

ISSN 2074-272X

науково-практичний
журнал

2014/2

ЕІЕлектротехніка і Електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена
Електричні машини та апарати
Ювілеї

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., НДПКИ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків
Батигін Ю.В. д.т.н., професор, ХНАДУ, Харків
Біро Оскар професор, Технічний університет,
м. Грац, Австрія
Бось В.М. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Болух 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 НДПКИ
"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, Московський
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 31.03.2014 р. Формат 60 x 90 1/8. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-2-2014. 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



EIE

Рекомендовано до видання Вченою радою Національного технічного
університету "Харківський політехнічний інститут"
Протокол № 4 від 04 квітня 2014 р.

2014/2

ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славені імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 19: Изучение и покорение дальнего космоса	3
--	---

Електричні машини та апарати

Авдеева Е.А., Ставинский Р.А. Потери активной мощности в трехфазных трансформаторах с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых пространственных магнитопроводов	14
Бондар Р.П., Чеботарун І.С., Подольцев О.Д. Моделирование динамических характеристик нелинейной колебательной системы с магнитной пружиной. Часть 1	18
Вакарюк Т.В., Петренко Н.Я., Петренко А.Н. Исследование температуры узлов асинхронного частотно-управляемого двигателя в зависимости от нагрузки и типа источника питания	21
Верхола А.В. Определение экономически обоснованных параметров синхронного отключения при коммутации низковольтной цепи синхронным вакуумным контактором	24
Волканин Е.Е., Некрасов А.В., Оксанич А.П., Ляшенко В.П. Определение баланса сил, действующих на наночастицу в электротехнической системе магнитной сепарации	28
Doležel I., Karban P., Mach F. Induction heating of rotating nonmagnetic billet in magnetic field produced by high-parameter permanent magnets	32
Лушчик В.Д., Полезін С.Ю. Реверс трифазных асинхронных двигателей с шестифазными обмотками	37
Лушчик В.Д., Тимошенко В.О. Методика створення двополосних обмоток асинхронних машин із збільшеною кількістю паралельних гілок	40
Плюгин В.Е. Классовая структура моделей электромеханического преобразователя энергии с использованием UML-диаграмм	44
Скрупская Л.С., Олейник А.А., Сахно А.А. Построение моделей диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока	48
Сьомка О.О., Прус В.В. Урахування зміни теплових та вібраційних параметрів електричних машин із тривалим напрацюванням на відмову	52
Цодик И.А., Худобин К.В. Учет эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной цепи в математической модели асинхронного двигателя	56
Шевченко В.В., Милых В.И., Потоцкий Д.В. Техно-экономические аспекты развития электромашиностроения с учетом направлений развития электроэнергетики	60
Шуруб Ю.В. Дослідження роботи трифазно-однофазних асинхронних електроприводів при стохастичних навантаженнях	64
Ярымбаш Д.С. Идентификация температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений керны в процессе графитации	66

Ювілеї

Данько Володимир Григорович (до 80-річчя з дня народження)	71
Сосков Анатолий Георгиевич (к 75-летию со дня рождения)	72
Розанов Юрий Константинович (к 75-летию со дня рождения)	73

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 19: Deep space study and exploration	3
---	---

Electrical machines and apparatus

Avdieieva E.A., Stavinskiy R.A. Watt loss in three-phase transformers with circular and hexagonal forming contours of twisted spatial magnetic core rods	14
Bondar R.P., Chebotarun I.S., Podoltsev A.D. Modeling of dynamic characteristics of a nonlinear oscillatory system with a magnetic spring. Part 1	18
Vakaruk T.V., Petrenko N.Ya., Petrenko A.N. Study of frequency-controlled asynchronous motor units temperature versus load and power supply type	21
Verkhola A.V. Determination of economically justified parameters of synchronous disconnection at low-voltage circuit switching via a synchronous vacuum contactor	24
Volkaniin E.E., Nekrasov A.V., Oksanych A.P., Ljashenko V.P. Determination of nanoparticle force balance in an electrical magnetic separation system	28

Doležel I., Karban P., Mach F. Induction heating of rotating nonmagnetic billet in magnetic field produced by high-parameter permanent magnets.....	32
Lushchik V.D., Polezin S.Yu. A reverse mode of three-phase asynchronous motors with hexaphase windings	37
Lushchik V.D., Tymoshchenko V.O. A 2-pole winding development technique for asynchronous machines with increased number of parallel branches.....	40
Plyugin V.Ye. Class structure of electromechanical energy converter models with UML-diagrams application	44
Skrupskaya L.S., Oliinyk A.O., Sakhno A.A. Model building for current transformer paper-oil insulation state diagnostics.....	48
Somka O.O., Prus V.V. Allowance for heat and vibration parameters variation of electric machines with extended failure interval.....	52
Tsodik I.A., Hudobin K.V. Adding effect of current displacement and magnetic circuit saturation in an asynchronous motor mathematical model.....	56
Shevchenko V.V., Milykh V.I., Pototskyi D.V. Technical and economic aspects of electric machine industry development with account of electric power development directions	60
Shurub Yu.V. Investigation of a three-phase-single-phase induction electric drive under stochastic loads	64
Yarymbash D.S. Identification of temperature dependences of center-punch specific electrical resistance during graphitization	66

Anniversaries

Dan'ko Volodymyr Grygorovych (on the 80th anniversary of his birth).....	71
Soskov Anatoliy Georgievich (on the 75th anniversary of his birth).....	72
Rozanov Yuri Konstantinovich (on the 75th anniversary of his birth).....	73

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.serialssolutions.com), у всесвітній федеративний бібліотечний каталог OCLC WorldCat за № 851561709 (worldcat.org), індексується у наукометричних базах Index Copernicus (indexcopernicus.com), Російський Индекс Научного Цитирования – РИНЦ (elibrary.ru), Google Scholar (scholar.google.com) та входить до баз даних DOAJ (www.doaj.org), BASE (base-search.net), Scientific Indexing Services (sindexs.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.uran.ua). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ.
ЧАСТЬ 19: ИЗУЧЕНИЕ И ПОКОРЕНИЕ ДАЛЬНЕГО КОСМОСА**

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії вивчення планет Сонячної системи і інших космічних світів нашого нескінченного Всесвіту.

Приведен краткий очерк из всемирной истории изучения планет Солнечной системы и иных космических миров нашей бесконечной Вселенной.

