (см. рис. 5). К таким же последствиям приводит обмен энергией с участием других элементов СЭ, например, батарей конденсаторов или батарей реакторов.

Здесь важно отметить, что в трехфазной системе электроснабжения адекватную картину электромагнитных процессов можно получить, учитывая одновременно все три фазных тока и все три фазных напряжения.

В качестве примера рассмотрим трехфазные симметричные сети с линейной нагрузкой [3], представленные на рис. 8.

Трехфазную нагрузку и трехфазный источник рассматриваем как единое устройство.

В соответствии с [1, 3, 9] определяем пространственные векторы напряжения и тока в трехмерной декартовой системе координат как

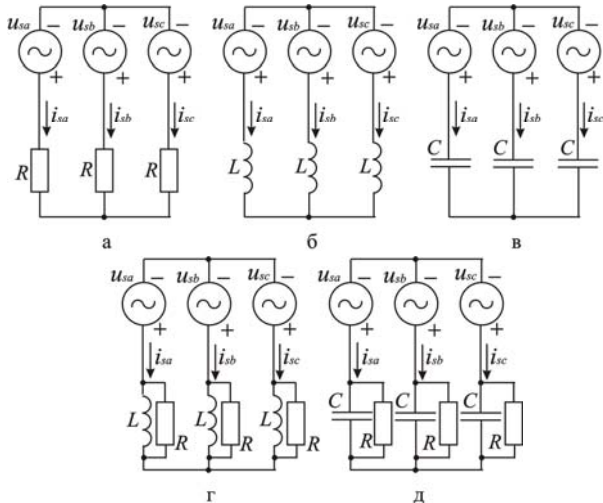


Рис. 8. Трехфазные симметричные сети с линейной нагрузкой

$$\vec{u}_S = [u_{sa} \quad u_{sb} \quad u_{sc}]^T, \quad (28)$$

$$\vec{i}_S = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T, \quad (29)$$

где u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} – соответственно проекции обобщенного вектора напряжения \vec{u}_S на оси a, b, c неподвижной декартовой системы координат;

$$\begin{aligned} u_{sa} &= U_m \cdot \sin \vartheta, \\ u_{sb} &= U_m \cdot \sin \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right), \\ u_{sc} &= U_m \cdot \sin \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} \right); \end{aligned} \quad (30)$$

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – соответственно проекции пространственного вектора тока на оси a, b, c , численно равные мгновенным фазным токам

$$\begin{aligned} i_{sa} &= I_m \cdot \sin(\varphi - \vartheta), \\ i_{sb} &= I_m \cdot \sin \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} - \varphi \right), \\ i_{sc} &= I_m \cdot \sin \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} - \varphi \right), \end{aligned} \quad (31)$$

где U_m, I_m – соответственно амплитуды фазных напряжений и фазных токов; φ – угол сдвига между фазным напряжением и фазным током, численно равный углу между пространственными векторами \vec{u}_S и \vec{i}_S ;

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot t, \quad (32)$$

где f – частота сети, t – время.

Мгновенная активная мощность источника трехфазной системы определяется как скалярное произведение пространственных векторов [1, 3, 9]

$$p = \vec{u}_S \cdot \vec{i}_S = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}_S| \cdot \cos \varphi = u_{sa} \cdot i_{sa} + u_{sb} \cdot i_{sb} + u_{sc} \cdot i_{sc}. \quad (33)$$

Если трехфазная система электроснабжения симметрична, то мгновенная активная мощность в любой момент времени равна средней активной мощности:

$$p = P = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos \varphi = \text{const}. \quad (34)$$

Мгновенная реактивная мощность является расчетной векторной величиной и определяется как векторное произведение пространственных векторов напряжения и тока [1, 3, 9, 19, 20]:

$$\vec{q} = \vec{u}_S \times \vec{i}_S = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_{sc} & i_{sa} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_{sa} & i_{sb} \end{bmatrix}^T. \quad (35)$$

Модуль вектора мгновенной реактивной мощности симметричной системы:

$$q = |\vec{q}| = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot |\sin \varphi| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} = \text{const}. \quad (36)$$

В трехфазной СЭ с резистивной нагрузкой (см. рис. 8,а) энергия передается из источника в нагрузку с постоянной скоростью, пульсации мгновенной активной мощности отсутствуют, модуль вектора мгновенной реактивной мощности равен нулю.

При чисто реактивной нагрузке (см. рис. 8,б-в) мгновенная активная мощность источника равна нулю, что следует из соотношений (33), (34). Косвенным подтверждением этого является неизменное во времени суммарное значение энергии, накопленной в трехфазном реакторе (рис. 8,б)

$$E_{L\Sigma} = \frac{L}{2} \cdot (i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2) = \frac{3}{4} \cdot L \cdot I_m^2 = \text{const}, \quad (37)$$

и неизменность суммарной энергии, накопленной в трехфазной батарее конденсаторов (рис. 8,в)

$$E_{C\Sigma} = \frac{C}{2} \cdot (u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2) = \frac{3}{4} \cdot C \cdot U_m^2 = \text{const}. \quad (38)$$

При смешанной нагрузке (см. рис. 8,г-д) схему СЭ можно разбить на две параллельно работающие СЭ, одна из которых имеет чисто активную нагрузку, а другая – чисто реактивную, т.е. случай активно-реактивной нагрузки сводится к ранее рассмотренным.

Отметим два принципиальных отличия между трехфазной и однофазной СЭ:

- при чисто активной симметричной нагрузке скорость передачи энергии, – мгновенная активная мощность, – трехфазной СЭ постоянна. В однофазной СЭ скорость передачи энергии пульсирует с двойной частотой сети, причем амплитуда переменной составляющей активной мощности равна удвоенному значению средней активной мощности;

- при чисто реактивной нагрузке в трехфазной симметричной СЭ отсутствует обмен энергией между источником и нагрузкой, поскольку в любой момент времени мгновенная активная мощность трехфазного источника тождественно равна нулю. Три фазных реактора или три конденсатора обмениваются энергией между собой таким образом, что суммарная энергия, запасенная в трех фазах реактивной нагрузки, остается постоянной во времени. В однофазной СЭ при чисто реактивной нагрузке происходит обмен энергией между источником и нагрузкой, мгновенная активная мощность изменяется по закону $\sin^2 \vartheta$, средняя активная мощность за период напряжения сети равна нулю.

Отмеченные особенности трехфазных и однофазных СЭ свидетельствуют об энергетической неконку-

рентоспособности однофазной системы, которая, по сути, представляет собой трехфазную систему с двумя оборванными фазами. Понятно, что при рассмотрении процессов обмена энергией в трехфазной СЭ не могут служить эталоном процессы в однофазной СЭ, наоборот – недостатки однофазной системы проявляются при ее сравнении с трехфазной системой как эталоном.

ПУЛЬСАЦИИ МГНОВЕННОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Симметричная трехфазная СЭ с синусоидальными напряжениями источника при полной компенсации реактивных токов представляется эквивалентной схемой, приведенной на рис. 9 [6, 7].

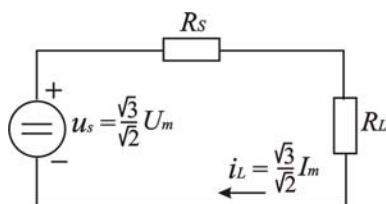


Рис. 9. Эквивалентная схема СЭ при полной компенсации реактивной мощности: U_m – амплитуда фазного синусоидального напряжения источника; I_m – амплитуда фазного синусоидального тока источника; u_s – модуль пространственного вектора напряжения; i_L – модуль пространственного вектора тока

Полная компенсация реактивных токов и, следовательно, реактивной мощности является необходимым, но недостаточным условием минимизации мощности потерь энергии в СЭ. Причиной увеличения потерь могут быть пульсации мгновенной активной мощности нагрузки. Частота таких пульсаций зависит от характера нагрузки. Например, в коммунальных системах электроснабжения мгновенная активная мощность имеет переменную составляющую с суточной частотой, на которую накладываются пульсации с частотой подключения и отключения нагрузок. График мгновенной активной мощности промышленных предприятий имеет составляющие с частотой в несколько герц, а график СЭ метрополитена – составляющие с частотой в несколько минут.

В [6-8] показано, что степень уменьшения КПД вследствие пульсаций мгновенной активной мощности зависит от параметра отношения мощности резистивного к.з. к полезной мощности, и от формы графика активной мощности и не зависит от частоты пульсаций.

В [7] получена зависимость КПД (η) от отношения P_{K3}/P_{usf} и относительной амплитуды синусоидальной переменной составляющей активной мощности $\Delta_1 = P_{Lmax}/P_{usf}$, приведенная на рис. 10.

Как видно из рис. 10 переменная синусоидальная составляющая мгновенной активной мощности с амплитудой, равной средней за период повторяемости графика мощности, приводит к снижению КПД на 4.5 % при $P_{K3}/P_{usf} = 15$, на 3% при $P_{K3}/P_{usf} = 20$ и на 1 % при $P_{K3}/P_{usf} = 50$. При наложении двух или трех пульсаций мгновенной активной мощности КПД может снизиться еще примерно на 1 % [7].

На Matlab-модели по рис. 7 были рассчитаны: относительная средняя реактивная мощность Q^* , относительное действующее значение реактивной мощ-

ности Q_{δ^*} , а также относительные амплитуды основных гармоник мгновенных активной P_{1m^*} и реактивной мощностей Q_{1m^*} . В качестве базисной величины была выбрана средняя активная мощность, вычисляемая в периоде повторяемости, значение которой подерживалось неизменным

$$P_{base} = P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p dt = \text{const} . \quad (39)$$

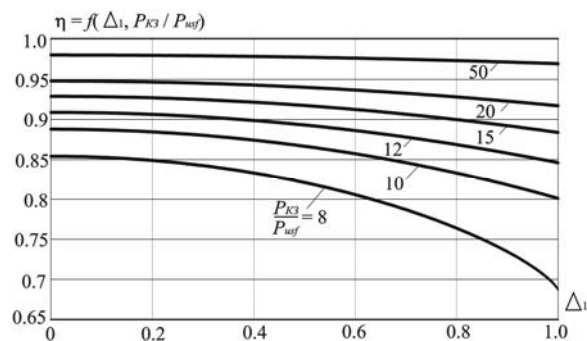


Рис. 10. Снижение КПД при наличии пульсаций мгновенной активной мощности

Расчет проводился для трех факторов возникновения мгновенной реактивной мощности: наличие угла сдвига между фазными напряжениями и токами, асимметрии резистивной нагрузки и наличия гармоник в кривых токов. Учет указанных факторов возможен при использовании соотношений (30), а также

$$\begin{aligned} i_a &= I_{ma} \cdot \sin(\vartheta + \varphi_a) + \\ &+ \sum_{n_1} \left(\frac{k_1 \cdot I_{ma}}{n_1} \cdot \sin(n_1 \cdot (\vartheta + \varphi_a)) \right) + \\ &+ \sum_{n_2} \left(\frac{k_2 \cdot I_{ma}}{n_2} \cdot \sin(n_2 \cdot (\vartheta + \varphi_a)) \right), \\ i_b &= I_{mb} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right) + \\ &+ \sum_{n_1} \left(\frac{k_1 \cdot I_{mb}}{n_1} \cdot \sin\left(n_1 \cdot \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right)\right) \right) + \\ &+ \sum_{n_2} \left(\frac{k_2 \cdot I_{mb}}{n_2} \cdot \sin\left(n_2 \cdot \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right)\right) \right), \\ i_c &= I_{mc} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right) + \\ &+ \sum_{n_1} \left(\frac{k_1 \cdot I_{mc}}{n_1} \cdot \sin\left(n_1 \cdot \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right)\right) \right) + \\ &+ \sum_{n_2} \left(\frac{k_2 \cdot I_{mc}}{n_2} \cdot \sin\left(n_2 \cdot \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right)\right) \right); \end{aligned} \quad (40)$$

где k_1, k_2 – амплитудные коэффициенты; $n_1 = 2, 4, 6, \dots, n_{1n}$.

В табл. 4 представлен расчет указанных выше величин при уменьшении КПД системы электроснабжения на 1 % от максимального $\eta_{max} = 0.947$, соответствующего $P_{K3}/P_{usf} = 20$.

На рис. 11 представлены зависимости действующего значения реактивной мощности Q_{δ^*} от величины уменьшения КПД $-\Delta\eta$ (при $\eta_{max} = 0.947$) для трех фак-

торов возникновения мгновенной реактивной мощности: одинакового для трех фаз фазового сдвига между напряжениями и токами (кривая 1), асимметрии резистивной нагрузки (кривая 2) и наличия нечетных гармоник в кривых токов (кривая 3). Несовпадение трех кривых указы-

вает на разную величину реактивной мощности при введении одного из трех факторов, и тем самым подтверждает тезис о том, что модуль вектора реактивной мощности является расчетной величиной и не определяет количественные характеристики энергообмена в СЭ.

Таблица 4

Расчет средней и действующей реактивной мощности при снижении КПД на 1% от $\eta_{max} = 0.947$

Ф-р	I_{ma}	I_{mb}	I_{mc}	Φ_a	Φ_b	Φ_c	k_1	k_2	n_{1n}	n_{2n}	P_{1m*}	Q_{1m*}	Q^*	Q_a^*
1	1.0108	1.0108	1.0108	0.518	0	0	0	0	-	-	0.178	0.198	0.24	0.278
	1.0162	1.0162	1.0162	0.54	$\pi/36$	0	0	0	-	-	0.18	0.204	0.261	0.298
	1.0131	1.0131	1.0131	0.523	0	$\pi/36$	0	0	-	-	0.162	0.175	0.264	0.292
	1.0202	1.0202	1.0202	0.545	$\pi/20$	0	0	0	-	-	0.179	0.194	0.281	0.313
	1.0154	1.0154	1.0154	0.519	0	$\pi/20$	0	0	-	-	0.15	0.149	0.284	0.303
	1.0192	1.0192	1.0192	0.549	$\pi/36$	$\pi/36$	0	0	-	-	0.161	0.184	0.286	0.314
	1.0211	1.0211	1.0211	0.545	$\pi/18$	0	0	0	-	-	0.179	0.19	0.286	0.316
	1.016	1.016	1.016	0.517	0	$\pi/18$	0	0	-	-	0.148	0.143	0.289	0.306
	1.0228	1.0228	1.0228	0.541	$\pi/15$	0	0	0	-	-	0.177	0.181	0.296	0.322
	1.0173	1.0173	1.0173	0.51	0	$\pi/15$	0	0	-	-	0.143	0.128	0.298	0.312
	1.0249	1.0249	1.0249	0.528	$\pi/12$	0	0	0	-	-	0.172	0.163	0.31	0.331
	1.0194	1.0194	1.0194	0.497	0	$\pi/12$	0	0	-	-	0.139	0.109	0.31	0.32
	1.0273	1.0273	1.0273	0.559	$\pi/20$	$\pi/20$	0	0	-	-	0.141	0.16	0.326	0.345
	1.0294	1.0294	1.0294	0.559	$\pi/18$	$\pi/18$	0	0	-	-	0.136	0.152	0.336	0.353
	1.0338	1.0338	1.0338	0.557	$\pi/15$	$\pi/15$	0	0	-	-	0.123	0.137	0.356	0.369
1.0405	1.0405	1.0405	0.545	$\pi/12$	$\pi/12$	0	0	-	-	0.101	0.111	0.384	0.392	
1.054	1.054	1.054	0.41	0.41	0.41	0	0	-	-	0	0	0.435	0.435	
2	1.274	1	0.6255	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.078	0.23	0.239
	1.321	0.9	0.679	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.082	0.23	0.238
	1.342	0.8	0.758	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.099	0.223	0.238
	1.33	0.7	0.87	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.087	0.228	0.238
	1.224	0.6	1.076	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.089	0.227	0.239
3	0.967	0.967	0.967	0	0	0	0.615	0	20	-	0.148	0.037	0.356	0.366
	0.967	0.967	0.967	0	0	0	0	0.561	-	21	0.032	0.025	0.247	0.257

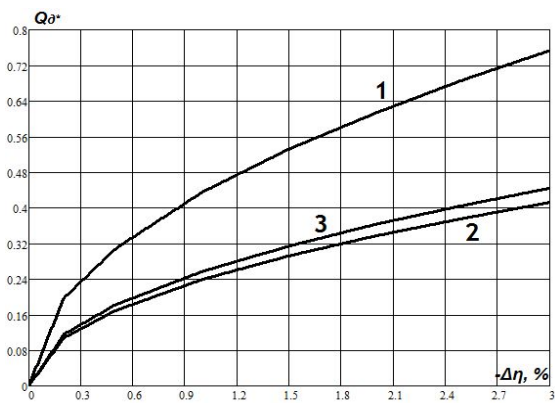


Рис. 11. Зависимости $Q_{d*} = f(-\Delta\eta)$ при $\eta_{max} = 0.947$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ pqr ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ВЕКТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Пространственные векторы напряжений, токов и реактивных мощностей элементов СЭ могут быть представлены в одной из пяти пространственных систем координат [15]. Наиболее удобным и отвечающим характеру электромагнитных процессов в системе электроснабжения является представление указанных векторов во вращающейся системе координат pqr. В системе pqr в любой момент времени ось r направлена по пространственному вектору напряжения. Поэтому проекция пространственного вектора тока на ось r соответствует активной составляющей тока, пропорциональной скорости передачи энергии

$$p = \vec{u} \cdot \vec{i} = |\vec{u}| \cdot |\vec{i}| \cdot \cos \varphi = |\vec{u}| \cdot |\vec{i}_p|, \quad (41)$$

где

$$|\vec{i}_p| = |\vec{i}| \cdot \cos \varphi, \quad (42)$$

Проекция пространственного вектора тока на оси q и r, определяющие величины двух реактивных токов, i_q, i_r , позволяют произвести декомпозицию реактивного тока на два ортогональных тока.

Преобразование координат пространственного вектора напряжения из abc в pqr имеет вид [15]:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (43)$$

где

$$a_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2, \quad (44)$$

$$a_{12} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2, \quad (45)$$

$$a_{13} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2, \quad (46)$$

$$a_{21} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1, \quad (47)$$

$$a_{22} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (48)$$

$$a_{23} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (49)$$

$$a_{31} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2, \quad (50)$$

$$a_{32} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2, \quad (51)$$

$$a_{33} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2, \quad (52)$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3} \cdot u_a}, \quad (53)$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}}, \quad (54)$$

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (u_a + u_b + u_c), \quad (55)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}, \quad (56)$$

$$u_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_a - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot u_b - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot u_c, \quad (57)$$

$$u_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot u_b - \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot u_c. \quad (58)$$

В системе координат pqr мгновенная активная мощность

$$p = \vec{u}_{pqr} \cdot \vec{i}_{pqr} = u_p \cdot i_p, \quad (59)$$

где u_p – модуль пространственного вектора напряжения; i_p – проекция пространственного вектора тока на ось p .