ВВЕДЕНИЕ

Яркие светила на ночном земном небосклоне издавна привлекали к себе внимание любознательных землян. Многолетние наблюдения за звездами и планетами показали им, прежде всего, периодичность и взаимную неизменность их положения на небесной сфере. Результаты подобных наблюдений люди старались использовать при своих морских и сухопутных путешествиях. В 323 году до н.э. умер великий полководец и создатель громадной империи в древней истории мира Александр Македонский [1]. Одному из сподвижников этого завоевателя македонцу Птолемеему достался в управление древний Египет. Разумная система управления Птолемеем приносила огромные доходы, часть из которых он направлял на развитие искусств и науки. Благодаря этому столица древнего Египта – г. Александрия (была названа в честь Александра Македонского) стала культурным и научным центром античного мира [1]. Уже тогда многим стало ясно, что денежные средства, вложенные в науку, не пропадают зря. Именно в г. Александрия Птолемей основал уникальный античный научный центр – Мусей (это название, как и современное понятие "Музей", происходит от греческого слова "museion", означающего "место, где обитают музы" [2]). Первым жрецом (главой) этого Мусея, должность которого официально называлась "библиотекарь", был географ Эратосфен, разработавший практический способ расчетного определения географической широты различных точек Земли и приближенно определивший путем несложных вычислений длину земного меридиана [1]. Этим было показано, что наша планета имеет форму шара. Именно здесь великий ученый древности Евклид Александрийский (365-300 гг. до н. э.) создал стройную систему геометрических положений и основал геометрию как науку. Именно в г. Александрия во 2-ом веке н. э. родилась система мироустройства известного астронома и географа Клавдия Птолемея, которая в течение более тысячелетия считалась общепризнанной [1]. Этим видным египетским ученым были заложены основы научной географии и картографии. Картами К. Птолемея пользовались европейцы даже во времена великого мореплавателя и первооткрывателя Америки, португальца Христофора Колумба [1]. Так постепенно путем накопления в человеческом обществе базовых научных знаний для его выдающихся представителей пришло время и для предметного изучения огромного числа планет и звезд бесконечной Вселенной. Постараемся вкратце проследить развитие основных научных представлений об окружающем нас далеком космическом мире.

1. ДОСТИЖЕНИЯ В АСТРОНОМИИ ДРЕВНЕЙ ИСТОРИИ

В древней Греции науки почитались, как и искусства [1]. Мудрецы и философы древности считали, что им покровительствовали небесные богини-музы. Астрономия (это понятие происходит от греческих слов "astron" – "звезда" и "nomos" – "закон" и обозначает науку, занимающуюся строением и развитием космических тел и всей нашей Вселенной [2]) относится к числу одной из самых древнейших наук на планете Земля. Богиней астрономии согласно древнегреческой мифологии и ученым-грекам являлась Урания (рис. 1) [1]. Выдающийся древнегреческий астроном Гераклид Понтийский (387-312 гг. до н. э.), учителями которого были великие мыслители того времени Платон, Аристотель и последователи Пифагора, первым из каких-либо известных нам землян древности приблизился к научному предположению о том, что наше Солнце является центром Солнечной системы. Он первым стал утверждать, что Земля вращается вокруг своей оси. На основании своих астрономических наблюдений он пришел к выводу, что планеты Меркурий и Венера вращаются вокруг Солнца [1].



Рис. 1. Древнегреческая богиня астрономии – Урания [1]

Кроме того, древнегреческий астроном Гераклид Понтийский первым заявил, что период обращения Земли вокруг нашего светила Солнца является астрономическим годом. Он уже тогда считал звезды на земном небосклоне целыми мирами, имеющими форму шара и состоящими в соответствии с современными понятиями и представлениями из тех же химических элементов (безусловно, что эти научные понятия и термины были выработаны людьми значительно

© М.И. Баранов

позже [3]) как и Земля. Тем не менее, этот астроном древности не признавал существования пустоты (вакуума). Он считал, что весь бесконечный мир заполнен тончайшим невесомым веществом – эфиром [1].

2. ДОСТИЖЕНИЯ В АСТРОНОМИИ СРЕДНЕВЕКОВЬЯ И ПЕРИОДА 17 – 19 ВЕКОВ

В средние века земной цивилизации в нашем мире появился великий человек, научно "перевернувший" Вселенную, впервые системно описанную ученым-египтянином К. Птолемеем с планетой Земля в центре мироздания. Им оказался выдающийся польский ученый-астроном Николай Коперник (рис. 2), который впервые отказался от геоцентрической системы построения Солнечной системы [1, 4]. Именно с его *гелиоцентрической модели Солнечной системы* и началась подлинная астрономия. В своем знаменитом астрономическом трактате "*Об обращении небесных сфер*" (рис. 3) движение всех небесных тел в ней он объяснял круговым вращением Земли вокруг своей оси и движением планет вокруг нашего Солнца [1].



Рис. 2. Памятник великому польскому ученому-астроному Н. Копернику (1473-1543 гг.), открывшему в 16-ом веке гелиоцентрическое построение Солнечной системы, изображенной на этом фото слева вверху согласно его идее [5]

Следует отметить, что поисками астрономических подтверждений своей отчаянно смелой гипотезы Н. Коперник осторожно занимался не одно десятилетие. Он прекрасно понимал, что его астрономические выводы противоречат точке зрения, принятой церковью. Поэтому он предварительно распространил в научных кругах конспекты своей гипотезы об устройстве нашего мира. Тем самым он пытался оценить реакцию этих влиятельных кругов на его, как могло показаться со стороны, почти безумную идею. Астрономические представления Н. Коперника, практически предложенные им в 1530 году [4], произвели настоящую революцию в науке того далекого от нас времени. Работая над рукописью своего главного научного труда "*Об обращении небесных сфер*" в течение почти 40 лет, он на основании результатов собственных многочисленных астрономических наблюдений убедительно доказал, что Земля является одной из планет Солнечной системы, обращающейся вокруг Солнца по одной из круговых орбит [1]. Кроме того, в указанном трактате Н. Коперник высказал предположение (гипотезу) о существовании между всеми планетами нашей Вселенной сил всемирного тяготения, тем самым задолго предвосхитив совершенное в дальнейшем (в 1687 году) ве-

ликим английским ученым-энциклопедистом Исааком Ньютоном (1643-1727 гг.) в своем фундаментальном трехтомном научном труде "*Математические начала натуральной философии*" научное открытие такого тяготения [1, 4]. Первый экземпляр указанного нами выше научного труда Н. Коперника (см. рис. 3) был отпечатан вручную в г. Нюрнберге (Германия) за несколько недель до его кончины [1]. В отпечатанном виде данный трактат и научный итог всей своей жизни он так и не увидел [5].



Рис. 3. Титульный лист знаменитого астрономического трактата Н. Коперника "*Об обращении небесных сфер*" (1543 год), вышедшего в свет после кончины его автора [1]

Некоторое время в 16-ом веке книга Н. Коперника "*Об обращении небесных сфер*" свободно распространялась среди ученых Европы. В 17-ом веке астрономическое учение Н. Коперника церковью было объявлено ересью, а его вышеуказанная книга запрещена. Ученые мира, которые придерживались научной идеи Н. Коперника об устройстве нашего мироздания, преследовались за "коперниканство" [1]. В настоящее время астрономическое учение выдающегося ученого-поляка Н. Коперника является общепризнанным, доказанным теоретически и подтвержденным экспериментально при помощи космических аппаратов, обследовавших планеты Солнечной системы.

Верным молодым последователем учения Н. Коперника был его практически современник, выдающийся итальянский философ-мыслитель эпохи позднего Возрождения Джордано Бруно (рис. 4), опубликовавший в 1584 году свой знаменитый научный труд "*О бесконечности Вселенной и миров*" [1]. Эта книга Дж. Бруно имела сильный резонанс в тогдашней среде оксфордских профессоров и богословов. Ему пришлось бегством покинуть Англию и перебраться вначале во Францию, а затем и в Германию. Но и там его отлучили от ведения занятий у студентов и чтения публичных лекций на философские темы [5]. Причиной тому были его мировоззренческие взгляды, согласно которым целью науки и философии является познание природы, которая и есть "Бог в вещах" [1]. Опираясь на учение Н. Коперника, он утверждал, что окружающая Землю *Вселенная бесконечна* и что она состоит из множества космических миров. Основу этих миров образуют такие элементы как [1]: земля, вода, огонь, воздух и эфир. Им было высказано пред-

положение, что звезды на ночном земном небосклоне аналогичны нашему Солнцу. Он считал, что в пределах Солнечной системы существуют пока еще не открытые людьми планеты. Он один из первых предположил, что на иных планетах нашей Вселенной возможна органическая жизнь. За подобные рассуждения прогрессивный итальянский мыслитель был арестован инквизицией и заключен в тюрьму. Его книга *"О бесконечности Вселенной и миров"* попала в "Индекс запрещенных книг", издававшийся Ватиканом с 16-го века по 1966 год и ежегодно пополнявший перечень книг, признанных католической церковью еретическими и запрещенными для верующих [1, 2]. Наука на примере Дж. Бруно оказалась перед судом средневековой инквизиции (это понятие происходит от латинского слова *"inquisitio"* – *"расследование"* и означает судебно-следственный орган католической церкви, созданный в средние века для борьбы с ересями и атеизмом и просуществовавший до начала 19-го века).



Рис. 4. Несгибаемый борец за верность научной истине, выдающийся итальянский философ-мыслитель эпохи позднего Возрождения Джордано Бруно (1548-1600 гг.) [1]

После 7 лет заключения в церковной темнице и тщетных попыток по насильственному отречению Дж. Бруно от своих взглядов на мироустройство, 17 февраля 1600 года Дж. Бруно был публично сожжен в г. Риме на площади Кампо деи Фиоре [1]. История сохранила для будущих поколений последние слова несгибаемого борца за науку и прогрессивные взгляды на место нашего мира в бесконечной Вселенной, выдающегося итальянского философа-мыслителя Дж. Бруно [1]: *"Сжечь – не значит опровергнуть"*. В 1889 году, спустя почти три столетия после смерти Джордано Бруно, на месте его казни в г. Риме был воздвигнут памятник одному из самых неукротимых мыслителей эпохи позднего Возрождения (рис. 5) [1].

Активным сторонником коперниканской системы устройства мира был великий итальянский ученый-математик и астроном Галилео Галилей (рис. 6), который и сегодня считается звездой первой величины на мировом научном небосклоне. В 1586 году он написал свою первую научную работу, а в 1589 году (в возрасте 25 лет!) возглавил кафедру математики в знаменитом Пизанском университете (рис. 7), где преподавал одаренным студентам математику и астрономию [1]. Именно тогда им были проведены его знаменитые опыты с Пизанской башни, связанные с изучением влияния веса падающих в поле земного тяготения физических тел на их ускорение [4]. Этими

опытами молодого ученого было опровергнуто незыблемое в течение многих столетий мнение великого древнегреческого ученого-мыслителя Аристотеля, что не на шутку возмутило местную профессию [1].



Рис. 5. Памятник выдающемуся итальянскому мыслителю, верному продолжателю учения Н. Коперника о Солнечной системе Дж. Бруно (площадь Кампо деи Фиоре, г. Рим) [1]



Рис. 6. Памятник великому итальянскому математику и астроному средневековья Г. Галилею (1564-1642 гг.) [1]



Рис. 7. Современный вид трехэтажного корпуса Пизанского университета, в котором молодой Г. Галилей в 1590-е годы преподавал его студентам математику и астрономию [1]

Такая реакция опытных преподавателей и коллег Г. Галилея заставила его перебраться в университет

г. Падуа на аналогичную учебную кафедру [1]. С 1606 года в указанном университете он активно занялся астрономическими исследованиями. Для этого он построил оптический телескоп с выпуклой линзой Ø 53,5 мм и плосковыпуклым окуляром Ø 25 мм (рис. 8), имевший длину 1245 мм и позволявший увеличивать изображение наблюдаемого объекта до 32 раз [5]. С помощью этого прибора Г. Галилей обнаружил на поверхности *Луны* горы и кратеры, что дало ему определенное основание считать Луну, похожую на планету Земля. Тогда же Г. Галилей установил, что *Солнце*, как и Земля, вращается вокруг своей оси [5].

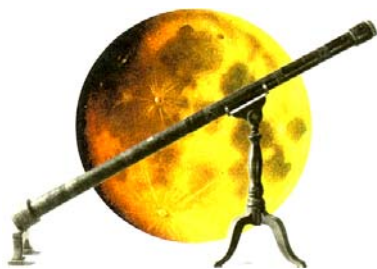


Рис. 8. Оптический телескоп, с помощью которого великий итальянский ученый-астроном Г. Галилей наблюдал изображенную на этом фото Луну, Юпитер и его спутники [5]

Опытные наблюдения Г. Галилея позволили определить пятна на поверхности Солнца. На основании астрономических наблюдений Г. Галилей сделал вывод о том, что вращение вокруг оси свойственно всем небесным телам, а гелиоцентрическая система построения Солнечной системы, предложенная великим польским ученым-астрономом Н. Коперником, является единственно правильной. На рис. 9 представлены ручные зарисовки фаз и видимой с Земли поверхности Луны, выполненные Г. Галилеем с помощью созданного им оптического телескопа. В марте 1610 года Г. Галилей опубликовал свой научный астрономический труд "*Звездный вестник*", который принес ему авторитет в европейской научной среде. В этом же году он открыл **четыре крупнейших спутника** у самой крупной планеты Солнечной системы – **Юпитера**, приведенных на рис. 10 в порядке их радиального удаления от наружной поверхности Юпитера [1].

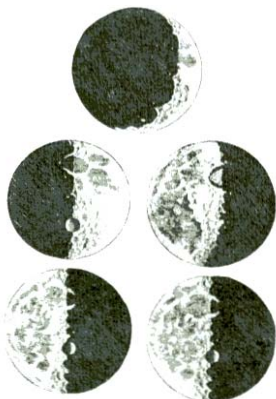


Рис. 9. Зарисовки фаз и видимой с Земли поверхности Луны из рабочей тетради великого научного мэтра Г. Галилея [1]

Заметим, что в настоящее время у астробиологов мира, стремящихся найти вне Земли в Солнечной системе проявление жизни (хотя бы на уровне бактерий), особый интерес вызывает спутник Юпитера – Европа.