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Для работы силовых активных фильтров и активных выпрямителей, силовые схемы которых совпадают, принципиально не нужен накопитель энергии. Емкость конденсатора на выходе САФ (см. рис. 1, 2) выбирается из условия допустимого уровня пульсаций напряжения, обычно это несколько процентов от номинального значения. Энергия, запасенная в конденсаторе при работе схемы, практически остается постоянной.

Тем не менее в СЭ, работающих в режиме 3 с интервалами времени, в которых изменяется направление потока энергии, конденсатор силового активного фильтра увеличенной емкости может быть использован как накопитель рекуперированной энергии. Для этого САФ необходимо подключить непосредственно на зажимы переменного тока нагрузки, исключив потери в линии, соединяющей источник и нагрузку. Эффект подключения накопителя энергии обусловлен уменьшением потерь в эквивалентных резисторах R_S и R'_S . Очевидно, что такое уменьшение потерь должно превосходить по величине дополнительные потери энергии в самом САФ.

В качестве примера оценки эффективности использования энергоемкого накопителя можно рассмотреть систему электроснабжения метрополитена [46]. Традиционно СЭ украинских метрополитенов обеспечивает тягу электропоездов на постоянном токе

напряжением 825 В. Контактная сеть постоянного тока, получает питание от тяговых подстанций, где установлены неуправляемые выпрямители. При традиционной СЭ при передаче энергии в нагрузку происходят ее потери в устройствах тяговой подстанции, контактной сети, элементах электропривода. Кинетическая энергия, запасенная подвижным составом при разгоне, отправляется в тормозные резисторы при торможении электропоезда. Односторонний поток энергии традиционной СЭ метрополитена представлен на рис. 12 под цифрой (1). Принципиально, энергетическая эффективность описанной системы электроснабжения будет невелика. Возможность осуществить рекуперацию запасенной кинетической энергии в сеть, позволит повысить энергетическую эффективность СЭ, но может сказаться на надежности ее работы. Схема потоков энергии СЭ с рекуперацией представлена на рис. 12 под цифрой (2).

Использование энергоемких накопителей энергии позволяет увеличить энергоэффективность СЭ подвижного состава метрополитена при высоком уровне надежности электроснабжения. При этом возможны два варианта установки накопителя энергии – на тяговой подстанции и на борту электропоезда. Энергетические потоки, описывающие указанные системы электроснабжения, представлены на рис. 12 под цифрами (3) и (4) соответственно. Отдельно можно выделить бесконтактную СЭ с бортовым накопителем энергии, подзарядка которого осуществляется во время стоянки электропоезда на станции. Схема потоков энергии бесконтактной СЭ представлена на рис. 12 под цифрой (5).

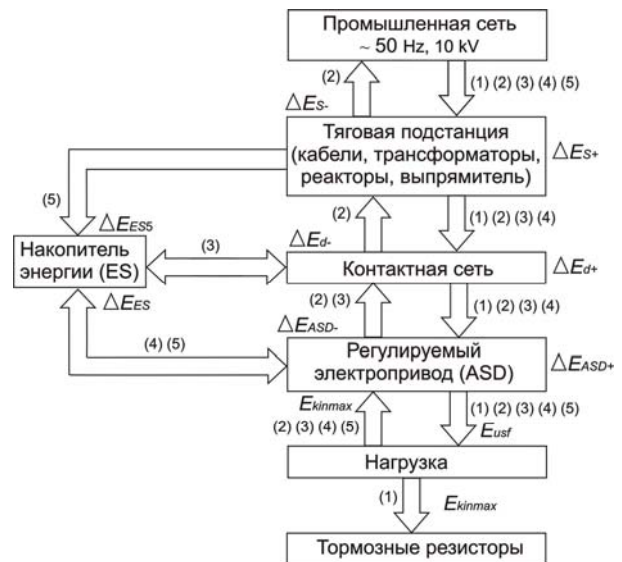


Рис. 12. Схема распределения потоков энергии пяти СЭ подвижного состава метрополитена

Примем, что полезная энергия нагрузки складывается из максимума кинетической энергии, а также энергии, затрачиваемой на работу электротехнического оборудования подвижного состава, преодоления сопротивления воздуха в туннеле и трения колес

$$E_{usf} = E_{kinmax} + E_{move}. \quad (60)$$

Если известны потери энергии в прямом потоке на всех элементах традиционной СЭ:

$$\Delta E_1 = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} = \Delta E_{1+}, \quad (61)$$

где ΔE_{S+} , ΔE_{d+} , ΔE_{ASD+} – соответственно потери энергии в тяговой подстанции (трансформаторах, ректорах, выпрямителе и соединительных кабелях), контактной сети и элементах электропривода при потоке энергии из сети в нагрузку, то можно рассчитать коэффициенты полезного действия для пяти представленных СЭ воспользовавшись соотношениями (19), (22), (23).

Соответственно принятым на рис. 12 обозначениям

$$E_{L31} = E_{usf}, \quad (62)$$

$$E_{L32} = E_{kin\max}, \quad (63)$$

$$E_{S31} = E_{usf} + \Delta E_{n+}, \quad (64)$$

$$E_{S32} = E_{kin\max} - \Delta E_{n-}, \quad (65)$$

где ΔE_{n+} , ΔE_{n-} – соответственно потери энергии в прямом и обратном потоке; n – номер системы электроснабжения.

Подставляя (60), (62-65) в (19) получим соотношение для расчета суммарного КПД систем электроснабжения подвижного состава метрополитена

$$\eta_{\Sigma 3n} = \frac{E_{move}}{E_{move} + \Delta E_{n+} + \Delta E_{n-}}. \quad (66)$$

Если принять, что величина энергии E_{move} неизменна во времени, то КПД системы электроснабжения будет зависеть от потерь энергии в двунаправленном потоке.

Для традиционной СЭ потери энергии в обратном потоке численно равны максимуму кинетической энергии

$$\Delta E_{1-} = E_{kin\max}. \quad (67)$$

Для СЭ с рекуперацией энергии в сеть потери энергии в прямом потоке равны потерям энергии традиционной СЭ. Потери энергии в обратном потоке:

$$\Delta E_{2-} = \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{S-}. \quad (68)$$

Входящие в соотношение (59) составляющие могут быть найдены из рис. 12

$$\Delta E_{ASD-} = \Delta E_{ASD+} \cdot \frac{E_{kin\max}}{E_{usf}}, \quad (69)$$

$$\Delta E_{d-} = \Delta E_{d+} \cdot \frac{E_{kin\max} - \Delta E_{ASD-}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+}}, \quad (70)$$

$$\Delta E_{S-} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{kin\max} - \Delta E_{ASD-} - \Delta E_{d-}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}. \quad (71)$$

В соответствии с рис. 12 потери энергии в СЭ со стационарным накопителем в прямом и обратном потоке:

$$\Delta E_{3+} = \Delta E_{S3+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+}, \quad (72)$$

$$\Delta E_{3-} = \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{d-}, \quad (73)$$

где

$$\Delta E_{S3+} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}} + \frac{\Delta E_{3-} - \Delta E_{ES}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}, \quad (74)$$

ΔE_{ES} – потери энергии в накопителе.

Потери энергии в СЭ с бортовым размещением накопителя:

$$\Delta E_{4+} = \Delta E_{S4+} + \Delta E_{d4+} + \Delta E_{ASD+}, \quad (75)$$

$$\Delta E_{4-} = \Delta E_{ASD-}, \quad (76)$$

где

$$\Delta E_{d4+} = \Delta E_{d+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+}} + \frac{\Delta E_{ASD-} - \Delta E_{ES}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+}}, \quad (77)$$

$$\Delta E_{S4+} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d4+}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}} + \frac{\Delta E_{ASD-} - \Delta E_{ES}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}. \quad (78)$$

Потери энергии в бесконтактной СЭ:

$$\Delta E_{5+} = \Delta E_{S5+} + \Delta E_{ES5+} + \Delta E_{ASD+}, \quad (79)$$

$$\Delta E_{5-} = \Delta E_{ASD-}, \quad (80)$$

где

$$\Delta E_{S5+} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+}}{E_{usf} + \Delta E_{1+}} + \frac{\Delta E_{ASD-} - \Delta E_{ES5}}{E_{usf} + \Delta E_{1+}}, \quad (81)$$

ΔE_{ES5} – потери энергии в накопителе бесконтактной СЭ.

С использованием соотношений (21)-(23), (66)-(81) были рассчитаны КПД и коэффициент возврата энергии для пяти систем электроснабжения подвижного состава метрополитена. В качестве базисной величины был выбран максимум кинетической энергии $E_{base} = E_{kin\max} = 1$. Остальные исходные данные: $E_{move} = 0.3$, $\Delta E_{S+*} = 0.065$, $\Delta E_{d+*} = 0.13$, $\Delta E_{ASD+*} = 0.07$, $\Delta E_{ES*} = 0.01$, $\Delta E_{ES5*} = 0.02$. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

При сопоставлении данных табл. 5 видно, что при использовании стационарного накопителя энергии, размещенного на территории тяговой подстанции, суммарная энергия, потребляемая из сети, сокращается в 2.3 раза при уменьшении суммарных потерь в 3.3 раза. При переходе на СЭ с бортовым накопителем поток энергии, потребляемой из сети, сокращается более чем в три раза при снижении потерь энергии в 4.6-7.8 раза.

Отметим, что энергетические характеристики систем электроснабжения метрополитена получены с учетом потоков энергии и потерь энергии в интервалах повторяемости с использованием понятия только активной мощности.

Таблица 5

Показатели энергетической эффективности пяти систем электроснабжения подвижного состава метрополитена

Номер схемы СЭ	СЭ 1	СЭ 2	СЭ 3	СЭ 4	СЭ 5
Суммарная энергия, потребляемая из сети, E_{S*}	1.565	0.744	0.681	0.496	0.462
Положительный поток энергии, E_{+*}	1.565	1.565	1.527	1.432	1.408
Отрицательный поток энергии, E_{-*}	0	-0.821	-0.846	-0.936	-0.946
Потери энергии в положительном потоке, ΔE_{+*}	0.265	0.265	0.227	0.132	0.108
Потери энергии в отрицательном потоке, ΔE_{-*}	1	0.179	0.154	0.064	0.054
Суммарные потери энергии, $\Delta E_{\Sigma*}$	1.265	0.444	0.381	0.196	0.162
КПД при закачке энергии в нагрузку, η_{31}	0.831	0.831	0.851	0.908	0.923
КПД при отборе энергии нагрузки, η_{32}	0	0.821	0.846	0.936	0.946
Суммарный КПД, $\eta_{\Sigma 3}$	0.192	0.403	0.441	0.605	0.649
Коэффициент возврата энергии, k_E	0	0.524	0.554	0.654	0.672

ВЫВОДЫ

1. Электромагнитные процессы в трехфазных СЭ с синусоидальными симметричными напряжениями источника адекватно описываются пространственными векторами напряжений и токов в неподвижной системе координат abc или в одной из вращающейся пространственной систем координат, например, pqr . Переход из одной системы координат в другую осуществляется с помощью матрицы прямых и обратных преобразований координат. Однофазную СЭ следует рассматривать как частный случай трехфазной при бесконечно больших сопротивлениях в двух фазах нагрузки.

2. Мгновенная скорость передачи энергии элементами СЭ, равна мгновенной активной мощности, определяемой как скалярное произведение пространственных векторов напряжения и тока.

3. Средняя скорость передачи энергии за некоторый промежуток времени, например за период повторяемости процессов, определяется как интеграл от мгновенной активной мощности в заданном интервале времени.

4. Вектор мгновенной реактивной мощности определяется как векторное произведение пространственного вектора напряжения и пространственного вектора тока. Вектор мгновенной реактивной мощности является расчетной величиной, он не определяет величину или скорость обмена энергией элементов схемы СЭ.

5. Количественной оценкой энергетической эффективности СЭ является ее КПД, который может рассчитываться в периоде повторяемости или в любом другом интервале времени, в том числе, в стремящемся к нулю.

6. В СЭ, которые могут быть приведены к эквивалентной схеме, состоящей из источника, нагрузки и резистивной линии их соединяющей, теоретический максимальный КПД однозначно определяется отношением мощности резистивного к.з. источника и линии к полезной мощности, равной средней активной мощности нагрузки за период повторяемости. Условиями достижения максимального КПД являются: равенство нулю мгновенной реактивной мощности в любой точке оси времени и отсутствие пульсаций мгновенной активной мощности в любом интервале времени.

7. В системе координат pqr пространственный вектор напряжения направлен по оси p . В этом случае условие максимума КПД выполняется, если проекция вектора тока на ось p не изменяется во времени, а проекции вектора тока на оси q и r тождественно равны нулю.

8. Вследствие нарушения условий максимального КПД, указанных в п. 7 выводов, реальный КПД может быть значительно меньше максимально возможного.

9. Повышение КПД, т.е. приближение его к максимально возможному значению, может быть достигнуто путем подключения параллельно нагрузке силового активного фильтра с накопителем энергии, который обеспечивает симметрию и синусоидальность токов трехфазного источника, и, одновременно, отсутствие пульсаций мгновенной активной мощности источника. Эффект повышения КПД достигается, если потери энергии в силовом активном фильтре и накопителе энергии существенно меньше величины разности потерь энергии в источнике и линии после подключения и до подключения силового активного фильтра.

10. Трехфазные симметричные линейные реактивные нагрузки, такие как трехфазные блоки реакторов или трехфазные блоки конденсаторов, будучи

подключенными к трехфазному источнику симметричных синусоидальных напряжений, не обмениваются с этим источником энергией, так как суммарная энергия трех реакторов или трех конденсаторов остается неизменной во времени, а мгновенная активная мощность источника равна нулю во всем интервале повторяемости. Обмен энергией между реактивной нагрузкой и сетью возможен при асимметричной реактивной нагрузке.

11. КПД системы электроснабжения, в которой интервалы времени с передачей энергии из источника в нагрузку чередуются с интервалами времени с обратным потоком энергии, резко снижается при увеличении коэффициента возврата энергии. Эффект снижения КПД существенно ослабляется путем подключения параллельно нагрузке накопителя энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Сокол Е.И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч.1. – С. 80-91.
2. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе p - q - r теории мощности. // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч.6. – С. 69-74.
3. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – 2004. – № 43. – С. 135-141.
4. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г. Определение мгновенных активных и реактивных мощностей в трехфазных электрических сетях с вентильными преобразователями // *Вісник приазовського державного технічного університету*. – 2005. – №15. – С. 70-74.
5. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Преобразование координат в электроприводе и силовой электронике // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч.1. – С. 81-88.
6. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч.6. – С. 36-41.
7. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2006. – Ч.4. – С. 22-27.
8. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – № 1. – С. 52-57.
9. Жемеров Г.Г., Сокол Е.И., Ильина Н.А., Ильина О.В. О понятиях "мгновенная активная мощность" и "мгновенная реактивная мощность" // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2007. – Ч.1. – С. 33-44.
10. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Накопители энергии компенсаторов пульсаций мгновенной активной мощности // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2007. – Ч.3. – С. 23-28.
11. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – №6. – С. 63-65.
12. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности // *Електричество*. – 2008. – №1. – С. 54-59.

13. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч.4. – С. 31-36.
14. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Тугай Д.В. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая электроника та энергоэффективність". – 2008. – Ч.2. – С. 80-87.
15. Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю., Ильина О.В. Соотношения для преобразований координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие. – НТУ "ХПИ", Харьков, 2009. – 40 с.
16. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД систем электроснабжения постоянно напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч.2. – С. 107-118.
17. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая электроника та энергоэффективність". – 2010. – Ч.1. – С. 22-31.
18. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Ковальчук О.И. КПД системы электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая электроника та энергоэффективність". – 2010. – Ч.2. – С. 7-15.
19. H. Akagi, E.H. Vatanabe, M. Aredes "Instantaneous power theory and applications to power conditioning" IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007, 379 p.
20. H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae "Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits." – Int. Power Electronics Conf., Tokio, Japan, 1983, p.p. 1375-1386.
21. H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components" IEEE Trans. Ind.Applicat., vol. 20, p.p. 625-630, May/June, 1984.
22. H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nubae "Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters" IEEE Trans. Ind.Applicat., vol. 26, p.p. 93-98, Feb., 1990.
23. A. Nubae, T. Tanake "A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits" IEEE/PES Winder Meeting, Paper 96, WM227-9PWRD, 1996.
24. F.Z. Peng, J.S. Lai "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems" IEEE Trans. Instrum.Meas., vol. 45, no 1, p.p. 293-297, 1996.
25. H.S.Kim, H.Akagi "The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems" In Proc. PCC'97 Conf.vol1, Nagaoka, Japan, Aug. 1997, pp.361-366.
26. F.Z. Peng, G.W. Ott, D.J. Adams "Harmonic and reactive power compensation based on mapping matrices in three-phase four-wire systems" IEEE Trans. Power Electronics, vol. 13, no 1, p.p. 305-312, 1998.
27. H.S. Kim, S. Ogasawara, H. Akagi "The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach" In. Proc. IEEE/IAS'99 Aunu.Meeting.Oct. 1999 p.p. 431-439.
28. H.S. Kim, H. Akagi "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames" In. Proc. IEEE/PEDS'99 Conf., Hong Kong, July, 1999, p.p. 422-427.
29. V. Soares, P. Verdelho, G.D. Marques "An instantaneous active and reactive current component method for active filters" IEEE Trans. Power Electr., vol. 15, p.p. 660-669, July, 2000.
30. H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi "Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory" IEEE Trans. Power Electronics, vol. 17, no. 5, p.p. 701-710, 2002.
31. H. Kim, S. Lee, and S. Sul "Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of the pqr power theory" In Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exp. (APEC 2004), vol. 3, p.p. 1452-1457.
32. F. Ng, M. Vong, and Y. Han "Analysis and control of UPQS and its DC-link power by use of p-q-r instantaneous power theory" In Proc. 1st Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl., 2004, p.p. 43-53.
33. S. Lee, H. Kim, S. Sul, and F. Blaabjerg "A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory" IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 3, p.p. 814-827, May 2004.
34. M. Depenbrock, V. Staudt, and H. Wrede "Concerning instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory" IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 4, p.p. 1151-1152, Jul. 1004.
35. M. Aredes, H. Akagi, E.H. Watanabe, E.V. Salgado, L.F. Encarnacao "Comparisons between the p-q and p-q-r theories in three-phase four-wire systems" IEEE Trans. on PE, vol. 24, no. 4, 2009, p.p. 924-933.
36. Ion Baldea "Control systems in adjustable-speed drivers" IEEE, Industrial Electronics magazine, September, 2008, p.p. 32-50.
37. Zhe Chen, Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines" IEEE Trans. on PE, vol. 24, no. 8, 2009, p.p. 1859-1875.
38. Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezana "PWM regenerative rectifiers: State of the art" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 52, no. 1, 2005, p.p. 5-22.
39. Ajit Kumar Chattopadhyay "Alternating current drives in the steel industry. Advancements in the last 30 years" IEEE, Industrial Electronics magazine, December, 2010, p.p. 30-42.
40. Jose Rodrigues, Jih-Shen Lai, Fang Zheng Peng "Multilevel inverters: A survey of topologies, control and application" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, 2002, p.p. 725-738.
41. Samir Kouro, Wariusz Malinowski, K. Gopakumar, Jose Rodrigues, Marcelo A. Perer, Jose I. Leon "Recent advances an industrial applications of multilevel converters" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 17, no. 8, 2010, p.p. 2553-2580.
42. Основы электроники. Под ред. Круга К.А., Госэнергоиздат, 1952. – 432 с.
43. Нейман Л.Р., Калантаров П.А. Теоретические основы электротехники. Ч. II. – М.-Л. : Госэнергоиздат 1959. – 444 с.
44. Нейман Л.Р., Демирчан П.О. Теоретические основы электротехники. Т.1. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 522 с.
45. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. – СПб. : Питер, 2009. – 512 с.
46. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – № 1. – С. 41-49.