Рис. 10. Современные снимки крупнейших спутников Юпитера в порядке их радиального удаления от него (сверху-вниз в одинаковом линейном масштабе: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто), открытых опытным путем великим итальянским ученым-астрономом Г. Галилеем в 17-м веке [1, 5]

Учась в университете г. Тюбинген (Германия) на теологическом факультете, молодой Иоганн Кеплер впервые ознакомился с научными трудами великого польского ученого-астронома Н. Коперника и стал сторонником его астрономических взглядов [1]. В 1594 году после успешного окончания указанного университета И. Кеплера (рис. 11), обладавшего исключительными математическими способностями, пригласили читать лекции студентам университета г. Грац (Австрия), в стенах которого в будущем сформировалась известная европейская школа техники высоких напряжений [1, 4]. Здесь И. Кеплером была опубликована его первая книга "*Тайна мира*", посвященная гармонии нашей Вселенной. Этот научный труд был одобрен самим Г. Галилеем, ставшим к тому времени уже авторитетным ученым. Работая придворным астрономом и астрологом чешского императора Рудольфа II и выполняя в г. Праге астрономические наблюдения с помощью оптического телескопа, И. Кеплер впервые в мире обнаружил на небосклоне **вспышку сверхновой звезды** (рис. 12), названной впоследствии союзом астрономов мира его именем [1].

Изучив собранные за многие годы результаты собственных и чужих наблюдений за планетой Марс, И. Кеплер пришел к важному выводу, что орбита

Марса представляет собой не круг, а эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце [1, 4].



Рис. 11. Выдающийся немецкий ученый-астроном, первооткрыватель математических законов движения всех планет Солнечной системы И. Кеплер (1571-1630 гг.) [1]

Кроме того, ему удалось установить то, что чем дальше от Солнца находится планета, тем она медленнее движется. Он определил, что отношение куба среднего расстояния от планеты до Солнца к квадрату периода ее обращения вокруг Солнца является постоянной величиной. Указанные выше положения составили известные **три закона Кеплера** о движении планет вокруг Солнца (1618 год) [1, 4]. Выдающийся немецко-американский физик-теоретик 20-го столетия Альберт Эйнштейн об Иоганне Кеплере написал следующие известные слова [1]: "Он жил в эпоху, когда еще не было уверенности в существовании общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была его вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и не понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого исследования движения планет и математических законов этого движения!". Нам даже трудно представить себе сколько труда, терпения и изобретательности понадобилось И. Кеплеру во времена средневековья для научного открытия данных законов с помощью весьма примитивных приборов и инструментов.

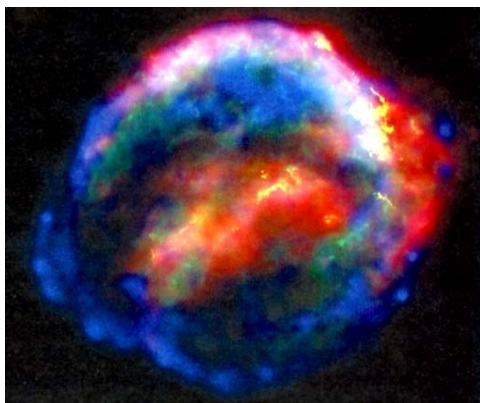


Рис. 12. Уникальное явление в нашей Вселенной – рождение сверхновой звезды, открытой в 1604 году выдающимся немецким астрономом И. Кеплером с помощью простого телескопа и названной впоследствии его именем [5]

Созданные И. Кеплером астрономические таблицы и открытые законы движения планет Солнечной системы он включил в свой главный научный трактат, который назвал "**Рудольфовыми таблицами**" (рис. 13) [1, 5]. Эти таблицы не одно столетие (до 19-го века) служили астрономам и морякам при навигации судов.

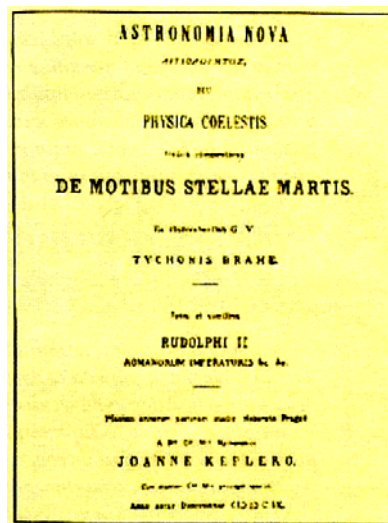


Рис. 13. Титульный лист основного научного труда И. Кеплера – "**Рудольфовы таблицы**" (1625 г.), названного в честь императора Рудольфа II и содержащего сделанные им астрономические открытия в новой астрономии мира [1, 5]

Кеплеровские законы движения планет послужили научной основой великому английскому ученому-физику, математику и астроному Исааку Ньютону (рис. 14) для создания им **теории всемирного тяготения и небесной механики**, изложенных в его фундаментальном трехтомнике "**Математические начала натуральной философии**" (1687 год) [1, 4, 5]. Базируясь на открытых им трех законах механического движения физических тел и фундаментальном законе всемирного тяготения, И. Ньютон впервые дал в этом трехтомном труде (рис. 15) строгое объяснение движению Луны вокруг Земли, разработал теорию морских отливов и приливов на Земле и определил несферическую форму нашей планеты (рассчитал "приплюснутость" ее полюсных областей и "раздутость" ее экваториальных областей) [1]. Научное открытие И. Ньютоном фундаментального закона всемирного тяготения (гравитационного взаимодействия масс), управляющего движением небесных тел, привело к созданию им **новой картины мира**. В ней планеты Солнечной и других систем Вселенной, находящиеся на огромных космических расстояниях друг от друга, оказываются накрепко связанными в одну систему.

В 1668 году И. Ньютоном для осуществления астрономических наблюдений за планетами Солнечной системы впервые в мире был создан уникальный зеркальный телескоп-рефлектор, в котором для достижения лучшего изображения наблюдаемого объекта вместо стеклянной линзы было использовано вогнутое полусферическое зеркало [1, 4]. Исследования И. Ньютона дали ему возможность определить массу и усредненную плотность вещества всех планет Солнечной системы, включая и само Солнце. Его результаты свидетельствовали о том, что наибольшую плот-

ность вещества имеют планеты, расположенные поближе к Солнцу.



Рис. 14. Памятник великому английскому ученому-физику, математику и астроному И. Ньютону (1643-1727 гг.) [6]

Научные открытия И. Ньютона позволили ученым наконец-то дать обоснованный ответ на вековой вопрос астрономов: какая же небесная сила заставляет планеты Вселенной двигаться, так как они двигаются, не падая при этом в нашей системе на Солнце и не улетая от него? Данной силой оказалась сила тяготения. Так Вселенная постепенно раскрывала свои тайны. Именно на рубеже 17-го и 18-го веков усилиями европейских ученых и, прежде всего, такого гениального представителя рода человеческого как И. Ньютона, впервые соединившего к 1686 году мощные математические методы исследования (включая дифференциальное и интегральное исчисление [4]) с экспериментальными данными астрономических наблюдений, была создана небесная механика, ставшая в последующее столетие на Земле "царицей наук" [1].

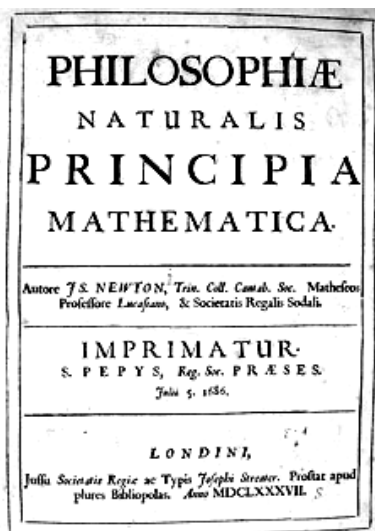
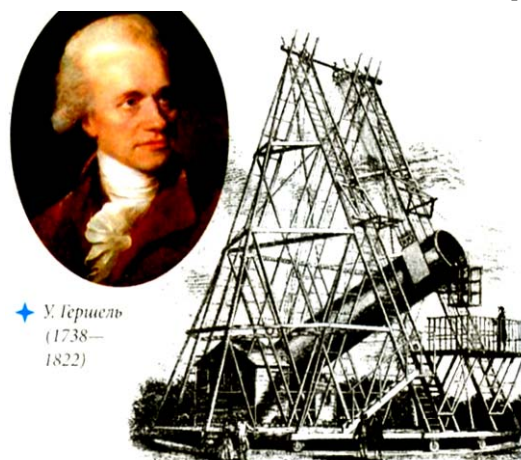


Рис. 15. Титульный лист первого тома научного труда "Математические начала натуральной философии" (1686 год) великого английского физика, математика и астронома И. Ньютона, ставшего главными книгами всей его жизни [6]

Разработки, законы и астрономические открытия И. Ньютона стали научной основой классической физики, математики, классической и небесной механики. Они позволили ему создать "ньютоновскую" теорию

пространства и времени, находящуюся в основе его "концепции дальнего действия", согласно которой во Вселенной через пустое пространство без помощи промежуточной среды (материи) происходит мгновенная передача любого действия от одного физического тела к другому [4, 7]. Отметим, что данная научная концепция с 17-го по 19-й века господствовала в умах ученых всего мира. Принципиально изменить ее позволили выдающиеся результаты научных работ великих английских ученых-физиков Майкла Фарадея (1791-1867 гг.) и Джеймса Максвелла (1831-1879 гг.), предложивших "концепцию близкого действия", согласно которой любые взаимодействия физических тел происходят через промежуточную материальную среду и в течение строго определенного времени [4, 7].

Крупнейшим астрономическим открытием 18-го и 19-го веков считается открытие нашей **Галактики**, первооткрывателем которой является известный английский ученый-астроном Уильям Гершель (1738-1822 гг.) [1, 5]. В современной астрономии считается, что именно У. Гершель (рис. 16) первым "сломав заборы небес" и значительно расширил картину нашего мироздания. Заметим, что при этом наши представления о Вселенной развивались следующим образом. Астрономические данные вначале показали людям, что Земля не является центром Солнечной системы и что Солнце находится в центре нашей системы. Затем человечеству стало ясно, что сама Солнечная система расположена далеко от центра нашей Галактики и что наша космическая Галактика представляет собой одну из многочисленных Галактик нашей Вселенной [1, 5].



★ У. Гершель
(1738—
1822)

Рис. 16. Схематическое изображение уникального 40-футового оптического телескопа выдающегося английского астронома 18-19-го веков У. Гершеля (1738-1822 гг.) [5]

На основании астрономических наблюдений, выполненных У. Гершелем с помощью уникального оптического телескопа длиной около 12 м собственной разработки (см. рис. 16), было доказано, что наш звездный мир имеет в общемировом космическом пространстве – Вселенной свои достаточно определенные границы. Естественно, что эти границы являются нечеткими, но дающими нам – землянам представления о том, где мы с нашей Солнечной системой и нашей Галактикой находимся. Принято считать, что талантливый У. Гершель, плодотворно занимавшийся и музыкальным искусством, вдвое расширил для че-

ловечества Солнечную систему и фактически открыл движение Солнца в бесконечном космическом пространстве [1, 5]. Укажем здесь, что 13 марта 1781 года У. Гершель совершил свое первое и важное астрономическое открытие – он впервые обнаружил планету **Уран** (рис. 17) в нашей Солнечной системе [1, 5].

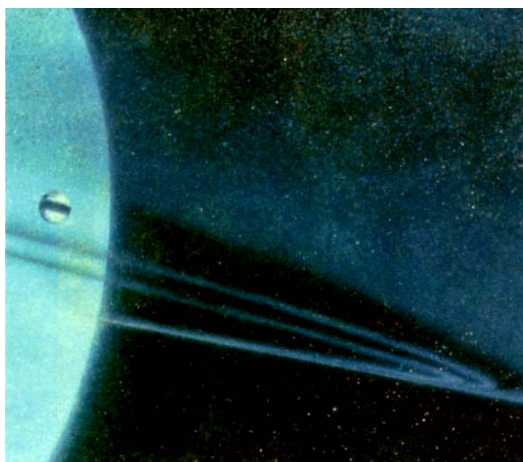


Рис. 17. Фрагмент планеты Уран (слева фото), ее спутник Пак на фоне светлой поверхности Урана и кольца этой планеты на фоне темного космоса, полученные в 1980-е годы с американского космического аппарата "Вояджер-2" [5]

Только благодаря одному этому научному открытию выдающийся английский ученый-астроном У. Гершель вошел бы в векообразующие этапы изучения человеком Вселенной и анналы мировой науки.

3. СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В АСТРОНОМИИ

Если в период 16-19-го веков успехи в астрономии определялись кропотливым трудом выдающихся ученых-одиночек, то начиная с 20-го столетия эти успехи стали определяться коллективами отдельных предприятий ракетно-космической отрасли, научно-исследовательских институтов и лабораторий (обсерваторий). В связи с этим выдающийся советский авиаконструктор, дважды Герой Труда, академик АН СССР Сергей Владимирович Ильюшин говорил следующее [8]: *"Создание коллектива единомышленников в науке и практике проектирования, творцов и энтузиастов своего дела – задача не менее сложная, чем, например, разработка хорошего проекта"*. Создав подобные коллективы творческих людей, передовые страны мира активно принялись, прежде всего, за изучение и освоение ближних и дальних планет Солнечной системы. Наиболее близким к Земле космическим телом оказался наш небесный спутник **Луна**, удаленный от нас на расстоянии около $300 \cdot 10^3$ км [1].