Bibliography (transliterated): J. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Krylov D.S., Sokol E.I. Modern theories of power and their use in power electronics converter systems. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2004, Part 1, pp. 80-91. 2. Zhemerov G.G., Krylov D.S., Tugaj D.V. The system components of the full power and energy coefficients based on pqr theory of power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2004, Part 6, pp. 69-74. 3. Zhemerov G.G., Tugaj D.V. Instantaneous and average active and reactive power in linear circuits with sinusoidal voltages. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2004, no.43, pp. 135-141. 4. Domnin I.F., Zhemerov G.G. Instant definition of active and reactive power in three-phase networks with the converter. *Visnik priazov's'kogo derzhavnogo tehnichnogo universitetu*, Mariupol, 2005, no.15, pp. 70-74. 5. Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Coordinate transformation in the electric drive and power electronics. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2006, Part 1, pp. 81-88. 6. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Compensation ripple instantaneous real power in circuits with resistive load. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2006, Part 6, pp. 36-41. 7. Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Energy-saving effect of compensation ripple instantaneous real power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2006, Part 4, pp. 22-27. 8. Zhemerov G.G., Domnin I.F., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Energy efficiency correction phase current ripple compensation and active and reactive power in a three phase power supply system. *Technical electro-*

dynamics, 2007, no.1, pp. 52-57. **9.** Zhemerov G.G., Sokol E.I., Il'ina N.A., Il'ina O.V. The concepts of "instantaneous active power" and "instantaneous reactive power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2007, Part 1, pp. 33-44. **10.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V. Energy storage expansion joints pulsations instantaneous real power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2007, Part 3, pp. 23-28. **11.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V. The theory of power Friese and modern theories of power. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 63-65. **12.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V. Calculation of parameters of capacitive energy storage pulsation instantaneous real power. *Electrical engineering*, 2008, no.1, pp. 54-59. **13.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V. The relationship between the modulus of the instantaneous reactive power and efficiency of the electricity system. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2008, Part 4, pp. 31-36. **14.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Reducing waste and improving the quality of electric energy in your Utility power systems. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2008, Part 2, pp. 80-87. **15.** Zhemerov G.G., Kolesnik V.Ju., Il'ina O.V. Relations for the coordinate transformations of generalized vectors of voltages and currents of three-phase power supply system. *Reference manual*. Kharkov, NTU "HPI" Publ., 2009. 40 p. **16.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I., Sokol E.I. Efficiency of DC power supply systems and symmetrical three-phase system of sinusoidal voltages. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2010, Part 2, pp. 107-118. **17.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I., Sokol E.I. Efficiency three-phase four-wire power supply system with an asymmetric load. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2010, Part 1, pp. 22-31. **18.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I. Efficiency of single-phase AC power system voltage rectangular and sinusoidal. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2010, Part 2, pp. 7-15. **19.** Akagi H., Vatanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007. 379 p. **20.** Akagi H., Kanazava Y., Nubae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits. *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, 1983, pp. 1375-1386. **21.** Akagi H., Kanazava Y., Nubae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, 1984, vol.20, pp. 625-630. **22.** Akagi H., Tsukamoto Y., Nubae A. Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters. *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, 1990, vol.26, pp. 93-98. **23.** Nubae A., Tanake T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. *IEEE/PES Winter Meeting*, Paper 96, WM227-9PWRD, 1996. **24.** Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Trans. Instrum.Meas.*, 1996, vol.45, no.1, pp. 293-297. **25.** Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems. *In Proc. PCC'97 Conf.*, Nagaoka, 1997, vol.1, pp. 361-366. **26.** Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonic and reactive power compensation based on mapping matrices in three-phase four-wire systems. *IEEE Trans. Power Electronics*, 1998, vol.13, no.1, pp. 305-312. **27.** Kim H.S., Ogasawara S., Akagi H. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach. *In Proc. IEEE/IAS'99 Annu. Meeting*, 1999, pp. 431-439. **28.** Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. *In Proc. IEEE/PEDS'99 Conf.*, Hong Kong, 1999, pp. 422-427. **29.** Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters. *IEEE Trans. Power Electr.*, 2000, vol.15, pp. 660-669. **30.** Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi I. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2002, vol.17, no.5, pp. 701-710. **31.** Kim H., Lee S., Sul S. Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of the p-q-r power theory. *In Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exp. (APEC 2004)*, vol.3, pp. 1452-1457. **32.** Ng F., Vong M., Han Y. Analysis and control of UPQS and its DC-link power by use of p-q-r instantaneous power theory. *In Proc. 1st Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl.*, 2004, pp. 43-53. **33.** Lee S., Kim H., Sul S., Blaabjerg F. A novel control algorithm for static series compensators by use of P-Q-R instantaneous power theory. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, vol.19, no.3, pp. 814-827. **34.** Depenbrock M., Staudt V., Wrede H. Concerning instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, vol.19, no.4, pp. 1151-1152. **35.** Aredes M., Akagi H., Watanabe E.H., Salgado E.V., Encarnacao L.F. Comparisons between the p-q and

p-q-r theories in three-phase four-wire systems. *IEEE Trans. on PE*, 2009, vol.24, no.4, pp. 924-933. **36.** Baldea I. Control systems in adjustable-speed drivers. *IEEE, Industrial Electronics magazine*, September, 2008, pp. 32-50. **37.** Chen Z., Guerro J.M., Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Trans. on PE*, 2009, vol.24, no.8, pp. 1859-1875. **38.** Rodriguer J.R., Dixon J.W., Espinoza J.R., Pontt J., Lezana P. PWM regenerative rectifiers: *State of the art*. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2005, vol.52, no.1, pp. 5-22. **39.** Chattopadhyay A.K. Alternating current drives in the steel industry. *Advancements in the last 30 years*. *IEEE, Industrial Electronics magazine*, December, 2010, pp. 30-42. **40.** Rodrigues J., Jih-Shen Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, control and application. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2002, vol.49, no.4, pp. 725-738. **41.** Kouro S., Malinowski W., Gopakumar K., Rodrigues J., Perer M.A., Leon J.I. Resent advances an industrial applications of multilevel converters. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2010, vol.17, no.8, pp. 2553-2580. **42.** *Osnovy jelektroniki*. Pod red. Kruga K.A., Moscow, Gosjenergoizdat Publ., 1952. 432 p. **43.** Nejman L.R., Kalantarov P.A. *Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki*. Part II. Moscow-Leningrad, Gosjenergoizdat Publ., 1959. 444 p. **44.** Nejman L.R., Demirchan P.O. *Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki*. Vol.1. Moscow-Leningrad, Jenergija Publ., 1966. 522 p. **45.** Demirchan K.S., Nejman L.R., Korovkin N.V. *Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki*. Vol.1. St.Petersburg, Piter Publ., 2009. 512 p. **46.** Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I. Subway power systems with modern semiconductor converters and energy storage devices. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 41-49.

Поступила (received) 09.09.2013

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,
Тугай Дмитрий Васильевич², к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076312, e-mail: zhemerov@gmail.com
²Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
кафедра "Теоретическая и общая электротехника",
61002, г. Харьков, ул. Революции, 12,
тел./phone: +38 057 7073111, e-mail: tugaydv@yandex.ru

G.G. Zhemerov¹, D.V. Tugay²

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

²O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Energy and power in power supply systems with semiconductor converters and energy storage.

Use of the terms "energy", "active power", "reactive power" for power supply systems with semiconductor converters and energy storage is substantiated. Techniques for calculating energy efficiency of these systems are presented.

Key words – energy, active power, reactive power, efficiency, energy storage.

ЗАКОНИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МЕРЕЖ

Розрахунки струмів електричної мережі можна виконувати за чотирма системами законів: за законами Кірхгофа – при обмеженні струмів електричними параметрами та постійній чи змінній топології мережі; за законами "альфа" та "бета" – при обмеженні струмів пропускними здатностями гілок.

Расчеты токов электрической сети можно выполнять по четырем системам законов: по законам Кирхгофа – при ограничении токов электрическими параметрами и постоянной или переменной топологии; по законам "альфа" и "бета" – при ограничении токов пропускными возможностями ветвей.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні фахові довідники та підручники звичайно обмежуються описом законів Кірхгофа і не розглядають напрямки з новими можливостями аналізу електротехнічних мереж. Вони також не наводять особливості застосування закону електромагнітної індукції на макроскопічному рівні.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У фахових виданнях з електротехніки звичайно відсутня інформація про закони для аналізу електричних схем зі змінною структурою [1] та для аналізу мереж з потоками (струмів, потужностей, інформатики, нафти, товарів тощо) [2, 7], а закон Фарадея описується формулою $e = -d\Phi/dt$ (тут Φ – магнітний потік контуру, t – час) без згадування про перетинання магнітних силових ліній [6].

Метою статті є розгляд особливостей застосування законів для аналізу електричних мереж та закону електромагнітної індукції на макроскопічному рівні.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Закони Кірхгофа для схем зі змінною структурою. Загальноприйняті *математичні записи* законів Кірхгофа не відповідають у повній мірі їх *лінгвістичній формі*, бо у них не відображено поняття "замкнена гілка" та "замкнений контур". Відповідно відсутні математичні дії, які вводять у систему рівнянь або вилучають з неї ті гілки та контури, які виникають та зникають (наприклад, у вентильних перетворювачах) [1]. Наприклад, для трьох паралельних гілок, які мають замкнені комутатори, потрібно скласти одне рівняння для струмів у вузлі та два рівняння для контурів. Якщо розмикається один з комутаторів, то можна скласти лише одне рівняння.

Ця проблема розв'язується введенням перемикаючих функцій, які уперше застосував німецький вчений В. Шиллінг у 1933 р. для опису роботи автономних інверторів [9]. В роботі [1] було запропоновано у законах Кірхгофа *разом* використати відомі поняття складної гілки, складного контуру та перемикаючих функцій, що дало змогу аналізувати роботу *будь-яких ВП та складних мереж з ВП* (складна гілка вміщує хоча б один контур; складний контур має хоча б одну складну гілку):

1. *Для з'єднаних у вершині простих та складних гілок алгебраїчна сума добутоків струмів гілок (чи похідних від струмів по часу) на їх перемикаючі функції дорівнює нулю* (ці рівняння складаються для $(n-1)$ вершин)

$$\sum f_{ij} i_{ij} = 0, \quad \sum f_{ij} di_{ij} / dt = 0, \quad (1)$$

де f_{ij} – перемикаюча функція, яка приймає значення "1", якщо гілка увімкнена, та "0", якщо вимкнена

(увімкнення – вимкнення контролюється у динаміці по стану півпровідникових приладів та при зміні напрямків струмів); $i = 1, 2, \dots, n$ – порядковий номер вершини; $j = 1, 2, \dots, n$ – порядкові номери сусідніх вершин при $i \neq j$; n – кількість вершин; i_{ij} – струм між вершинами; t – час.

2. *Алгебраїчна сума падінь напруг вздовж замкненого простого чи складного контуру, помножена на перемикаючу функцію цього контуру, дорівнює нулю* (згідно цьому закону складаються $[m-(n-1)]$ рівнянь, де m – кількість гілок)

$$f_K \sum u_{ij} = 0, \quad (2)$$

де f_K – перемикаюча функція контуру, яка дорівнює добутку перемикаючих функцій простих чи складних гілок, що створюють даний контур.

Математична модель для аналізу роботи схеми рис. 1 у режимі безперервного струму за методом складання матричного рівняння незмінного порядку [1] на основі законів (1) та (2) має вигляд:

$$\frac{di_d}{dt} - \frac{P_1 di_{1A}}{dt} - \frac{P_2 di_{2A}}{dt} - \frac{P_3 di_{3A}}{dt} = 0;$$

$$P_1 e_1 - L_1 \frac{di_{1A}}{dt} - P_1 (R_1 + R_P) i_{1A} - P_1 u_d = 0;$$

$$P_2 e_2 - L_2 \frac{di_{2A}}{dt} - P_2 (R_2 + R_P) i_{2A} - P_2 u_d = 0;$$

$$P_3 e_3 - L_3 \frac{di_{3A}}{dt} - P_3 (R_3 + R_P) i_{1A} - P_3 u_d = 0,$$

де $u_d = e_d + L_d \frac{di_d}{dt} + R_d i_d$; $j = 1, 2, 3$ – порядковий номер фази; e_j, E_m – ЕРС j -ої фази та її амплітуда; ω – циклічна частота; t – час; i_{jA}, L_j, R_j – струм фази при відкритому діоді, індуктивність та активний опір j -ої фази; R_P – активний опір відкритого діоду; i_d, e_d, L_d, R_d – струм, ЕРС, індуктивність та активний опір кола випрямленого струму.

Перемикаючі функції діодів визначаються за логічними умовами

$$P_j = 0; \text{ if } (i_{jA} > 0) \text{ or } (i_{jN} > 0) \text{ then } P_j = 1,$$

$$\text{де } i_{jN} = \frac{1 - P_j}{R_j + R_N} (e_j - u_d); R_N - \text{опір закритого діоду.}$$

Перехідні процеси при увімкненні схеми (рис. 1) у роботу наведені на рис. 2.

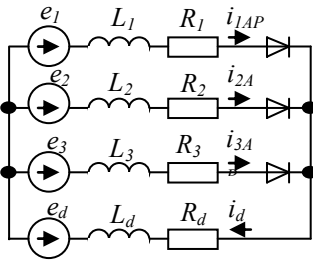


Рис. 1. Трьохфазний однопівперіодний випрямляч на діодах

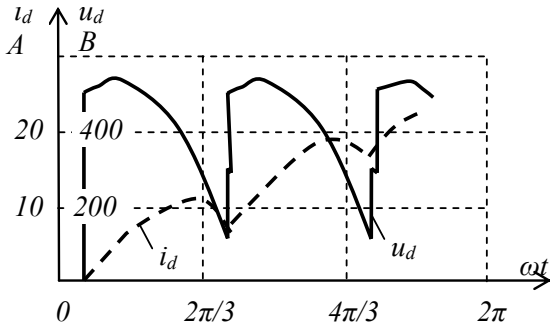


Рис. 2. Перехідні процеси при увімкненні випрямляча (рис. 1)

Параметри схеми (рис. 1) є такими:

$e_j = 523\sin(\omega t - \Psi_j) + 24\sin(5\omega t - 5\Psi_j - \pi/2) + 22\sin(7\omega t - 7\Psi_j - \pi/6)$;
 $\Psi_j = 2\pi(j-1)/3$; $R_j = R = 0,0108$ Ом; $R_p = 0,002$ Ом; $R_N = 10^5$ Ом; $\omega = 314$ с⁻¹; $L_j = L = 0,000195$ Гн; $E_d = 300$ В; $R_d = 0,018$ Ом; $L_d = 0,0761$ Гн; $\Delta t = 0,0000(5)$ с.

Закони "альфа" та "бета" для аналізу мереж з потоками. Закони Кірхгофа *не урахують пропускні здатності гілок* і тому звичайно *аналіз мереж з потоками* (струмів, електричних потужностей, інформації, нафти і т.д.) виконується за методами математичного програмування з курсу "Дослідження операцій", в тому числі на основі теореми Форда-Фалкерсона та удосконалення їх метода поміток при застосуванні теорії графів [5, 8]. Між тим при проектуванні, перевантаженні, при планових ремонтах та аваріях електроенергетичних мереж виникає потреба визначення величини та розподілу по гілках мережі максимального потоку струмів або потужностей між заданими вершинами з урахуванням пропускних здатностей гілок.

Граф із заданими пропускними здатностями по потоках (нафти, газу тощо), як електричну мережу з її аналізом на базі законів Кірхгофа, був уперше розглянутий у роботі [7] для визначення максимального потоку мережі та його розподілу по гілках. В роботі [3] був продовжений цей напрямок і було запропоновано аналізувати *електричні мережі* на основі трьох систем законів: законів Кірхгофа, законів "альфа" та законів "бета". Всі ці три системи законів дають *різні числові значення* для струмів мережі; вони мають різні математичні моделі і пояснюють роботу мережі з різних сторін.

Мережу з максимальним потоком " $Q_m=19$ ", рис. 3,а та з пропускною здатністю гілок S_{ij} можна замінити схемою заміщення рис. 3,б при введенні в кожен гілку "активного опору" $R_{ij}=1/S_{ij}$ [3, 7].