Покорение Луны. Для беспилотного или пилотируемого полета к Луне с Земли космический аппарат, вначале став земным искусственным спутником со скоростью почти кругового движения не менее $28,1 \cdot 10^3$ км/ч ($7,8$ км/с – первая космическая скорость), что примерно в 10 раз быстрее летящего пушечного снаряда, должен был далее ускориться до скорости $40,3 \cdot 10^3$ км/ч ($11,2$ км/с – вторая космическая скорость) [7] и оторваться от притяжения гравитационных сил (сил тяготения) Земли. Для этого землянам необходимо было вначале надежно освоить первую космическую скорость (сначала осуществить беспилотные полеты в

1957-1958 гг. первых искусственных спутников вокруг Земли, а затем позже в 1961-1962 гг. запустить на околоземную орбиту первого космонавта мира **Юрия Алексеевича Гагарина** и других советских и американских космонавтов и астронавтов [9]). Поэтому только 2 января 1959 года в СССР был осуществлен успешный запуск лунного спутника "Луна-1" весом около 752 кг [8]. В его задачу входило исследование магнитного поля Луны, определение интенсивности космических лучей за пределами земной магнитосферы и уточнение расположения радиационных поясов вокруг Луны. Полеты советских спутников "Луна-1" (прошел на расстоянии около $5 \cdot 10^3$ км от поверхности Луны и стал искусственным спутником Солнца) и "Луна-2" (весом 782 кг) показали, что радиационных поясов у Луны нет, а индукция постоянного магнитного поля Луны примерно в 1000 раз меньше индукции постоянного геомагнитного поля, составляющей в среднем в зоне экватора Земли около 50 мкТл [9, 10]. Спутник "Луна-2" доставил на лунную поверхность вымпел с изображением Государственного герба СССР. Так впервые в мире аппарат, созданный человеком на планете Земля, оказался на Луне. Факт попадания этого спутника в Луну был подтвержден и западными астрономами, зафиксировавшими появление облака лунной пыли на северных склонах лунных Апеннин в месте его жесткого прилунения (падения) [8]. Запущенный 4 октября 1959 года в СССР спутник "Луна-3" (весом 278 кг) впервые в мире произвел с высоты примерно $60 \cdot 10^3$ км (в течение 40 мин) фотосъемку постоянно скрытой от землян обратной стороны Луны [8]. Это астрономическое событие явилось выдающимся научно-техническим достижением. 3 февраля 1966 года состоялась мягкая посадка на Луну советской автоматической космической станции "Луна-9" [8]. На Землю этой станцией были переданы панорамные снимки лунного ландшафта. Полученные с ее помощью данные опровергли мнение о том, что на поверхности Луны имеется глубокий пылевой слой. Полет советской "Луны-9" подготовил научную "почву" для высадки на Луну пилотируемых космических кораблей землян. Первая такая высадка американских астронавтов на Луну состоялась 20 июля 1969 года (**Нейл Армстронг**, спустившийся с окололунной орбиты на естественный спутник Земли в лунном модуле космического корабля "Аполлон-11", стал первым из землян, вступившим на поверхность Луны) [9]. Это грандиозное научно-техническое достижение человечества продемонстрировало его потенциальные возможности в освоении планет Солнечной системы. 1970 год увенчался очередными достижениями советской космонавтики в освоении Луны: автоматическая станция "Луна-16" доставила на Землю около 100 г лунного грунта, а первый луноход, передвигаясь по лунному Морю Дождей, выполнил обширную программу научных исследований поверхности Луны [8].

Изучение Меркурия. В 1973 году США был запущен зонд "Маринер-10" для исследования планеты **Меркурий**, наиболее близко кружащей вокруг Солнца. С его помощью были получены общие виды самой малой и безжизненной планеты Солнечной системы.

Изучение Венеры. В 1962 году был направлен амери-

канский космический зонд "Маринер-2" для изучения "утренней" звезды – планеты **Венера**, являющейся космической "соседкой" Земли. Снимки этой планеты, полученные на Земле с помощью пролетавшего мимо нее "Маринер-2", поставили перед астрономами США больше вопросов, чем дали ответов. 22 и 25 октября 1975 года СССР в сторону данной планеты запустил автоматические станции "Венера-9" и "Венера-10", ставшие со временем ее искусственными спутниками. Спускаемые аппараты этих станций совершили мягкую посадку на поверхность Венеры в разных районах. Во время снижения с орбиты спускаемых аппаратов были выполнены комплексные исследования атмосферы Венеры. На Землю были переданы изображения ее поверхности. Приборы на поверхности Венеры показали, что температура ее плотной атмосферы составляет около плюс 470 °С, а давление имеет уровень в 90 атм. Признаков биологической жизни на планете Венера советскими космическими аппаратами установлено не было. В 1996 году американский космический зонд "Магеллан" сделал серию уточняющих снимков поверхности Венеры.

Изучение Марса. В 1976 году США к празднованию 200-летия своего основания запустили космический аппарат "Викинг" для обнаружения признаков возможной органической жизни на четвертой от Солнца планете – **Марсе**, удаленном от Земли на расстоянии около $55 \cdot 10^6$ км. Севший на марсианскую поверхность американский аппарат "Викинг" сообщил на Землю, что эта планета является сплошной выжженной пустыней красного цвета, температура на поверхности которой в ночное время опускается до минус 100 °С. Биологические исследования данным аппаратом приповерхностного марсианского грунта не подтвердили наличия в нем каких-либо микроорганизмов. Так что важнейший вопрос для нас "Есть ли жизнь на Марсе?" остается на настоящее время пока открытым [8]. Сутки на Марсе длятся 24,5 ч, что почти равно длительности земных суток. На Марсе обнаружены геометрически правильные фигуры – пирамиды искусственного происхождения, высота которых (до 500 м) значительно превосходит известные земные (например, в Египте). Кроме того, на поверхности Марса путем астрономических наблюдений были обнаружены трубопроводы диаметром до 300 м и длиной до 40 км. Отметим и о том историческом факте, что в комплексе доступных для туристов земных пирамид Тиопокана, размещенных в Центральной Америке (Мексике), соотношение высот для двух соседних пирамид, находящихся по мнению известных в мире специалистов-археологов в древнем построении Солнечной системы, составляет 1:0,532 (оно в точности равно соотношению диаметров Земли и Марса). На поверхности Марса в долине Моринера имеются трещины глубиной до 12 км, шириной до 200 км и длиной до 1000 км, что свидетельствует о глобальных катастрофических событиях в прошлом на этой "красной" планете нашей системы. Астрономы предполагают, что подобные разрушения на Марсе могли быть вызваны падением на эту планету ее спутника Танатиса.