"Падіння тиску" потоку на "опорі" R_{ij} , дорівнює

$$u_{ij} = u_i - u_j = q_{ij} R_{ij} = q_{ij} / S_{ij},$$

де u_i, u_j - "тиски" вершин i та j ; бажано, щоб $u_{ij} = q_{ij}/S_{ij} \leq 1$.

Вершини неорієнтованої мережі рис. 3 нумеруємо від входу (початкова цифра 1) до виходу (кінцева цифра 6), а позитивне спрямування потоків гілок приймаємо від вершини з меншим номером до вершини з більшим номером. В такій мережі лише потоки вхідних або вихідних гілок є невід'ємними, а потоки інших гілок можуть змінювати позитивний напрямок на негативний.

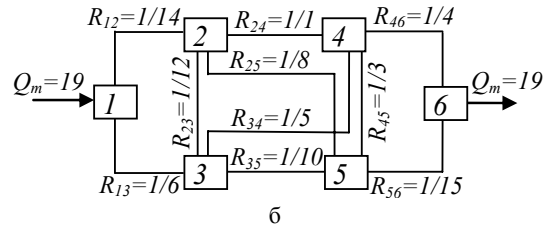
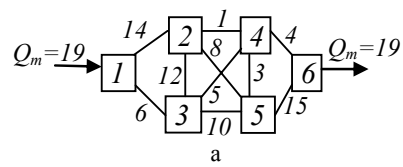


Рис. 3. Електроенергетична мережа з максимальним потоком $Q_m = 19$

Закони "альфа" є перефразованими законами Кірхгофа (1) та (2), які застосовуються до електричної схеми, у якій усі електричні параметри гілки замінені "активними опорами" пропускної здатності R_{ij} , а струми замінені на потоки струмів чи потужностей q_{ij} . Звичайно за законами "альфа" розподіл максимального потоку відбувається з отриманням перевантажених та недовантажених гілок. Тому у діалоговому режимі перевантажена гілка замінюється за законами "бета" на "джерело припустимого потоку" із заміною відповідного математичного рівняння, отриманого за законами "альфа", на вираз $q_{\beta ij} = S_{ij}$ за законами "бета". Потім виконується новий розрахунок потоків $q_{\beta i}$ для підтвердження відсутності перевантажених гілок. Розподілів потоків за законами β при відсутності перевантажених гілок може бути нескінченна кількість.

Закони для потоків β ("бета") дозволяють створити математичну модель, яка точно відтворює розподіл потоків по гілках мережі згідно методу поміток Форда-Фалкерсона, і мають вигляд:

1. Алгебраїчна сума потоків β у вершинах дорівнює нулю. Тобто цей закон є однаковим для потоків α та β , але їх кількість для потоків β може бути меншою за $(n-1)$, і деякі з них можуть бути замінені на джерело потоку або підсумок потоків сінчення мережі. Закони "бета" можуть складатись: лише з рівнянь для потоків в усіх вузлах (не для електричних мереж: в транспортній задачі, в матриці Леонт'єва по міжгалузевому балансу товарів); з рівнянь потоків для частки вузлів та/або джерел струмів для ряду гілок.

2. Отримані при максимальному потоці згідно законів "альфа" вирази *для контурів*, які мають перевантажені гілки, замінюються виразами на основі наведених нижче законів "бета":

- рівняння для контуру з перевантаженою (i, j) - гілкою замінюється рівнянням джерела потоку, рівному пропускній здатності гілки

$$q_{\beta ij} = S_{ij}; \quad (3)$$

- для цілком завантажених до пропускної здатності гілок алгебраїчна сума падінь тисків потоків β вздовж не замкнутого реального чи умовного контуру дорівнює сумі відповідних знакозмінних одиниць перевантажених гілок ("умовність контуру" означає, що ряд гілок "контур" не розглядається)

$$\sum \left[\pm \frac{q_{\beta ij}}{S_{ij}} \right] = \sum \pm 1_{ij}, \quad (4)$$

де знак одиниці " $\pm 1_{ij}$ " залежить від напрямку обходу реального чи умовного (не замкнутого) "контур";

• рівняння для контуру по потоках "альфа" можна замінити рівнянням джерела потоку по законах "бета" зі значенням змінної розрахованій по законах "альфа" величині недовантаженого потоку

$$q_{bij} = q_{\alpha ij} \quad (5)$$

Закони "бета" підтверджуються отриманням математичних моделей, які є тотожними з результатами розрахунків за методом поміток Форда-Фалкерсона.

Аналіз розподілу максимального потоку по гілках схеми рис. 3 на основі законів α ("альфа") та β ("бета"). Згідно законів "альфа" для $(n - 1)$ вузлів рис. 3, б складаємо п'ять рівнянь для потоків α (вузли 1-5):

$$\begin{aligned} q_{12} + q_{13} &= 19; \\ q_{12} - q_{24} - q_{25} - q_{23} &= 0; \quad q_{13} + q_{23} - q_{34} - q_{35} &= 0; \quad (6) \\ q_{24} + q_{34} - q_{45} - q_{46} &= 0; \quad q_{25} + q_{35} + q_{45} - q_{56} &= 0. \end{aligned}$$

Згідно другого закону складаємо систему рівнянь для контурів з потоками α :

Результати розв'язання системи рівнянь (6), (7) для потоків α

Змінні (потоки)	q_{12}	q_{13}	q_{23}	q_{24}	q_{25}	q_{34}	q_{35}	q_{45}	q_{46}	q_{56}
Пропускна здатність	14	6	12	1	8	5	10	3	4	15
Розв'язок	12,1	6,88	3,37	0,939	7,81	3,29	6,96	0,112	4,12	14,88

Таблиця 2

Результати розв'язання системи рівнянь для потоків β

Змінні (потоки)	q_{12}	q_{13}	q_{23}	q_{24}	q_{25}	q_{34}	q_{35}	q_{45}	q_{46}	q_{56}
Пропускна здатність	14	6	12	1	8	5	10	3	4	15
Розв'язок	13	6	5	0	8	4	7	0	4	15

до однієї мережі; переналаджена електрична мережа по результатах аналізу за законами "альфа" та "бета" потребує перевірки за законами Кірхгофа; математична

$$\begin{aligned} -\frac{q_{34}}{5} - \frac{q_{45}}{3} + \frac{q_{35}}{10} &= 0; \quad -\frac{q_{46}}{4} + \frac{q_{56}}{15} + \frac{q_{45}}{3} &= 0; \\ -\frac{q_{23}}{12} - \frac{q_{35}}{10} + \frac{q_{25}}{8} &= 0; \quad -\frac{q_{24}}{1} - \frac{q_{45}}{3} + \frac{q_{25}}{8} &= 0; \quad (7) \\ -\frac{q_{12}}{14} - \frac{q_{23}}{12} + \frac{q_{13}}{6} &= 0. \end{aligned}$$

Результати розв'язку системи рівнянь (6), (7) в MathCAD для потоків α представлено в табл. 1. При заміні рівнянь для контурів (7) на $q_{13}=6$; $q_{46}=4$; $q_{25}=8$; $q_{24}=0$; $q_{45}=0$ отримуємо данні табл. 2 для потоків β .

Закони "альфа" та "бета" [3] виокремленні від законів Кірхгофа з методологічної точки зору: закони "бета" можуть прямо суперечити законам Кірхгофа (падіння тиску вздовж замкненого контуру не дорівнює нулю; може не співпадати кількість рівнянь для потоків у вузлах; система рівнянь взагалі може складатись лише з рівнянь для потоків у вузлах); не забороняється одночасне застосування законів Кірхгофа, "альфа" та "бета"

Таблиця 1

модель за законами "бета" отримується з математичної моделі за законами "альфа"; фізична основа законів "альфа" та "бета" не є електротехнічною.

Визначення величини та розподілу максимального потоку по гілках мережі в MathCAD. Аналіз мережі виконується в MathCAD на основі моделі (6) для потоків в вузлах з урахуванням нерівностей лише по позитивних пропускних здатностях гілок (рис. 4).

ORIGIN:=1

$F1 := (q_{12}, q_{13}, q_{23}, q_{24}, q_{25}, q_{34}, q_{35}, q_{45}, q_{46}, q_{56}) := q_{12} + q_{13}$

$q_{12} := 0 \quad q_{13} := 0 \quad q_{23} := 0 \quad q_{24} := 0 \quad q_{25} := 0 \quad q_{34} := 0 \quad q_{35} := 0 \quad q_{45} := 0 \quad q_{46} := 0 \quad q_{56} := 0$

Given

$q_{12} - q_{24} - q_{25} - q_{23} = 0 \quad q_{13} + q_{23} - q_{34} - q_{35} = 0 \quad q_{24} + q_{34} - q_{45} - q_{46} = 0$

$q_{25} + q_{35} + q_{45} - q_{56} = 0 \quad q_{12} + q_{13} - q_{46} - q_{56} = 0$

$q_{12} \leq 14 \quad q_{13} \leq 6 \quad q_{23} \leq 12 \quad q_{24} \leq 1 \quad q_{25} \leq 8 \quad q_{34} \leq 5 \quad q_{35} \leq 10 \quad q_{45} \leq 3 \quad q_{46} \leq 4 \quad q_{56} \leq 15$

$P := \text{Maximize}(F1, q_{12}, q_{13}, q_{23}, q_{24}, q_{25}, q_{34}, q_{35}, q_{45}, q_{46}, q_{56}) ;$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P^T =$	q_{12}	q_{13}	q_{23}	q_{24}	q_{25}	q_{34}	q_{35}	q_{45}	q_{46}	q_{56}
	13	6	4	1	8	0	10	-3	4	15

Рис. 4. Розв'язання в MathCAD задачі оптимального розподілу потоків в мережі (рис. 3)

Але деякі потоки можуть змінювати свій знак (крім потоків входу та виходу). Якщо від'ємне значення потоку по модулю перевищує пропускну здатність, то вводять нерівності також і по від'ємному значенню потоку. У функції мети $F1(q_{12}, q_{13}, q_{23}, q_{24}, q_{25}, q_{34}, q_{35}, q_{45}, q_{46}, q_{56})$ потрібно перелічити всі змінні і прорівняти $F1$ потоку одного перерізу мережі ($q_{12} + q_{13}$). В результаті отримуємо розподіл максимального потоку мережі, який хоча й відрізняється від даних табл. 2, але задовольняє законам "бета".

В MathCAD рішення отримується при використанні функцій *Find*, *Minerr*, *Minimize* та *Maximize* за кількома методами (якщо перший з цих методів не працює, то вмикається наступний): *Linear* (симплекс – метод; при цьому початкові значення змінних не використовуються і можна застосовувати до 8192 обме-

жень), або один з трьох нелінійних методів [*Levenberg-Marquardt*, *Conjugate Gradient*, *Quasi-Newton* (200-400 змінних)].

Особливості законів Фарадея та Максвелла по визначенню ЕРС. Фарадей не використовував математичні залежності, а приписувані йому формули розрахунку ЕРС впливають з лінгвістичного опису про швидкість перетинання провідником магнітних силових ліній [4]. Максвелл замість "формули закону Фарадея" для визначення ЕРС $e=B \cdot L \cdot V$ (тут B – індукція магнітного поля, L – довжина провідника, V – швидкість переміщення провідника у магнітному полі) використовував формулу $e = -d\Phi/dt$ без розгляду шляхів зміни магнітного потоку геометрично незмінного контуру. Академік В.Ф. Миткевич розрізняв закон Фарадея $e = -d\Phi^{**}/dt$ і закон Максвелла $e = -d\Phi/dt$ і вимірював

зміну потоку Φ^{**} кількістю пересічених магнітних силових ліній. ЕРС $e = -d\Phi^{**}/dt$ В.Ф. Миткевич назвав "Фарадейовським формулюванням закону електромагнітної індукції" [4, с. 79] і стверджував, що воно ближче до суті фізичного процесу і є стабільно універсальним у порівнянні з формулюванням Максвелла $e = -d\Phi/dt$ [4, с. 89]. Для доведення цього твердження, В.Ф. Миткевич дав опис ряду експериментів. Один з них наведений на рис. 5: по первинній обмотці трансформатора W_1 протікає постійний струм і створює у магнітопроводі постійний магнітний потік Φ , а замкнений один виток вторинної обмотки W_2 при ковзанні по електропровідному "кільцю" "стрибком" змінює свій магнітний потік з нуля на Φ . Але при цьому ЕРС за законом Максвелла $e = -d\Phi/dt$ не створюється, бо немає пересічення магнітних силових ліній (в той же час контрольне вимкнення та увімкнення обмотки W_1 наводить ЕРС в обмотці W_2).

У досліді Фарадея по генеруванню постійної ЕРС при обертанні електропровідного диску у магнітному полі (рис. 6) щітки і провідники контуру можна розмістити так, щоб мінімізувати магнітний потік контуру Φ^{**} (його можна вважати рівним нулю і незмінним у часі), а між тим ЕРС $e = -d\Phi^{**}/dt$ буде наводитись як завжди довго.

В цьому випадку закон Максвелла $e = -d\Phi/dt$ незбавлений фізичного сенсу, бо магнітне поле контуру e постійним, а ЕРС провідника визначається лише швидкістю перетинання магнітних силових ліній.

Електропровідне "кільце"

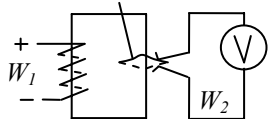


Рис. 5. Відсутність ЕРС $e_2 = -d\Phi/dt$

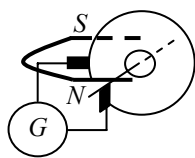


Рис. 6. Генератор

В.Ф. Миткевич стверджував, що в уніполярних машинах ми зустрічаємось із захованою комутацією (тобто вважав, що по провідниках приховано протікає змінний струм) [4, с. 215]. Але проведений пізніше дослід [2] уніполярного генератора з ізольованим провідником на роторі (рис. 7) довів, що у замкненому контурі можна нескінченно довго наводити постійну ЕРС, і тому "захованої комутації" не існує. Дослід з генератором рис. 7 також доводить, що магнітний потік контура може не збільшуватись до нескінченності при наведенні постійної ЕРС.

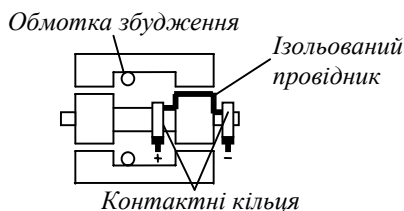


Рис. 7. Уніполярний генератор

Це вимагає чіткого дотримання формулювання Фарадея по створенню ЕРС.

ВИСНОВКИ

1. Розрахунки в електричній мережі можна виконувати по чотирьох системах законів (Кірхгофа для незмінної та змінної топології, "альфа" і "бета"), а також по математичній моделі з частковим використанням законів "бета" та нерівностей з урахуванням пропускових здатностей гілок мережі.

2. Закон електромагнітної індукції $e = -d\Phi^{**}/dt$ потрібно тлумачити у сенсі перетинання провідником магнітних силових ліній – за законом Фарадея.

3. Для уніполярного генератора рис. 6 закон Максвелла $e = -d\Phi/dt$ позбавлений фізичного сенсу, бо існуючий магнітний потік контуру не змінюється у часі, а "захованої комутації" не існує.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кутковецький В.Я. Обобщенные методы переключаящих функций и их применение для расчета электромагнитных процессов в вентильных цепях. Специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии; 05.09.5 – теоретическая электротехника. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. – Киев: Институт электродинамики АН Украины, 1992. – 30 с.
2. Кутковецький В.Я., Запорожец Ю.М. Взаимодействие проводника с магнитным полем // Электричество. – 1996. – № 9. – С. 60-62.
3. Кутковецький В.Я. Теоретичні основи мереж потоків // Наукові праці: наук.-метод. журнал. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Вип. 148. – Т. 160. Комп'ютерні технології. – С. 173-183.
4. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.
5. Труфанов А. (n.d.) Алгоритмы нахождения максимального потока [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://algolist.manual.ru/maths/graphs/maxflows/> (14.03.2011).
6. Чолпан П.П. Фізика. – Київ: Вища школа, 2004. – 567 с.
7. Christiano P., Kelner J.A., Madry A., Shang-Hua Teng, Spielman D. Electrical Flows, Laplacian Systems an Faster Approximation of Maximum Flow in Undirected Graph. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://people.csail.mit.edu/madry/docs/maxflow.pdf> (18.10.2011).
8. Ford L.R. Jr., Fulkerson D.R. Maximal Flow Through a Network // Canadian J. Math., 8(3), 1956. – p. 399-404.
9. Schilling W. Die Berechnung der elektrischen Verhältnisse in einphasigen selbsterregten Wechselrichtern (Reihen- und Parallel-Wechselrichter). // Archiv für Elektrotechnik, 1933. Bd. XXVII, H1. – p. 22-34.

Bibliography (transliterated): 1. Kutkovetsky V.J. *Obobshhennye metody pereklyuchajushhih funktsij i ih primenenie dlja rascheta jelektromagnitnyh processov v ventil'nyh cepyah*. Avtoreferat diss. doct. techn. nauk. Kiev, 1992. 30 p. 2. Kutkovetsky V.J., Zaporozhec Yu.M. *Vzaimodejstvie provodnika s magnitnym polem*. *Elektrichestvo*, 1996, no.9, pp. 60-62. 3. Kutkovetsky V.J. *Teoretychni osnovy meretz potokiv*. *Naukovi pratsi: nauk.-metod. zhurnal*, Mykolaiv, Petro Mohyla Black Sea State University publ., 2011, vol.160 *Kompiuterni tehnolohii*, no.148, pp. 173-183. 4. Mitkevich V.F. *Magnitnyj potok i ego preobrazovanija*. Moscow-Leningrad, Academy of Sci. of USSR Publ., 1946. 258 p. 5. Trufanov A. *Algoritmy nahozhdenija maksimal'nogo potoka*. Available at: <http://algolist.manual.ru/maths/graphs/maxflows/> (accessed 14 March 2011). 6. Cholpan P.P. *Fizyka*. Kyiv, Vyscha shkola Publ., 2004. 567 p. 7. Christiano P., Kelner J.A., Madry A., Shang-Hua Teng, Spielman D. *Electrical Flows, Laplacian Systems an Faster Approximation of Maximum Flow in Undirected Graph*. Available at: <http://people.csail.mit.edu/madry/docs/maxflow.pdf> (18 October 2011). 8. Ford L.R. Jr., Fulkerson D.R. Maximal Flow through a Network. *Canadian J. Math.*, 1956, no.8(3), pp. 399-404. 9. Schilling W. *Die Berechnung der elektrischen Verhältnisse in einphasigen selbsterregten Wechselrichtern (Reihen- und Parallel-Wechselrichter)*. *Archiv für Elektrotechnik*, 1933, Bd. XXVII, H1, pp. 22-34.

Надійшла (received) 15.09.2013

Кутковецький Валентин Якович, д.т.н., проф.,
Чорноморський державний університет ім. Петра Могили,
кафедра інформаційних технологій та програмних систем,
54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10,
тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

V.J. Kutkovetsky
Petro Mohyla Black Sea State University
10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine

Laws of electrical grid analysis.

Calculations of electrical network currents can be performed with four law systems, namely, Kirchhoff laws, under current limitation via electrical parameters and constant or variable network topology; "alpha" and "beta" laws, under current limitation via network arms transmission capacity.

Key words – Faraday laws, Maxwell laws, Kirchhoff laws, laws of "alpha" and "beta".

КОНТРОЛЬ ЧАСТОТЫ В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для підвищення швидкодії алгоритмів обробки первинних даних при визначенні частоти в задачах математичного моделювання та управління режимами електричних систем пропонується виконувати перехід від дискретних миттєвих значень параметрів режиму до представлення їх узагальненими векторами.

Для повышения быстродействия алгоритмов обработки первичных данных при определении частоты в задачах математического моделирования и управления режимами электрических систем предлагается выполнять переход от дискретных мгновенных значений параметров режима к представлению их обобщенными векторами.

ВВЕДЕНИЕ

Частота является одним из самых важных параметров электрической сети, который характеризует её надёжность, стабильность и качество электрической энергии. Даже незначительное отклонение частоты ($\pm 0,2 - 0,4$ Гц) от номинального значения (50 Гц) свидетельствует о нарушении в работе энергосистемы. Оценка частоты является важным элементом в алгоритмах автоматики энергосистем (автоматическая частотная разгрузка, автоматический частотный ввод резерва, частотное автоматическое повторное включение и т.д.), поэтому её правильное определение необходимо для их эффективной работы.

Определение частоты возможно либо расчётным путём с применением математических моделей и средств моделирования, либо путем измерений в реальной электрической системе с использованием соответствующих средств измерений.

В результате значительного прогресса вычислительной техники за последние годы всё более широкое применение получают средства измерения на основе микропроцессорной техники.

Оценка частоты необходима для согласованной, эффективной и своевременной работы всех подсистем сетей энергоснабжения, поэтому её правильное определение является важной задачей.

Актуальность проблемы совершенствования методов определения частоты электрической сети в режиме реального времени подтверждается обширным количеством публикаций в заданном направлении. В подавляющем большинстве работ предлагаются пути усовершенствования существующих или разработка новых методов измерения частоты. Основными требованиями, выдвигаемыми к средствам измерения, являются [1]:

- высокое быстродействие;
- высокая точность измерений;
- устойчивость к помехам и искажениям исходного сигнала.

Из публикаций, содержащих оценки современных средств измерения, следует, что наряду с существенным прогрессом в развитии элементной базы алгоритмы обработки первичной информации требуют совершенствования.

Хотя в настоящее время известно множество цифровых алгоритмов оценки частоты, на практике продолжает использоваться классический метод определения периодов сигнала по моментам переходов

сигнала через заданный уровень. А именно, чаще всего, через нулевой уровень, но в общем случае момент перехода сигнала через нуль неоднозначен [2]. Основной особенностью такого способа оценки частоты является необходимость применения линейной интерполяции сигнала. На точность алгоритма оказывают влияние также и помехи в сигнале. В связи с этим необходимо осуществлять предварительную фильтрацию сигнала и сглаживание результата [3]. Все эти операции приводят к усложнению алгоритмов обработки первичной информации.

Наряду с вышесказанным существует проблема несоответствия данных о частоте в разных точках сети значениям частоты, определяемой по скорости вращения турбин. Это связано с тем, что невозможно выполнение взаимоисключающих требований о числе используемых обобщённых периодов.

Кроме способов определения частоты по нулям функции возможно определение частоты на основании быстрого преобразования Фурье на некотором временном промежутке. Но и в этом случае будут получаться результаты, где длина временного промежутка, как правило, не совпадает с длиной одного или нескольких обобщённых периодов [4]. Также для измерения частоты применяется метод наименьших квадратов, выполняющий аппроксимацию входного сигнала специальной функцией. Но в любом из приведенных методов приходится решать оптимизационную задачу, для того, чтобы определить оптимальное сочетание быстродействия, помехоустойчивости и точности. Можно получить сколь угодно высокими любые две из указанных характеристик, но в ущерб оставшейся [5].

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Цифровые алгоритмы должны обеспечивать требуемую точность и быстродействие оценки частоты в различных режимах сети, но в значительной части цифровых систем РЗА продолжает использоваться метод по переходу сигнала через нуль.

Методы измерения частоты, основанные на обработке массивов дискретных значений сигнала, фиксации моментов прохождения сигнала через нуль и определении частоты по периоду изменения контролируемого параметра, требуют, чтобы обработка дискретных мгновенных значений была выполнена, как минимум, в течение одного периода. А для обеспечения требуемой точности длительность обработки должна быть

не менее чем 3-4 периода, что ограничивает их быстродействие. Кроме того, применяемые для повышения точности методы (гармонического анализа, фильтрации высших гармоник, методов аппроксимации) усложняют алгоритмы обработки первичной информации.

Точные и быстродействующие алгоритмы определения частоты нужны и для решения задач математического моделирования электрических систем в переходных процессах – для исследования переходных процессов, сопровождающихся изменениями частоты, численными методами, значения частоты необходимо иметь на каждом шаге численного интегрирования.

Системы дифференциальных уравнений переходных процессов синхронных и асинхронных машин включают уравнения движения роторов

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_{EM} - M_M, \quad (1)$$

где T_j – постоянная инерции вращающихся масс; M_M , M_{EM} – механический и электромагнитный момент; S – скольжение

$$S = \frac{\omega_C - \omega_d}{\omega_C}, \quad (2)$$

для определения которого на каждом шаге численного интегрирования должны быть известны как частота вращения двигателя, так и частота в сети.

Совершенствование алгоритмов обработки первичных данных в направлении повышения их быстродействия и точности может быть реализовано путем перехода от мгновенных значений параметров режима трехфазной системы к их изображающим векторам.

Параметры режима (токи, напряжения и др.) трехфазной системы можно представить либо тремя векторами, вращающимися относительно начала координат с частотой сети, а мгновенные значения – проекциями этих векторов на ось времени (рис. 1,а), либо те же мгновенные значения можно получить, проектируя единый (обобщенный) вектор на три оси времени, каждая из которых совпадает с магнитной осью соответствующей фазы (рис. 1,б).

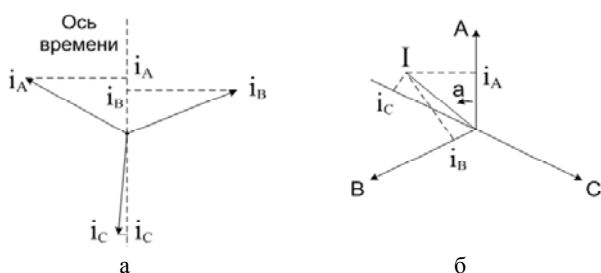


Рис. 1. Определение мгновенных значений фазных токов:
а – проекции векторов токов фаз на ось времени;
б – проекции изображающего вектора тока на оси фаз

Мгновенные значения токов фаз определяются проекциями обобщенного вектора на три оси фаз, сдвинутые на угол $2\pi/3$:

$$\begin{aligned} i_A &= I \cos \alpha; \\ i_B &= I \cos \alpha(\alpha - 2\pi/3); \\ i_C &= I \cos \alpha(\alpha + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (3)$$

где α – угол сдвига изображающего вектора относительно оси фазы А.

Сумма квадратов проекций

$$\begin{aligned} i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 &= I^2 \cdot (\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha - 2\pi/3) + \\ &+ \cos^2(\alpha + 2\pi/3)) = \frac{3}{2} I^2 \end{aligned} \quad (4)$$

откуда модуль и угол сдвига изображающего вектора относительно оси фазы А

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{2}{3}(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}; \\ \alpha &= \arccos \frac{i_A}{I}. \end{aligned} \quad (5)$$

Равенства (5) позволяют по мгновенным значениям токов фаз (на текущем шаге дискретизации измерений или расчета) однозначно определить изображающий вектор I по модулю и положению относительно осей фаз, а равенства (4) – выполнить обратное преобразование. Аналогичные соотношения справедливы и для других фазных переменных – напряжений, потокоцеплений, потоков фаз.

При переходе к обобщенным векторам упрощается и задача определения такого параметра, как мгновенная частота. Для этого необходимо по соотношениям (5) определить модуль $I(t_1)$, $I(t_2)$ и угол α_1 и α_2 изображающего вектора в моменты времени t_1 и t_2 , соответствующие, например, текущему и предыдущему шагу дискретизации. Тогда текущее мгновенное значение частоты, равное скорости вращения изображающего вектора, будет равно

$$\omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t}. \quad (6)$$

Применяемые и рекомендуемые [6] алгоритмы для решения этой задачи основаны на выделении основной гармоники, что в значительной степени более трудоемко.

Если токи (напряжения, потокоцепления) синусоидальны, сумма токов фаз равна нулю (нет составляющих нулевой последовательности)

$$i_A + i_B + i_C = 0, \quad (7)$$

отсутствуют составляющие обратной последовательности и высшие гармоники, то в полярных координатах конец обобщенного вектора $I(\alpha)$ описывает с постоянной скоростью ω окружность, модуль обобщенного вектора равен амплитуде фазного вектора.

При наличии в параметрах режима составляющих нулевой последовательности они определяются суммой мгновенных составляющих на шаге дискретизации

$$i_0 = i_A + i_B + i_C \neq 0. \quad (8)$$

Выполнив исключение i_0 , получим мгновенные значения токов фаз

$$i'_A = i_A - i_0, \quad i'_B = i_B - i_0, \quad i'_C = i_C - i_0, \quad (9)$$

не содержащие составляющих нулевой последовательности, к которым применимы приведенные выше соотношения.

Наличие высших гармоник при представлении параметров режима обобщенными векторами проявляется в том, что появляются знакопеременные отклонения модуля обобщенного вектора, но выражения (5), (6) для определения мгновенных значений углов и скорости вращения векторов остаются в силе.

Таким образом, переход к обобщенным векторам, во-первых, выполняется достаточно просто – по соотношениям (3) – (4), а, во-вторых, позволяет определять мгновенные значения частоты на каждом шаге дискретизации (расчетов или измерений) и допускает простую форму представления и интерпретации результатов.

ВЫВОДЫ

Методы измерения частоты, основанные на фиксации моментов прохождения сигнала через нуль и определении частоты по периоду изменения контролируемого параметра, требуют дополнительной обработки первичной информации по достаточно трудоемким алгоритмам, что ограничивает их быстродействие.

При переходе от дискретных мгновенных значений параметров режима к представлению их обобщенными векторами упрощаются алгоритмы обработки первичных данных, повышается их быстродействие и эффективность использования средств измерения и моделирования в задачах диагностики и анализа режимов работы электрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильчук В.Н. Современная аппаратура частотных автоматик разгрузки, ввода резервов ГЭС, защит и блокировок / В.Н. Данильчук, И.Ф. Нехай, Е.А. Коломиец, В.А. Перетягко // *Электрические сети и системы*. – 2008. – № 2. – С. 45-64.
2. Гапон Д.А. Исследование точности определения частоты промышленной сети методом сканирования по АЦП / Д.А. Гапон // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – 2010. – № 1. – С. 77-80.
3. Иванов Н.Г. Повышение надёжности алгоритма мониторинга частоты / Н.Г. Иванов // *Сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции "Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России"*. – 2013. – С. 121-122.
4. Винничук С.Д. Анализ алгоритмов определения частоты сети для случаев переходных режимов / С.Д. Винничук // *Электрические сети и системы*. – 2012. – № 5. – С. 68-77.
5. Гриб О.Г. Измерение частоты промышленной сети как показателя качества электрической энергии / О.Г. Гриб, Р.В. Жданов, Д.А. Гапон, А.А. Зуев // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – 2013. – № 17. – С. 45-50.
6. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во Стандартов, 1998.
7. Веприк Ю.Н. Базовая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах с несимметрией / Ю.Н. Веприк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2010. – №2. – С. 37-42.
8. Кочегаров Ю.И. Измерение частоты в приборном модуле релейной защиты и автоматики "Диамант" / Ю.И. Кочегаров, Ю.В. Якименко // *Электрические сети и системы*. – 2013. – № 3. – С. 70-72.

Bibliography (transliterated): 1. Danil'chuk V.N., Nehaj I.F., Kolomic E.A., Peretjat'ko V.A. Sovremennaja apparatura chastotnyh avtomatik razgruzki, vvoda rezervov GES, zashhit i blokirovok. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2008, no.2, pp. 45-64. 2. Gapon D.A. Issledovanie tochnosti opredelenija chastoty promyshlennoj seti metodom skanirovanija po ACP. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no.1, pp. 77-80. 3. Ivanov N.G. Povyshenie nadjozhnosti algoritma monitoringa chastoty. *Sbornik tezisov dokladov II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Relejnaja zashhita i avtomatizacija jelektroenergeticheskijh sistem Rossii"*, 2013, pp. 121-122. 4. Vinnichuk S.D. Analiz algoritmov opredelenija chastoty seti dlja sluchaev perehodnyh rezhimov. *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2012, no.5, pp. 68-77. 5. Grib O.G., Zhdanov R.V., Gapon D.A., Zuev A.A. Izmerenie chastoty promyshlennoj seti kak pokazatelja kachestva jelektricheskoj jenerгии. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no.17, pp. 45-50. 6. GOST 13109-97. Normy kachestva jelektricheskoj jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. Moscow, Publ. of Standarts, 1998. 7. Veprik Yu.N. Bazovaja model' jelektromagnitnyh perehodnyh processov v jelektricheskih sistemah s nesimmetriej. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2010, no.2, pp. 37-42. 8. Kochegarov Yu.I., Jakimenko Yu.V. Izmerenie chastoty v pribornom module relejnoj zashhity i avtomatiki "Diamant". *Jelektricheskie seti i sistemy*, 2013, no.3, pp. 70-72.

Поступила (received) 27.09.2013

Веприк Юрий Николаевич¹, д.т.н, проф.,

Ганус Ольга Алексеевна¹, аспирант,

¹Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", кафедра передачи электрической энергии, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 099 7851261, +38 096 0283146, e-mail: gansol88@mail.ru

Yu.N. Veprik¹, O.A. Ganus¹

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Frequency control in electrical system mathematical modeling and operation control problems.

To improve the performance of primary data processing algorithms when determining frequency in problems of mathematical modeling and operation control of electrical systems, it is proposed to represent discrete instantaneous values of operating mode parameters by their generalized vectors.

Key words – power system, power quality, frequency measurement.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УВЛАЖНЕНИЯ, ПРОСЫХАНИЯ ИЛИ ПРОМЕРЗАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМЛИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Наведений аналіз показав, що після обстеження заземлюючих пристроїв тривало експлуатованих підстанцій доцільно проводити не реконструкцію, а модернізацію їх заземлювачів шляхом створення дворівневої конструкції. Це дозволяє отримати як технічний, так і економічний ефект. Новизна результатів полягає в тому, що з використанням математичної моделі досліджено електричні характеристики заземлювача у вигляді дворівневої конструкції залежно від глибини просихання або промерзання верхнього шару землі.

Приведенный анализ показал, что после обследования заземляющих устройств длительно эксплуатируемых подстанций целесообразно проводить не реконструкцию, а модернизацию их заземлителей путем создания двухуровневой конструкции. Это позволяет получить как технический, так и экономический эффект. Новизна результатов состоит в том, что с использованием математической модели исследованы электрические характеристики заземлителя в виде двухуровневой конструкции в зависимости от глубины просыхания или промерзания верхнего слоя земли.

Обследования заземляющих устройств (ЗУ) на существующих длительное время в эксплуатации подстанциях (ПС) по известной методике [1, 2] выявили серьезную проблему. Они показали, что ЗУ в ряде случаев сильно корродировали, морально устарели, имеют вышедшие за пределы допустимых электрические характеристики. Именно поэтому данная проблема требует наискорейшего и эффективного ее решения. После обследования специализированной организацией и анализа полученных результатов выдаются обстоятельно обоснованные рекомендации по реконструкции ЗУ [3], которую выполняют либо специализированные организации, либо предприятия самостоятельно.

После реконструкции ЗУ обязательно проводится неразрушающий контроль электрических характеристик ЗУ [1, 4]. Проводимые реконструкции ЗУ ПС решают эту проблему, но, к сожалению не коренным образом, так как выполняется, в случае необходимости, замена разрушенных (на данный момент контроля) электродов в отдельных местах ЗУ, или дополнительная прокладка в случае их отсутствия. Однако коррозия электродов происходит постоянно, поэтому после реконструкции ЗУ в других местах старой части ЗУ будут выходить из строя электроды, что вновь повлечет за собой уход электрических параметров ЗУ за пределы допустимых значительно раньше, чем будет выполняться очередной их контроль (1 раз в 12 лет [1]).

Учитывая, что на подстанциях при реконструкции устанавливаются наряду с отечественными и зарубежные устройства и оборудование, в особенности устройства релейной защиты и автоматики на основе микропроцессорной техники, проведение реконструкции очевидно недостаточно. Это связано с тем, что микропроцессорная техника намного меньше защищена от влияния электромагнитных помех, чем релейно-контакторная. Одной из главных причин возникновения электромагнитных помех является ЗУ даже после его реконструкции, так как его электрические характеристики будут постепенно ухудшаться в связи с постоянной коррозией. Кроме того, электрические характеристики ЗУ зависят также от электрофизического состояния верхнего слоя земли в течение года: увлажнение, просыхания, промерзания.

Кардинальное решение существующей проблемы было предложено в работе [5] и подтверждено патентом [6]. Критика такого решения на конференциях и симпозиумах сводилась к следующему:

- размещение сетки верхнего уровня двухуровневого ЗУ на глубине 0,3-0,35 м может привести к повышенной коррозии электродов;
- электрические характеристики двухуровневого ЗУ подвергаются более сильному влиянию электрофизических параметров верхнего слоя земли, в особенности при просыхании и промерзании;
- будет ли обеспечена техническая и экономическая эффективность двухуровневого ЗУ при модернизации.