Изучение Юпитера и его спутников. Общеизвестно, что земная форма жизни базируется на жидком со-

стоянии воды, определяемой химической формулой H_2O , состоящей из двух атомов водорода и одного атома кислорода. В этой связи ученые мира поиски жизни вне Земли, главным образом, свели к поиску жидкой воды. Если где-то во Вселенной удастся ее обнаружить, то там, видимо, могут существовать и живые организмы (хотя бы бактерии). В 1979 и 1981 годах США для поиска признаков биологической жизни в космосе, изучения удаленных планет Солнечной системы и определения границы распространения в ней "солнечного ветра" (потока космических лучей от Солнца) были запущены космические зонды "Вояджер-1" и "Вояджер-2". Эти зонды обнаружили на **Юпитере**, являющейся самой большой планетой Солнечной системы (в 1000 раз по объему крупнее Земли), и **Сатурне** (рис. 18) наличие полярных сияний, являющихся результатом взаимодействия "дыхания Солнца" ("солнечного ветра") и магнитосфер этих планет. Для лучшего восприятия этих электрофизических явлений в полярных областях атмосфер планет, имеющих собственные постоянные магнитные поля, приведем ниже изображение северного сияния на планете Земля (рис. 19) [1]. Заметим, что зеленый цвет в этом сиянии определяют атомы и молекулы кислорода, а фиолетовый – атомы и молекулы азота, бомбардируемые быстрыми частицами "солнечного ветра". Прошло уже более 30 лет автономного полета космического зонда "Вояджер-2". С него электромагнитный сигнал на Землю "идет" в космическом вакууме только в одну сторону около 15 мин. Сейчас этот космический аппарат находится на краю Солнечной системы и соответственно в зоне ее условной границы с межзвездным мировым пространством. Регулярно поступающая на Землю телеметрическая информация с американского зонда "Вояджер-2" подтверждает наличие резко ослабленного, а точнее очень слабого, "солнечного ветра" и в этих наиболее удаленных точках нашей Солнечной системы. Отметим, что "солнечный ветер" в открытом космосе распространяется со скоростью около 300 км/с (при скорости Земли в космическом пространстве до 30 км/с [1]). На спутнике Юпитера – **Европе** (см. рис. 10) под ее поверхностью с американского космического зонда "Вояджер-2" в свое время с большой вероятностью было обнаружено наличие моря, состоящего из жидкой воды. Это обстоятельство обнадеживает астробиологов, ищущих в космосе внеземную жизнь. На спутнике Юпитера – **Ио** (см. рис. 10) астрономами выявлена очень активная вулканическая деятельность. Этот спутник, имеющий разреженную атмосферу, находится от безжизненной поверхности Юпитера на расстоянии до $300 \cdot 10^3$ км (как и Луна от Земли). Спутник Ио – одно из физических чудес в Солнечной системе. Вулканы на нем извергаются на высоту до 500 км [5]. Кратеры подобных вулканов с раскаленной лавой на спутнике Ио имеют диаметр до 180 км. Заметим, что на Земле сейчас только в одном месте (в Африке, Эфиопии) имеется действующий вулкан с наличием зеркала постоянной лавы диаметром около 100 м. Кстати, поверхностная температура жидкой лавы в этом эфиопском вулкане составляет около 800 °С [5].

Изучение Сатурна. Учеными-астрономами и астро-

биологами в настоящее время считается, что на планете Сатурн, как и на Юпитере, проявлений органической жизни нет. Как известно, для ее существования в привычной нам земной форме, прежде всего, необходимы: источник энергии, жидкая вода, аминокислоты, углерод, кислород и другие вещества [5]. На рис. 18 приведено изображение планеты **Сатурн** с ее знаменитым полосатым кольцом из вращающихся тел [5].



Рис. 18. Планета Сатурн и увеличенный фрагмент его полосатого кольца из множества замерзших и вращающихся по круговым орбитам тел (на фото в области нижнего полюса Сатурна светящимся голубым кольцом обозначено полярное сияние, вызванное взаимодействием его магнитосферы с потоком заряженных частиц "солнечного ветра") [5]

С помощью американского космического зонда "Вояджер-2" в 1980-е годы были получены уникальные кадры "огненных" и изменяющихся во времени колец в полярных областях Сатурна, вызванных полярными сияниями на этой удаленной от нас планете.



Рис. 19. Внешний вид завораживающего северного сияния на Земле в ее заполярных областях (на данном фото "языки-вспальхи" арктического сияния имеют зеленый цвет) [1]

Изучение Нептуна. Планета **Нептун** (рис. 20) имеет наибольший спутник в Солнечной системе – Титан [1]. Астрономические исследования показали, что на Титане есть жидкий метан в больших объемах. В этой связи у ученых мира возникают предположения о возможном существовании внеземной жизни на иных планетах Вселенной в форме, не похожей на земную.

Изучение галактик. В состав нашей Галактики "Млечный путь", открытой в 19-ом веке выдающимся английским астрономом У. Гершелем, входит миллиарды звезд, подобных нашему Солнцу [5]. Наша Солнечная система оказалась на самом краю этого скопления звезд и миров. Если смотреть с космоса на нашу **Галактику** "сбоку", то она будет напоминать нам приплюснутую выпуклую линзу. Если смотреть на

нее с космоса "сверху", то она будет содержать спиральные "ветви", имеющие яркие звезды и межзвездный газ [5].

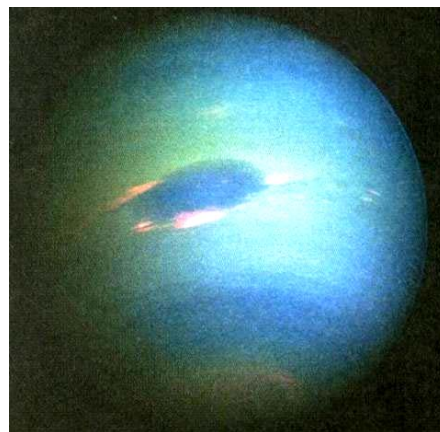


Рис. 20. Современное космическое фото планеты Нептун [5]

При этом наша Галактика будет похожа на недавно открытую людьми спиральную Галактику NGC 4414 из созвездия Волосы Вероники (рис. 21) [5]. Сейчас в астрономии считается, что на облет Солнца и соответственно нашей Солнечной системы с Землей вокруг центра Галактики "Млечный путь" необходимо около $200 \cdot 10^6$ лет [1]. Эта гигантская временная цифра и равна одному галактическому году. Современная астрономия в поисках разгадки происхождения нашей Вселенной опирается пока на космогоническую теорию "Большого взрыва", предложенную в 20-ом столетии Ж. Леметром и Д. Гамовым [5].



Рис. 21. Современное изображение спиральной Галактики NGC 4414 из космического созвездия Волосы Вероники диаметром около $56 \cdot 10^3$ световых лет [5]

В 2008 году США запустили во Вселенную космический телескоп "Кеплер" для наблюдения за планетами и созвездиями, расположенными вне Солнечной системы. За практически четыре года его автономного полета в космосе с его помощью уже открыто 33 планеты с возможностью обитания на них живых организмов, находящиеся в созвездии Лебедя, Лиры и Дракона. По мнению современных ученых-астрономов только в нашей космической Галактике "Млечный путь", в которую входит и Солнечная система, могут существовать тысячи центров биологической жизни. Отметим, что в середине прошлого века была разработана теория расширения нашей Вселенной, автором

которой стал известный российский ученый-космолог А. Фридман [1, 5]. Астрономические наблюдения, выполняемые с Земли с помощью уникальных стационарных оптических телескопов (рис. 22) и радиотелескопов (рис. 23), а также путем использования уникальных американских космических телескопов "Хаббл" [9] и "Кеплер", подтверждают, что космические Галактики продолжают удаляться от Земли, Солнечной системы и нашего "Млечного пути". Следовательно, наша Вселенная расширяется [5].