В отношении первой позиции критики можно отметить следующее. Во-первых, ПУЭ [7] рекомендуют укладку сетки ЗУ на глубину не менее 0,3 м в случае выполнения ЗУ по нормам на напряжение прикосновения. Кроме того, согласно ПУЭ (п. 1.7.107) необходимо прокладывать заземляющие проводники, которые присоединяют оборудование или конструкции к заземлителю, в земле на глубине, не менее 0,3 м. Во-вторых, в случае повышенной коррозии можно применять оцинкованные электроды. Можно также применять медные электроды, как за рубежом, но в условиях Украины в настоящее время это практически невозможно.

В отношении второй позиции ниже приводятся результаты исследования и обоснования преимущества двухуровневого ЗУ при модернизации [8] по сравнению с существующими ЗУ в случае реконструкции [3].

В отношении третьей позиции авторами установлено, что техническая и экономическая эффективности обеспечиваются улучшением электрических характеристик ЗУ и их контроля в первом случае и уменьшением объема земляных работ и расходом металла во втором.

В качестве объекта исследования принята конструкция ЗУ средних размеров как в виде двухуровневой сетки, так и в виде одноуровневой, а также и в их сочетании с вертикальными электродами по контуру, как показано на рис. 1.

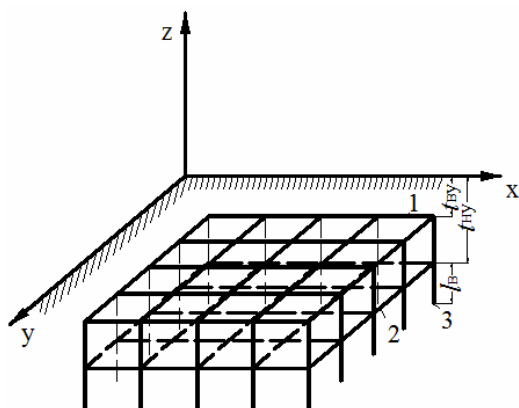


Рис. 1. Конструкция двухуровневого ЗУ:
 1 – сетка верхнего уровня на глубине $t_{vy}=0,35$ м;
 2 – сетка нижнего уровня на глубине $t_{ny}=0,7$ м;
 3 – вертикальный электрод

С целью упрощения принята однородная структура земли с удельным сопротивлением $\rho_2=100$ Ом·м. Удельное сопротивление ρ_1 верхнего слоя земли толщиной h принималось подвергнутым увлажнению ($\rho_1=20$ Ом·м), просыханию ($\rho_1=500$ Ом·м) или промерзанию ($\rho_1=1000$ Ом·м), причем толщина h слоя земли варьировалась от 0 до 2 м. Размер ячеек сетки ЗУ принят равным 10×10 м², диаметр электродов $d=0,02$ м, длина вертикальных электродов $l_b=4$ м, а их число 36 штук с равномерным размещением по контуру ЗУ.

ЗУ представлено в виде математической модели, с помощью которой были выполнены исследования его электрических характеристик (сопротивления R_{3y} и относительного потенциала ϕ_1/ϕ_3 в расчетных точках на поверхности земли). Результаты исследований представлены в табл. 1-4 (см. приложение), которые позволяют отметить следующее.

Увеличение глубины увлажнения верхнего слоя земли от 0 до 2 м приводит к снижению величины сопротивления ЗУ в виде сетки нижнего уровня (существующий вариант) от 1,197 Ом до 0,766 Ом, т.е. на 36 %. Изменение относительного потенциала на поверхности земли от центра по диагонали до угла сетки уменьшается незначительно, а за пределами сетки снижается более резко. Это характерно для любой толщины увлажненного слоя земли, кроме того, увеличение толщины слоя увлажнения приводит к увеличению относительного потенциала на поверхности земли, т.е. к снижению напряжения прикосновения.

В случае двухуровневого ЗУ, т.е. при применении сетки и верхнего уровня, аналогичное уменьшение сопротивления (см. табл. 2) составляет от 1,134 Ом до 0,75 Ом, т.е. на 34 %. При этом сопротивление ЗУ, состоящего из одной сетки только нижнего уровня, составляет 1,197 Ом, а в случае сетки только верхнего уровня 1,231 Ом, а применение двухуровневой сетки дает 1,134 Ом.

Опыт проектирования показывает, что без применения вертикальных электродов по контуру ЗУ в большинстве случаев практически не обойтись. Исключения составляют случаи, когда в грунт невозможно вертикальные электроды ввинтить или забить.

Исследования также показали, что и в этом случае (см. табл. 1) аналогичное увеличение глубины увлажнения верхнего слоя земли от 0 до 2 м приводит к снижению величины сопротивления ЗУ в виде сетки нижнего уровня с вертикальными электродами (существующий вариант ЗУ) от 1,065 Ом до 0,743 Ом, т.е. на 30 %. Добавление к данной конструкции сетки верхнего уровня, т.е. двухуровневый вариант ЗУ (предлагаемый вариант), при аналогичном увлажнении приводит (см. табл. 2) к снижению величины сопротивления ЗУ от 1,05 Ом до 0,735 Ом, т.е. на 30 %.

Изменение относительного потенциала на поверхности земли в тех же точках и в этом случае имеет качественно аналогичный характер. Следует также отметить, что применение сетки верхнего уровня (двухуровневая конструкция ЗУ) приводит к увеличению относительного потенциала на поверхности земли в среднем на 3-5 %.

Допустим, рассмотрение исходного ЗУ в виде сетки, которая расположена на глубине нижнего уровня, после обследования показало, что коррозия разрушила половину ЗУ. В этом случае сопротивление ЗУ и изменения относительного потенциала ϕ_1/ϕ_3 в расчетных точках на поверхности земли приведены в табл. 3. Точки расчета относительного потенциала на поверхности земли показаны на рис. 2.

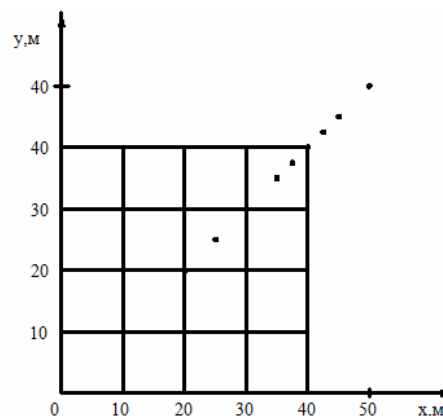


Рис. 2. Точки расчета относительного потенциала ϕ_1/ϕ_3

Рассмотрим типичный существующий случай, когда после обследования и разработки рекомендаций выполнена реконструкция ЗУ, т.е. вместо разрушенной коррозией части ЗУ восстановлена вторая половина ЗУ. В этом случае электрические характеристики ЗУ в виде сетки нижнего уровня (существующее ЗУ) восстановятся (см. табл. 1). После реконструкции ЗУ обязательно проводится контроль его электрических характеристик. Но далее коррозия будет продолжать разрушать электроды оставшейся старой части ЗУ существенно быстрее, чем восстановленной при реконструкции части ЗУ. Следовательно, отдельные электроды старой части ЗУ после реконструкции будут продолжать выходить из строя, а электрические характеристики ЗУ будут выходить за пределы допустимых значений. Заметим, однако, что после реконструкции очередной контроль ЗУ будет проводиться, согласно [1], только через 12 лет, а электрические характеристики начнут уходить за пределы допустимых вскоре после реконструкции, т.е. вполне очевидно,

что в этом случае появляется большой риск возникновения аварии.

Теперь рассмотрим не реконструкцию, а модернизацию ЗУ, т. е. применим сетку верхнего уровня на глубине $t_{\text{бу}}=0,35$ м над сеткой существующей (исходной до модернизации). В этом случае получим двухуровневую конструкцию ЗУ для случая, когда (см. рис. 3) сетка нижнего уровня разрушена коррозией до половины. На рис. 4 приведены зависимости изменения относительного потенциала φ_i/φ_3 на поверхности земли в направлении от центра сетки по диагонали в расчетных точках (рис. 2) для трех случаев: 1 – перед реконструкцией; 2 – после реконструкции; 3 – после модернизации.

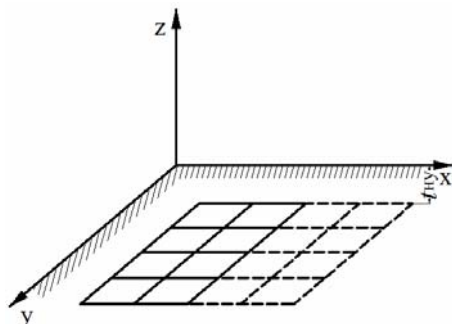


Рис. 3. Существующая перед реконструкцией сетка ЗУ на глубине $t_{\text{ну}}$ в результате коррозии

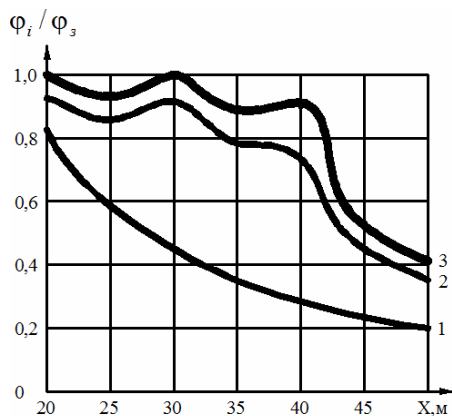


Рис. 4. Изменение относительного потенциала φ_i/φ_3 на поверхности земли различных вариантов ЗУ в виде сетки при толщине слоя увлажнения $h=0,4$ м

Анализ полученных результатов исследования (см. рис. 4) показал, что вышедшие за пределы допустимого электрические характеристики ЗУ до реконструкции (кривая 1) находятся значительно ниже, чем в исходном состоянии ЗУ или после его реконструкции (кривая 2). В случае модернизации ЗУ (кривая 3) электрические характеристики ЗУ не просто восстанавливаются, а становятся даже лучше, так как кривая 3 располагается выше, чем при реконструкции. Это наглядно свидетельствует о большей технической эффективности двухуровневого ЗУ, а, следовательно, подтверждает необходимость проведения модернизации ЗУ вместо осуществляемой в настоящее время реконструкции.

На рис. 5 показано изменение относительного потенциала φ_i/φ_3 в центре угловой ячейки ($x=y=35$ м) в зависимости от толщины h верхнего слоя грунта. В данном случае кривые 1а и 2а соответствуют увлаж-

нению грунта, а кривые 1б и 2б соответствуют просыханию или промерзанию грунта. При этом кривые 1 соответствуют случаю модернизации ЗУ, а кривые 2 соответствуют ЗУ после обследования. Приведенные результаты показывают, что увлажнение верхнего слоя грунта приводит к снижению напряжения прикосновения с увеличением толщины слоя до глубины равной глубине укладки $h=t_{\text{бу}}$ сетки верхнего уровня двухуровневого ЗУ, или $h=t_{\text{ну}}$ в случае ЗУ перед модернизацией. Дальнейшее увеличение толщины слоя в обоих случаях приводит к незначительному снижению напряжения прикосновения. В случае просыхания (промерзания) верхнего слоя грунта напряжение прикосновения увеличивается с ростом толщины h слоя. При превышении толщины слоя грунта сверх глубины укладки сетки, увеличение напряжения прикосновения существенно замедляется.

Кроме того, следует отметить, что с течением времени после модернизации старая часть ЗУ будет продолжать разрушаться коррозией. Однако даже при полном её разрушении, электрические характеристики ЗУ приобретут значения, которые будут соответствовать приведенным в табл. 4 значениям, т. е. для случая сетки верхнего уровня.

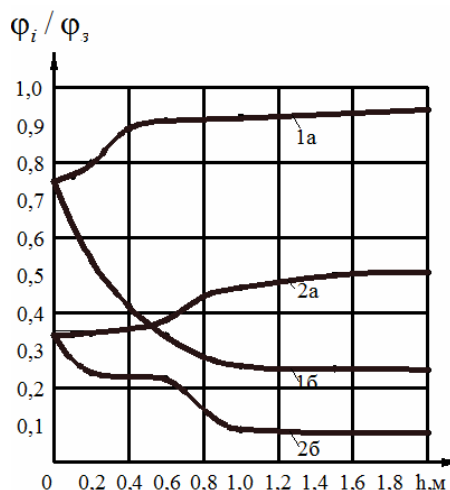


Рис. 5. Изменение относительного потенциала φ_i/φ_3 в центре угловой ячейки ЗУ в зависимости от толщины h верхнего слоя земли

ВЫВОДЫ

1. Представленные в статье результаты исследования и их анализ убедительно показывают, что необходимо проводить не реконструкцию, а модернизацию ЗУ подстанций, чтобы предотвратить возникновение в будущем неизбежных серьезных аварий в электрических высоковольтных сетях по причине неисправного ЗУ.

2. Новизна результатов состоит в том, что с использованием математической модели исследованы электрические характеристики заземлителя в виде двухуровневой конструкции в зависимости от глубины просыхания или промерзания верхнего слоя земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00. М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 2000. – 82 с.

2. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И., Васьковский А.П., Чевычелов В.А., Колиушко Д.Г. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 29-32.

3. Колиушко Г.М., Носулько В.Д., Воронина З.А., Колиушко Д.Г. Опыт обследования заземляющих устройств подстанций напряжением 150 кВ Запорожских Восточных электрических сетей // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 7. – С. 24-26.

4. Борисов Р.К., Колечицкий Е.С., Горшков А.В., Балашов В.В. Методика и технические средства для диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов // Электричество. – 1996. – № 1. – С. 65-67.

5. Гуль В.И., Нижевский В.И., Нижевский И.В. Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных горизонтальных электродов // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 5. – С. 33-35.

6. Пат. 18292, Україна, МПК H02B 1/00. Пристрій заземлення / В.І. Ніжевський, І.В. Ніжевський, В.І. Гуль – № u200603019. Заявлено 21.03.2006. Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 3 с.

7. Правила улаштування електроустановок. Глава 1.7 (ПУЕ). – К.: ТОВ "ТКО", 2011. – 71 с.

8. Нижевский И.В. Восстановление нормируемых параметров заземляющих устройств на действующих подстанциях // Вісник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 16. – С. 83-88.

Bibliography (transliterated): 1. Metodicheskie ukazaniya po kontrolju sostojanija zazemljajushhijh ustrojstv jelektroustanovok. RD 153-34.0-20.525-00. M.: Sluzhba peredovogo opyta ORGRES, 2000, 82 p. 2. Borisov R.K., Koliushko G.M., Grimud G.I., Vas'kovskij A.P., Chevychelov V.A., Koliushko D.G. Metodika issledovanija zazemljajushhijh ustrojstv ob'ektov jelektrojenergetiki. Jenergetika i jelektifikacija, 2000, no.4, pp. 29-32. 3. Koliushko G.M., Nosul'ko V.D., Voronina Z.A., Koliushko D.G. Opyt obsledovanija zazemljajushhijh ustrojstv podstancij naprjazheniem 150 kV Zaporozhskih Vostochnyh jelektricheskijh setej. Jenergetika i jelektifikacija, 2000, no.7, pp. 24-26.

4. Borisov R.K., Kolechickij E.S., Gorshkov A.V., Balashov V.V. Metodika i tehniczeskie sredstva dlja diagnostiki sostojanija zazemljajushhijh ustrojstv jenergoob'ektov. Elektrichestvo, 1996, no.1, pp. 65-67. 5. Gul' V.I., Nizhevskij V.I., Nizhevskij I.V. Electric descriptions of two-tier equipotential grounder made from single horizontal electrodes. Electrical engineering & electromechanics, 2006, no.5, pp. 33-35. 6. Nizhevskij V.I., Nizhevskij I.V., Gul' V.I. Prystriy zazemlennya. Patent UA, no.18292, 2006. 7. Pravyla ulashtuvannya jelektroustanovok. Part 1.7. Kyiv, TOV "TKO" Publ., 2011. 71 p. 8. Nizhevskij I.V. Vosstanovlenie normiruemyh parametrov zazemljajushhijh ustrojstv na dejstvujushhijh podstancijah. Bulletin of NTU "KhPI", 2010, no.16, pp. 83-88.

Поступила (received) 12.09.2013

Нижевский Илья Викторович¹, инженер,
Нижевский Виктор Ильич¹, доц., к.т.н.,
¹ Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра "Передача электрической энергии",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru

I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹
¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Research into action of surface soil moistening, drying or freezing on electrical characteristics of grounding device.

The analysis made has shown expediency of modernization rather than reconstruction of earth electrodes, after inspection of long operating substations grounding grids, via building a two-level structure. It will result in both technical and economic effects. The novelty of the results consists in studying, by means of a mathematical model, electrical characteristics of a two-level earth electrode versus the depth of surface soil drying or freezing.

Key words – substations, grounding devices, reconstruction, modernization, two-level structure.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Электрические характеристики ЗУ в виде сетки на глубине $t_{\text{нв}}=0,7$ м

ρ_1 , Ом·м	h , м	R_{3y} , Ом	Величина относительного потенциала ϕ_1/ϕ_2 в расчетной точке $x=y$, м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,132	0,933	0,849	0,92	0,774	0,767	0,742	0,537	0,448	0,35
		1,014	0,942	0,871	0,936	0,839	0,842	0,816	0,612	0,509	0,395
	0,4	1,092	0,932	0,862	0,918	0,787	0,773	0,74	0,551	0,462	0,362
		0,984	0,941	0,882	0,934	0,847	0,843	0,81	0,621	0,52	0,405
	0,6	1,039	0,944	0,881	0,931	0,81	0,794	0,759	0,573	0,484	0,38
		0,949	0,95	0,898	0,944	0,862	0,855	0,82	0,635	0,535	0,419
0,8	0,899	0,992	0,948	0,99	0,912	0,913	0,886	0,666	0,56	0,439	
	0,866	0,992	0,952	0,991	0,929	0,932	0,906	0,693	0,584	0,457	
1,0	0,866	0,992	0,956	0,991	0,922	0,921	0,89	0,681	0,576	0,453	
	0,838	0,993	0,959	0,992	0,937	0,938	0,911	0,706	0,597	0,47	
2,0	0,766	0,992	0,966	0,989	0,928	0,917	0,887	0,708	0,614	0,495	
	0,743	0,992	0,968	0,991	0,944	0,938	0,914	0,735	0,637	0,512	
100	0	1,197	0,955	0,836	0,947	0,761	0,763	0,778	0,525	0,436	0,34
		1,065	0,962	0,862	0,958	0,833	0,846	0,855	0,606	0,5	0,387
1000	0,2	1,189	0,731	0,602	0,732	0,549	0,561	0,617	0,375	0,309	0,24
		1,054	0,73	0,621	0,732	0,606	0,628	0,677	0,439	0,357	0,274
	0,4	1,212	0,755	0,608	0,759	0,556	0,572	0,64	0,375	0,306	0,236
		1,068	0,752	0,628	0,756	0,618	0,647	0,706	0,444	0,357	0,272
	0,6	1,255	0,767	0,608	0,771	0,553	0,569	0,638	0,368	0,298	0,23
		1,09	0,763	0,631	0,769	0,624	0,654	0,715	0,446	0,355	0,269
	0,8	2,121	0,623	0,366	0,607	0,307	0,307	0,401	0,201	0,167	0,132
		1,178	0,717	0,531	0,724	0,571	0,61	0,685	0,423	0,334	0,251
	1,0	2,561	0,658	0,312	0,646	0,261	0,270	0,421	0,169	0,139	0,109
		1,242	0,749	0,503	0,759	0,557	0,603	0,702	0,413	0,324	0,241
2,0	1,44	0,83	0,49	0,837	0,55	0,629	0,74	0,397	0,3	0,218	

Примечание: при каждом h первая строка – ЗУ в виде сетки, а вторая – сетка с вертикальными электродами по периметру.

Таблица 2

Электрические характеристики ЗУ в виде двухуровневой конструкции

ρ_1 , Ом·м	h , м	R_{3y} , Ом	Величина относительного потенциала ϕ_1/ϕ_3 в расчетной точке $x=y$, м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,056	0,981	0,892	0,977	0,834	0,84	0,845	0,584	0,484	0,377
		0,989	0,982	0,902	0,98	0,871	0,882	0,885	0,632	0,523	0,405
	0,4	0,964	1	0,933	1	0,894	0,907	0,917	0,639	0,53	0,412
		0,926	1	0,938	1	0,914	0,928	0,937	0,67	0,556	0,431
	0,6	0,923	1	0,946	1	0,912	0,921	0,92	0,661	0,551	0,43
		0,892	1	0,949	1	0,928	0,938	0,941	0,688	0,574	0,447
0,8	0,879	1	0,959	1	0,932	0,941	0,933	0,686	0,576	0,45	
	0,856	1	0,961	1	0,943	0,953	0,948	0,707	0,593	0,463	
1,0	0,849	1	0,964	1	0,94	0,947	0,935	0,7	0,59	0,464	
	0,83	1	0,966	1	0,95	0,957	0,949	0,718	0,606	0,475	
2,0	0,75	1	0,974	1	0,947	0,943	0,935	0,728	0,63	0,507	
	0,735	1	0,975	1	0,956	0,954	0,954	0,746	0,645	0,518	
100	0	1,134	1	0,871	1	0,806	0,818	0,877	0,56	0,463	0,36
		1,05	1	0,885	1	0,852	0,87	0,925	0,617	0,507	0,392
1000	0,2	1,132	0,767	0,624	0,776	0,577	0,595	0,704	0,397	0,325	0,253
		1,042	0,763	0,635	0,769	0,616	0,642	0,746	0,444	0,36	0,277
	0,4	1,122	0,892	0,65	0,894	0,591	0,608	0,735	0,401	0,328	0,255
		1,018	0,889	0,665	0,89	0,644	0,672	0,803	0,461	0,371	0,284
	0,6	1,192	0,94	0,633	0,942	0,575	0,593	0,761	0,384	0,312	0,241
		1,062	0,937	0,652	0,939	0,637	0,668	0,83	0,453	0,361	0,274
0,8	1,731	0,942	0,445	0,938	0,377	0,384	0,663	0,248	0,205	0,162	
	1,147	0,954	0,567	0,954	0,587	0,627	0,828	0,429	0,339	0,256	
1,0	2,06	0,962	0,385	0,96	0,326	0,346	0,674	0,211	0,173	0,135	
	1,22	0,971	0,532	0,971	0,568	0,618	0,834	0,415	0,326	0,243	
2,0	2,844	0,994	0,351	0,994	0,304	0,396	0,722	0,18	0,131	0,099	
	1,453	0,996	0,509	0,996	0,555	0,648	0,864	0,393	0,294	0,214	

Примечание: при каждом h первая строка – ЗУ в виде двух сеток, а вторая – две сетки с вертикальными электродами по периметру.

Таблица 3

Электрические характеристики ЗУ до и после модернизации

ρ_1 , Ом·м	h , м	R_{3y} , Ом	Величина относительного потенциала ϕ_1/ϕ_3 в расчетной точке $x=y$, м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,091	0,976	0,865	0,954	0,782	0,78	0,792	0,545	0,456	0,358
		1,575	0,837	0,572	0,435	0,342	0,307	0,278	0,253	0,232	0,199
	0,4	0,971	1,001	0,928	1	0,883	0,893	0,908	0,629	0,523	0,407
		1,508	0,833	0,589	0,451	0,356	0,32	0,289	0,264	0,242	0,208
	0,6	0,927	1	0,943	0,999	0,905	0,912	0,913	0,654	0,547	0,427
		1,418	0,852	0,615	0,475	0,376	0,339	0,307	0,28	0,257	0,221
0,8	0,888	1	0,952	0,998	0,915	0,918	0,913	0,67	0,564	0,448	
	1,184	0,955	0,713	0,559	0,446	0,402	0,364	0,333	0,306	0,263	
1,0	0,859	1	0,957	0,998	0,92	0,919	0,912	0,68	0,576	0,454	
	1,532	0,957	0,729	0,577	0,463	0,417	0,379	0,347	0,319	0,274	
2,0	0,761	1	0,966	0,996	0,921	0,909	0,908	0,703	0,611	0,493	
	0,98	0,954	0,76	0,62	0,508	0,462	0,423	0,388	0,359	0,311	
100	0	1,176	0,997	0,84	0,982	0,75	0,751	0,825	0,519	0,433	0,34
		1,678	0,874	0,557	0,421	0,33	0,296	0,268	0,244	0,224	0,192
1000	0,2	1,178	0,77	0,598	0,774	0,531	0,539	0,667	0,364	0,302	0,237
		1,674	0,694	0,397	0,297	0,232	0,208	0,188	0,172	0,157	0,135
	0,4	1,3	0,894	0,547	0,765	0,41	0,395	0,525	0,284	0,245	0,199
		1,714	0,724	0,397	0,293	0,228	0,204	0,185	0,168	0,154	0,132
	0,6	1,448	0,939	0,498	0,833	0,354	0,34	0,562	0,245	0,213	0,174
		1,79	0,73	0,39	0,285	0,221	0,197	0,178	0,162	0,148	0,127
0,8	2,069	0,921	0,358	0,855	0,274	0,275	0,566	0,185	0,157	0,127	
	3,484	0,483	0,192	0,141	0,11	0,099	0,089	0,082	0,075	0,064	
1,0	2,394	0,944	0,321	0,876	0,25	0,263	0,581	0,166	0,138	0,111	
	4,273	0,522	0,16	0,115	0,09	0,08	0,073	0,066	0,061	0,052	
2,0	3,188	0,981	0,304	0,922	0,246	0,315	0,631	0,148	0,11	0,085	
	5,769	0,641	0,14	0,091	0,068	0,06	0,054	0,049	0,045	0,039	

Примечание: при каждом h первая строка – ЗУ в виде двух сеток, а вторая – только сетка нижнего уровня (в обоих случаях половина сетки нижнего уровня полностью изъедена коррозией).

Таблица 4

Электрические характеристики модернизированного ЗУ после полного исчезновения сетки нижнего уровня (исходной)

ρ_1 , Ом·м	h , м	R_{3y} , Ом	Величина относительного потенциала φ_i/φ_3 в расчетной точке $x=y$, м								
			20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	50
20	0,2	1,136	0,959	0,848	0,951	0,776	0,774	0,788	0,538	0,447	0,349
		1,01	0,964	0,872	0,961	0,845	0,853	0,861	0,618	0,512	0,397
	0,4	0,978	1	0,926	1	0,882	0,892	0,908	0,628	0,521	0,405
		0,925	1	0,933	1	0,91	0,922	0,932	0,669	0,556	0,431
	0,6	0,931	0,999	0,942	0,999	0,904	0,912	0,913	0,654	0,546	0,426
		0,89	0,999	0,947	0,999	0,926	0,935	0,938	0,687	0,574	0,447
0,8	0,897	0,998	0,949	0,998	0,914	0,917	0,912	0,668	0,562	0,44	
	0,862	0,999	0,953	0,998	0,933	0,938	0,939	0,699	0,588	0,46	
1,0	0,87	0,998	0,954	0,997	0,919	0,918	0,911	0,678	0,574	0,451	
	0,838	0,998	0,958	0,998	0,937	0,939	0,939	0,708	0,594	0,47	
2,0	0,774	0,997	0,962	0,996	0,92	0,908	0,907	0,7	0,607	0,49	
	0,743	0,997	0,966	0,997	0,941	0,935	0,943	0,735	0,636	0,512	
100	0	1,231	0,984	0,819	0,981	0,742	0,744	0,821	0,51	0,423	0,33
		1,073	0,987	0,851	0,985	0,826	0,842	0,905	0,604	0,497	0,384
1000	0,2	1,241	0,769	0,581	0,777	0,524	0,534	0,666	0,357	0,295	0,23
		1,068	0,762	0,607	0,767	0,596	0,619	0,733	0,434	0,353	0,271
	0,4	1,868	0,735	0,404	0,722	0,337	0,331	0,482	0,226	0,19	0,15
		1,104	0,8	0,555	0,802	0,579	0,61	0,753	0,432	0,347	0,264
	0,6	2,516	0,801	0,305	0,794	0,254	0,253	0,513	0,168	0,141	0,111
		1,192	0,855	0,502	0,86	0,553	0,593	0,785	0,415	0,329	0,248
0,8	2,821	0,847	0,278	0,843	0,232	0,237	0,546	0,151	0,125	0,099	
	1,237	0,89	0,488	0,895	0,547	0,595	0,806	0,411	0,322	0,241	
1,0	3,047	0,873	0,264	0,87	0,22	0,237	0,569	0,142	0,116	0,091	
	1,274	0,909	0,48	0,913	0,545	0,598	0,813	0,408	0,318	0,236	
2,0	3,768	0,922	0,27	0,92	0,231	0,302	0,625	0,136	0,099	0,075	
	1,459	0,943	0,479	0,946	0,547	0,631	0,838	0,397	0,298	0,216	

Примечание: при каждом h первая строка – ЗУ в виде сетки верхнего уровня, а вторая – сетка верхнего уровня с вертикальными электродами по периметру.

РАСЧЕТ РЕАКТИВНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ КОМПЕНСАТОРА ДЛЯ ТРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ

Розглянуто задачу компенсації неактивної потужності у трипровідній трифазній мережі з несиметричною синусоїдальною напругою. Запропоновано алгоритм обчислення реактивних провідностей Δ-компенсатора за складовою повного струму, активна потужність якої дорівнює нулю. Розглянуто приклади розрахунків.

Рассмотрена задача компенсации неактивной мощности в трехпроводной трехфазной сети с несимметричным синусоидальным напряжением. Предложен алгоритм вычисления реактивных проводимостей Δ-компенсатора по составляющей полного тока, активная мощность которой равна нулю. Рассмотрены примеры расчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Активная мощность характеризует безвозвратную (необратимую) передачу и потребление электроэнергии электроприемниками (нагрузкой). Наличие реактивной мощности (мощности сдвига и/или несбалансированной мощности), пульсации мгновенной мощности в точке подключения нагрузки к трехфазному несимметричному синусоидальному напряжению указывает на неоптимальность передачи электроэнергии. В точке подключения напряжение и активная мощность нагрузки определяют так называемый активный ток для данной нагрузки [1, 2]. Такой активный ток с минимальным действующим значением поставляет в эту нагрузку энергию с полной активной мощностью. Ток, дополняющий активный ток до полного тока нагрузки (неактивный ток), приводит к дополнительным потерям в цепи источника. Однако неактивный (реактивный) ток требуется для нормальной работы нагрузки (например, временной сдвиг между током и напряжением для вращающихся машин) и может создаваться компенсирующим устройством (КУ) в точке подключения нагрузки. Компенсатор удаляет (частично или полностью) неактивный (реактивный) ток из цепи источника и уменьшает (или полностью устраняет) дополнительные потери.

Активная мощность неактивного тока (или его части) равна нулю и компенсатор может быть реализован как нагрузка с чисто реактивными элементами.

Задача состоит в том, чтобы по требуемому току компенсатора при несимметричном напряжении рассчитать его LC реактивные элементы. В работе показано, как в трехпроводной системе по заданному 3-проводному току, активная мощность которого равна нулю, найти соответствующую нагрузку (типа треугольник) с чисто реактивными элементами.

НЕСБАЛАНСИРОВАННЫЙ И НЕУРАВНОВШЕННЫЙ РЕЖИМЫ

В синусоидальном режиме локальное энергетическое состояние в точке присоединения несимметричной нагрузки к 3-фазной сети контролируется измерениями векторов комплексных действующих значений (3-комплексов) тока и напряжения в сечении $\langle A, B, C \rangle$ ее трех фаз

$$U = (\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)^\tau = (U_a e^{j\varphi_a}, U_b e^{j\varphi_b}, U_c e^{j\varphi_c})^\tau, \quad (1)$$

$$I = (\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)^\tau = (I_a e^{j\varphi_a}, I_b e^{j\varphi_b}, I_c e^{j\varphi_c})^\tau, \quad (2)$$

здесь и дальше τ – символ операции транспонирования векторов.

В 3-проводной сети напряжения трех фаз измеряются относительно искусственной точки заземления [1]. Токи удовлетворяют I закону Кирхгофа. Это приводит к выполнению условий

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0, \quad \dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0. \quad (3)$$

Токи и напряжения (1, 2), удовлетворяющие (3) не содержат 0-последовательности (0-уравновешенны).

Стандартная комплексная мощность (СКМ)

$$\dot{S} = \dot{U}_a I_a^* + \dot{U}_b I_b^* + \dot{U}_c I_c^*, \quad \dot{S} = P + jQ \quad (4)$$

дополнительно к активной мощности, определяет реактивную мощность (мощность сдвига) синусоидального режима

$$\operatorname{Re} \dot{S} = P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt, \quad Q = \operatorname{Im} \dot{S}, \quad (5)$$

где знак "*" – знак комплексного сопряжения, T – основной период ($T\omega = 2\pi$).

В синусоидальном режиме *мгновенная мощность* (ММ) определена формулой

$$p(t) = \operatorname{Re}[\dot{S} + \dot{N} e^{j2\omega t}] = P + N \cos(2\omega t + \arg \dot{N}) \quad (6)$$

Если комплексная *мощность пульсаций* (МП)

$$\dot{N} = N e^{j \arg \dot{N}} = \dot{U}_a \dot{I}_a + \dot{U}_b \dot{I}_b + \dot{U}_c \dot{I}_c \quad (7)$$

не равна нулю, то режим *неуравновешен*.

3-комплексы тока и напряжения (1, 2) определяют эквивалентные проводимости фаз

$$\dot{Y}_k = \dot{I}_k / \dot{U}_k, \quad k \in \{a, b, c\}. \quad (8)$$

Если эквивалентные проводимости фаз (8) не равны между собой, то режим *несбалансирован*. Несбалансированный режим характеризуется мощностью небаланса [1]. В 3-проводной сети мощность небаланса вычисляется по формуле

$$\dot{D}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{I}_a (\dot{U}_b - \dot{U}_c) + \dot{I}_b (\dot{U}_c - \dot{U}_a) + \dot{I}_c (\dot{U}_a - \dot{U}_b)]. \quad (9)$$

При несимметричном напряжении мощности (7) и (9) не равны, и входят в разные уравнения мощности (квадратичные разложения кажущейся мощности):

- уравнение несбалансированного режима [1]

$$S_B^2 = P^2 + Q^2 + D_0^2, \quad (10)$$

- уравнение неуравновешенного режима [1]

$$S_B^2 = N^2 + K_0^2. \quad (11)$$

Комплексная непьюлирующая мощность [1] в 3-проводной сети вычисляется по формуле

$$\dot{K}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{I}_a (U_b^* - U_c^*) + \dot{I}_b (U_c^* - U_a^*) + \dot{I}_c (U_a^* - U_b^*)].$$

Кажущаяся мощность определена как произведение

$$S_B = U \cdot I \quad (12)$$

действующих значений напряжения (1) и тока (2)

$$U = \sqrt{|\dot{U}|^2 + |\dot{U}_b|^2 + |\dot{U}_c|^2}, I = \sqrt{|\dot{I}_a|^2 + |\dot{I}_b|^2 + |\dot{I}_c|^2}.$$

Коэффициент мощности (КМ)

$$\lambda = \frac{P}{S_B} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_0^2}} \quad (13)$$

характеризует дополнительные потери.

КУ метода оптимального непьюлирующего режима (ОНР) [2] в цепи источника формирует 3-комплекс тока

$$\dot{I}_S = -\frac{P}{U^2 \dot{\eta}} \mathbf{U}_\Lambda; (\dot{\eta} = -\eta^*), \quad (14)$$

где \mathbf{U}_Λ – 3-комплекс межфазных напряжений; $\dot{\eta}$ – комплексный множитель, характеризующий несимметрию напряжения [2].

Ток цепи источника (14) поставляет активную мощность P исходного несбалансированного и неуравновешенного режима без пульсаций с минимальными потерями [2]. КМ нового уравновешенного режима не зависит от несимметрии нагрузки и определен модулем комплексного множителя, $\lambda = \eta = |\dot{\eta}|$.

КМ представляется через коэффициент k_{U2} асимметрии напряжения по обратной последовательности

$$\lambda = \eta = (1 - k_{U2}^2) / (1 + k_{U2}^2). \quad (15)$$

Активная мощность тока КУ

$$\dot{I}^K = \dot{I} - \dot{I}_S \quad (16)$$

равна нулю.

МАТРИЧНАЯ ФОРМА ЗАКОНА ОМА И КИРХГОФА В НАГРУЗКЕ ТИПА ТРЕУГОЛЬНИК

В нагрузке типа треугольник выберем последовательность обхода ветвей (рис. 1).

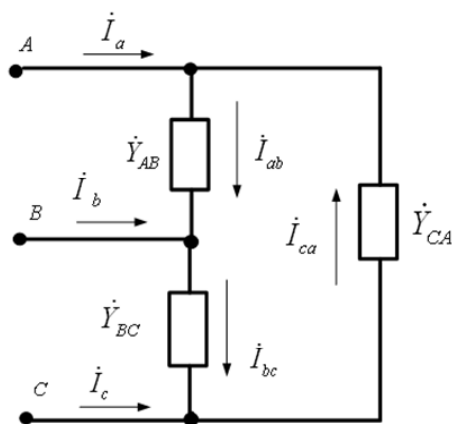


Рис. 1. Δ -нагрузка

Определим 3-комплексы межфазных токов и напряжений

$$\mathbf{I}_\Lambda = [\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}]^\tau, \quad (17)$$

$$\mathbf{U}_\Lambda = [\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}]^\tau. \quad (18)$$

И закон Кирхгофа определяет связь 3-комплексов фазных (2) и межфазных (17) токов

$$\mathbf{I} = \hat{M} \mathbf{I}_\Lambda, \quad (19)$$

где

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

– матрица инцидентности схемы типа треугольник.

3-комплексы межфазных токов и напряжений связаны матричной формой закона Ома

$$\mathbf{I}_\Lambda = \hat{Y}_\Lambda \mathbf{U}_\Lambda, \quad (21)$$

где $\hat{Y}_\Lambda = \text{diag}\{\dot{Y}_{AB}, \dot{Y}_{BC}, \dot{Y}_{CA}\}$ – диагональная матрица

межфазных проводимостей: $\dot{Y}_{AB} = G_{AB} + jB_{AB}$,

$$\dot{Y}_{BC} = G_{BC} + jB_{BC}, \dot{Y}_{CA} = G_{CA} + jB_{CA}$$

3-комплексы фазных (1) и межфазных (18) напряжений связаны матрично-векторным соотношением

$$\mathbf{U}_\Lambda = \hat{M}^\tau \mathbf{U}, \quad (22)$$

где \hat{M}^τ – транспонированная матрица инцидентности.

С учетом (21) и (22) цепочка преобразований 3-комплекса тока

$$\mathbf{I} = \hat{M} \mathbf{I}_\Lambda = \hat{M} \underbrace{(\hat{Y}_\Lambda \mathbf{U}_\Lambda)}_{\hat{\mathbf{I}}_\Lambda} = \hat{M} (\hat{Y}_\Lambda \underbrace{\hat{M}^\tau \mathbf{U}}_{\hat{\mathbf{U}}_\Lambda}) = \underbrace{(\hat{M} \hat{Y}_\Lambda \hat{M}^\tau)}_{\hat{\mathbf{Y}}} \mathbf{U} = \hat{\mathbf{Y}} \mathbf{U}$$

дает векторно-матричную связь

$$\mathbf{I} = \hat{\mathbf{Y}} \mathbf{U} \quad (23)$$

между 3-комплексами линейных токов и фазных (узловых) напряжений.

Матрица узловых проводимостей Δ -нагрузки

$$\hat{\mathbf{Y}} = \hat{M} \hat{Y}_\Lambda \hat{M}^\tau = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{AB} & -\dot{Y}_{AB} & -\dot{Y}_{CA} \\ -\dot{Y}_{AB} & \dot{Y}_{AB} + \dot{Y}_{BC} & -\dot{Y}_{BC} \\ -\dot{Y}_{CA} & -\dot{Y}_{BC} & \dot{Y}_{BC} + \dot{Y}_{CA} \end{bmatrix} \quad (24)$$

определяет матричную форму закона Ома (23) для Δ -нагрузки в фазовых координатах.

Связь матричных форм законов Ома и Кирхгофа в фазных и межфазных координатах представляются следующей диаграммой

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{U}_\Lambda & \xrightarrow{\hat{Y}_\Lambda} & \mathbf{I}_\Lambda \\ \uparrow \hat{M}^\tau & & \downarrow \hat{M} \\ \mathbf{U} & \xrightarrow{\hat{\mathbf{Y}}} & \mathbf{I} \end{array} \quad (25)$$

КОМПЛЕКСНЫЕ МОЩНОСТИ В ТОЧКЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ Δ -НАГРУЗКИ

Комплексная мощность Δ -нагрузки

$$\dot{S}_\Lambda = \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{BC} + \dot{S}_{CA} \quad (26)$$

вычисляется через 3-комплексы межфазных токов и напряжений (17-18)

$$\dot{S}_\Lambda^* = \mathbf{I}_\Lambda^\tau \mathbf{U}_\Lambda^* = (\hat{Y}_\Lambda \mathbf{U}_\Lambda)^\tau \mathbf{U}_\Lambda^* = \mathbf{U}_\Lambda^\tau \hat{Y}_\Lambda \mathbf{U}_\Lambda^*. \quad (27)$$

С учетом закона Ома (21) имеем

$$\dot{S}_\Lambda^* = \dot{Y}_{AB} |\dot{U}_{ab}|^2 + \dot{Y}_{BC} |\dot{U}_{bc}|^2 + \dot{Y}_{CA} |\dot{U}_{ca}|^2. \quad (28)$$

Справедлива цепочка преобразований

$$\dot{S}_\Lambda = U_\Lambda^T I_\Lambda^* = \underbrace{(\hat{M}^T U)^T}_{U_\Lambda} I_\Lambda^* = U^T \underbrace{\hat{M} I_\Lambda^*}_{I^*} = U^T I^* = \dot{S}.$$

Тем самым комплексная (активная) мощность в точке присоединения нагрузки (в сечении $\langle A, B, C \rangle$) равна комплексной (активной) мощности Δ -нагрузки

$$\dot{S} = \dot{S}_\Lambda \Rightarrow P = \operatorname{Re}[\dot{S}] = \operatorname{Re}[\dot{S}_\Lambda] = P_\Lambda. \quad (29)$$

Из (28) следует, что активная мощность Δ -нагрузки обусловлена ее активными элементами и равна потребляемой из сети активной мощности

$$P_\Lambda = \operatorname{Re}[\dot{S}_\Lambda] = G_{AB} |\dot{U}_{ab}|^2 + G_{BC} |\dot{U}_{bc}|^2 + G_{CA} |\dot{U}_{ca}|^2$$

Чисто реактивная Δ -нагрузка не потребляет активную мощность

$$G_{AB} = G_{BC} = G_{CA} = 0 \Leftrightarrow P = P_\Lambda. \quad (30)$$

РЕАКТИВНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ Δ -КОМПЕНСАТОРА

КУ выполняется как чисто реактивная Δ -нагрузка и не потребляет из сети активную мощность. При чисто реактивной Δ -нагрузке 3-комплексы *межфазных* токов компенсатора I_Λ^K и 3-комплексы *межфазных* напряжений (6) связаны матричной формой закона Ома (21)

$$I_\Lambda^K = j \hat{B}_\Lambda^K U_\Lambda, \quad (31)$$

где $\hat{B}_\Lambda^K = \operatorname{diag}\{B_{AB}^K, B_{BC}^K, B_{CA}^K\}$ – диагональная матрица межфазных реактивных КУ.

Согласно (19) и (31) ток компенсатора в фазах I^K (в точке присоединения нагрузки) через его межфазные проводимости записывается как

$$I^K = \hat{M} I_\Lambda^K = j \hat{M} \hat{B}_\Lambda^K U_\Lambda \quad (32)$$

В уравнении (32) ток компенсатора соответствует требуемой цели компенсации, и, например, может компенсировать один из токов [2]:

- полный неактивный ток (метод Фризе);
- - полный пульсирующий ток + реактивный ток + частично несбалансированный ток (метод ОНР);
- - несбалансированный ток (метод сбалансированной мощности);
- чисто реактивный ток (мощность сдвига), а также любую часть полного тока, с единственным требованием – активная мощность тока, который надо компенсировать, равна нулю.

Преобразуем уравнение (32). Введем вектор межфазных проводимостей $b_\Lambda^K = [B_{AB}^K, B_{BC}^K, B_{CA}^K]^T$ и диагональную матрицу межфазных напряжений

$$\hat{U}_\Lambda = \operatorname{diag}\{\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}\}. \quad (33)$$

Воспользуемся векторно-матричным равенством

$$\hat{B}_\Lambda^K U_\Lambda = \hat{U}_\Lambda b_\Lambda^K. \quad (34)$$

Уравнение (32) запишется как

$$I^K = j \hat{M} \hat{U}_\Lambda b_\Lambda^K. \quad (35)$$

Умножим уравнение (35) слева на комплексно сопряженную матрицу $\hat{U}_\Lambda^* = \operatorname{diag}\{\dot{U}_{AB}^*, \dot{U}_{BC}^*, \dot{U}_{CA}^*\}$.

Имеем систему линейных алгебраических уравнений в стандартной форме

$$j \hat{L}_\Lambda b_\Lambda^K = \hat{U}_\Lambda^* I^K. \quad (36)$$

Матрица

$$j \hat{L}_\Lambda = j \hat{U}_\Lambda^* \hat{M} \hat{U}_\Lambda = j \begin{bmatrix} U_{ab}^2 & 0 & -\dot{U}_{ca} U_{ab}^* \\ -\dot{U}_{ab} U_{bc}^* & U_{bc}^2 & 0 \\ 0 & -\dot{U}_{bc} U_{ca}^* & U_{ca}^2 \end{bmatrix}$$

известна, ее диагональные элементы чисто мнимые. Искомые неизвестные вещественны. Применим операцию нахождения реальной части к левой и правой части. Имеем систему вещественных уравнений

$$\begin{bmatrix} \operatorname{Re}[i_a^K U_{ab}^*] \\ \operatorname{Re}[i_b^K U_{bc}^*] \\ \operatorname{Re}[i_c^K U_{ca}^*] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \operatorname{Im}[\dot{U}_{ca} U_{ab}^*] \\ \operatorname{Im}[\dot{U}_{ab} U_{bc}^*] & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{Im}[\dot{U}_{bc} U_{ca}^*] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{AB}^K \\ B_{BC}^K \\ B_{CA}^K \end{bmatrix},$$

которая распадается и дает следующие формулы

$$B_{AB}^K = \frac{\operatorname{Im}[\dot{U}_{ab} U_{bc}^*]}{\operatorname{Re}[i_b^K U_{bc}^*]}, \quad (37,а)$$

$$B_{BC}^K = \frac{\operatorname{Im}[\dot{U}_{bc} U_{ca}^*]}{\operatorname{Re}[i_c^K U_{ca}^*]}, \quad (37,б)$$

$$B_{CA}^K = \frac{\operatorname{Im}[\dot{U}_{ca} U_{ab}^*]}{\operatorname{Re}[i_a^K U_{ab}^*]}, \quad (37,в)$$

для вычисления реактивных проводимостей Δ -компенсатора, по требуемому 3-комплексу линейного тока компенсатора I^K и измеренному 3-комплексу несимметричных напряжений (1).

ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для расчета и моделирования выбран метод ОНР. Моделирование проводилось в среде *MathCad*. В рассматриваемых ниже примерах все величины приведены в относительных единицах, $|U| = 1$. 3-комплекс напряжения $U = (0,616, 0,557e^{j236,4}, 0,557e^{j123,6})$ имеет симметричные координаты $\dot{U}_1=0,998, \dot{U}_2=0,07$. Коэффициент несимметрии напряжения $\kappa_{U2} = 7\%$, $\eta = 0,99$. Δ -нагрузка задана межфазными проводимостями.

Таблица 1

Параметры Δ -нагрузки			
№	1	2	3
\dot{Y}_{AB}	1	$1-j4$	$0.3-j0.1$
\dot{Y}_{BC}	0	0	$0.6-j0.3$
\dot{Y}_{CA}	0	0	$0.22-j0.2$

Во всех трех примерах нагрузка выбрана так, что обеспечивается передача энергии с одинаковой активной мощностью $P = 1,07$ о.е. Параметры исходных режимов сведены в табл. 2. Межфазные реактивные проводимости $B_{AB}^K, B_{BC}^K, B_{CA}^K$ компенсатора, рассчитанные согласно (37), и параметры нового ОНР приведены в табл. 3. Суммарные межфазные проводимости "нагрузка+КУ" определены диагональной матрицей $\hat{Y}_\Lambda^\Sigma = \hat{Y}_\Lambda + j \hat{B}_\Lambda^K$.

Пример 1. Модифицированная схема Штейнтеца. Одноплечевая активная нагрузка $G_{AB}=1$ включена между фазами A и B . Суммарные проводимости "на-

грузка+КУ" $\dot{Y}_{AB}^{\Sigma} = 1 + j0.122$, $\dot{Y}_{BC}^{\Sigma} = j0.624$,
 $\dot{Y}_{CA}^{\Sigma} = -j0.624$ отличаются от проводимостей
Steinmetz' circuit при симметричном напряжении
 $(\dot{Y}_{AB}^{\Sigma} = 1, \dot{Y}_{BC}^{\Sigma} = -\dot{Y}_{CA}^{\Sigma} = jG_{AB}/\sqrt{3} = j0.577)$.

Таблица 2

Исходный несбалансированный режим без КУ			
№	1	2	3
S_B	1.463	6.031	1.343
P	1.07	1.07	1.07
Q	0	4.279	0.579
D	0.998	4.113	0.595
N	0.64+j0.86	4.07-j1.7	-0.27+j0.13
λ	0.741	0.177	0.825

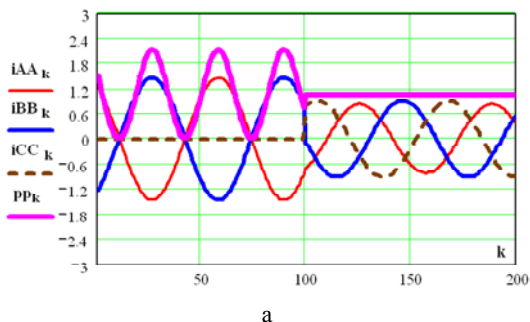
Пример 2. Индуктор. Одноплечевая нагрузка включена между фазами *A* и *B*. Коэффициент мощности $\cos \varphi_{AB} = G_{AB} / \sqrt{G_{AB}^2 + B_{AB}^2} = 0.243$. Структурная несимметрия такая же, как и в первом примере и компенсируется межфазными проводимостями ($B_{AB}^K = 0.122$, $B_{BC}^K = 0.624$, $B_{CA}^K = -0.624$). Дополнительная индуктивная проводимость ($B_{AB} = -4$) в плече *AB* компенсируется емкостью КУ ($B_{AB}^{K''} = 4$, $B_{AB}^K = B_{AB}^{K'} + B_{AB}^{K''}$).

Пример 3. Типовая 3-фазная несимметричная нагрузка. Три однофазные активно-индуктивные нагрузки ($\cos \varphi_{AB} = 0.894$, $\cos \varphi_{BC} = 0.919$, $\cos \varphi_{AC} = 0.447$) формируют трехфазную несимметричную нагрузку.

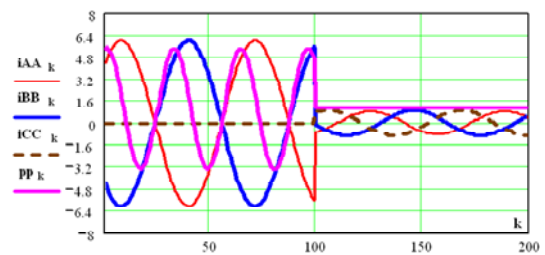
Таблица 3

Параметры ОНР после компенсации			
№	1	2	3
S_B	1.07	1.07	1.07
P	1.07	1.07	1.07
Q	0	0	0
D	0.15	0.15	0.151
N	0	0	0
B_{AB}^K	0.122	4.122	-0.027
B_{BC}^K	0.624	0.624	0.350
B_{CA}^K	-0.624	-0.624	0.287
λ	0.99	0.99	0.99

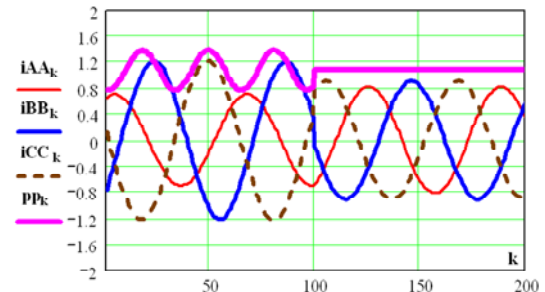
Метод ОНР обеспечивает полную компенсацию реактивной и пульсирующей мощности и частично-несбалансированной мощности при $\lambda \approx 1$.



а



б



в

Рис. 2. Поведение кривых тока в фазах и ММ до и после компенсации для рассмотренных примеров

ВЫВОДЫ

При несимметричном синусоидальном напряжении для 3-проводной схемы получены формулы для вычисления реактивных проводимостей *D*-компенсатора, активная мощность тока которого равна нулю. Результаты проверены числовым моделированием для метода ОНР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротин Ю.А. Энергетические режимы трехфазной трехпроводной цепи // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – № 17. – С. 129-143.
2. Сиротин Ю.А. Оптимальная компенсация пульсаций при несимметричном напряжении // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 73-80.

Bibliography (transliterated): 1. Sirotnin Yu.A. Jenergeticheskie rezhimy trehfaznoj trehprovodnoj cepi. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no.17, pp. 129-143. 2. Sirotnin Yu.A. Optymal'naya kompensatsyya pul'satsyyu pry nesymmetrychnom napryazhenyy. *Technical electrodyamics*, 2013, no.3, pp. 73-80.

Поступила (received) 16.09.2013

Сиротин Юрий Александрович, к.т.н., доц.,
 Национальный технический университет
 "Харківський політехнічний інститут",
 кафедра "Автоматизація енергосистем",
 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
 тел/phone +38 057 3433682, e-mail: yuri_sirotnin@ukr.net

Yu.A. Sirotnin
 National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Calculation of compensating susceptance for a three-wire net.

A problem of inactive power compensation in a three-wire three-phase network under asymmetrical sinusoidal voltage is considered. An algorithm for calculating susceptance of a Δ -compensator for the total current component active power of which equals zero is introduced. Examples of calculation are given.

Key words – three-phase network, compensation, asymmetrical voltage, reactive power.