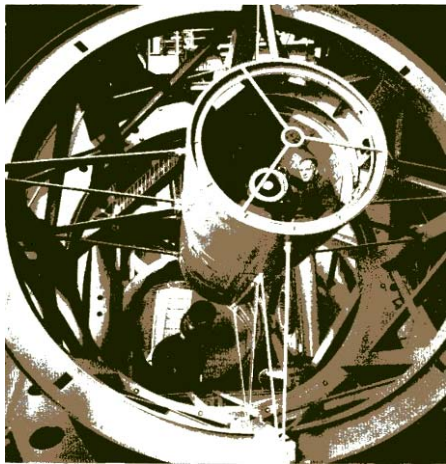


Рис. 22. Стационарный оптический телескоп Хейла "Большой глаз" диаметром 5 м, установленный в американской астрофизической обсерватории Маунт-Паломар (США) [5]

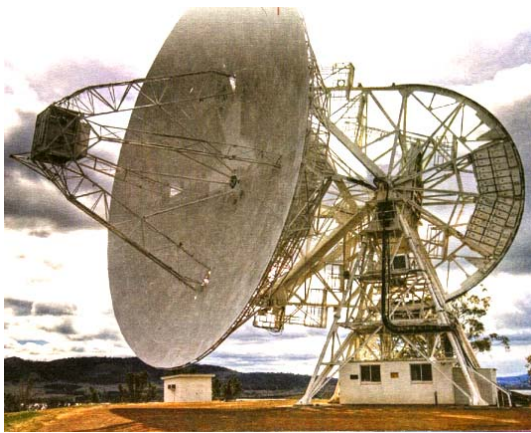


Рис. 23. Современный стационарный радиотелескоп, установленный астрономами на поверхности планеты Земля и позволяющий обнаруживать интенсивные источники электромагнитного излучения в глубинах нашей Вселенной [1]

В 20-ом столетии выдающийся американский астроном Эдвин Хаббл (1889-1953 гг.), в честь которого и был назван упомянутый нами выше уникальный космический телескоп США, "парящий" сейчас на околоземной орбите, открыл фундаментальный закон, согласно которому скорость взаимного космического "разбегания" (отдаления) Галактик Вселенной прямо пропорциональна расстоянию между ними [1, 5]. В последние годы в астрономии нашли применение телескопы нового поколения, предназначенные для оптических инфракрасных наблюдений (рис. 24) [11].

Изучение квазаров. Современные наблюдения за космосом позволили открыть в нем новые астрономические объекты – **квазары** (это название происходит от английского слова "*quasar*", определяемого слово-

сочетанием "*quasistellar radiosource*" и означающего "*квазизвездный источник излучения*" [2]), внешний вид одного из которых приведен ниже на рис. 25 [1].



Рис. 24. Современный инфракрасный телескоп для исследования теплового излучения космических объектов [11]



Рис. 25. Современное изображение спиральной Галактики и нового вида космического объекта – квазара, впервые открытого в 1963 году известным американским астрономом Мартином Шмидтом (на этом фото квазар изображен справа сверху как ярко сияющее созвездие) [1]

Квазары как интенсивные космические источники радиоизлучения находятся от Земли и Солнечной системы на расстояниях, оцениваемых радиоастрономами в миллиарды световых лет [2, 5]. Их светимость в сотни раз больше светимости Галактик. Размеры же квазаров в десятки раз меньше размеров космических Галактик [2, 5]. На рис. 26 показан современный внешний вид квазара с радиально расходящимися от него раскаленными лучами-струями космического газа, длина которых оценивается радиоастрономами мира в величины порядка пяти тысяч световых лет [1]. Это изображение квазара было получено с помощью уникального американского орбитального оптического телескопа "Хаббл", в котором исключается паразитное влияние на получаемое в телескопе изображение космического объекта относительно плотной земной атмосферы. Радиоастрономы при изучении квазаров применяют и другие уникальные научные приборы. Например, крупнейший в мире американский радиоте-

лескоп "Арасибо", установленный в Центральной Америке и имеющий рефлектор диаметром до 300 м.



Рис. 26. Современное изображение квазара с вырывающимися из его центра лучами-струями раскаленного газа длиной около $5 \cdot 10^3$ световых лет (фото было сделано в 1990-е годы американским космическим телескопом "Хаббл") [1]

Изучение "черных дыр" космоса. Космические "черные дыры" (рис. 27) являются одними из самых удивительных физических явлений во Вселенной. Ими называются особые области космического пространства, в которых гравитационное притяжение настолько велико, что покинуть эти области не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света [1, 5]. "**Черные дыры**" космоса всасывают в себя межзвездное вещество и все виды излучений. Существование во Вселенной "черных дыр" было теоретически предсказано в 1916 году европейским астрофизиком Карлом Шварцшильдом на основании уравнений теории относительности выдающегося физика-теоретика Альберта Эйнштейна [1, 5]. При поглощении ими любого вещества выделяется огромное количество энергии.



Рис. 27. Современное имитационное изображение космической "черной дыры", являющейся и поныне самым загадочным физическим явлением в нашей Вселенной [1]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов А.А. Большая книга знаний. – Харьков: Веста, 2010. – 160 с.
2. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: Открытие периодического закона химических элементов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – №2. – С. 3-9.
4. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.
5. Скляренко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.
6. http://ru.wikipedia.org/wiki/Ньютон_Исаак.
7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
8. Асташенков П.Т. Орбиты главного конструктора. – М.: ДОСААФ, 1973. – 169 с.
9. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 18: Ракетная техника и покорение ближнего космоса // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – №1. – С. 3-14.
10. Баранов М.И. Уточненная математическая модель электрического источника постоянного геомагнитного поля // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – №1. – С. 62-68.
11. <http://www.astrotime.ru/history.html>.

Поступила (received) 27.07.2012

Bibliography (transliterated): 1. Klimov A.A. *Bol'shaja kniga znaniy*. Har'kov, Vesta Publ., 2010. 160 p. 2. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov*. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. 3. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 1: Discovery of periodic law of chemical elements. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.2, pp. 3-9. 4. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology: monograph in 2 volumes. Vol.1, Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. 5. Skljarenko V.M., Sjadro V.V. *Otkrytija i izobretenija*. Har'kov, Vesta Publ., 2009. 144 p. 6. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/N'juton_Isaak (accessed 27 May 2012). 7. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989. 864 p. 8. Astashenkov P.T. *Orbity glavnogo konstruktora*. Moscow, DOSAAF publ., 1973. 169 p. 9. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 18: Rocket engineering and near-space exploration. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.1, pp. 3-14. 10. Baranov M.I. A refined mathematical model of the electric source of the permanent geomagnetic field. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 62-68. 11. Available at: <http://www.astrotime.ru/history.html> (accessed 12 May 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 19: Deep space study and exploration.

A brief scientific and historical essay on the history of studies of the Solar System planets and other outer-space worlds in our infinite Universe is given.

Key words – history, deep-space study and exploration.

ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С КРУГОВЫМИ И ШЕСТИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ СТЕРЖНЕЙ ВИТЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат активної потужності та виконано порівняльний аналіз енергетичної ефективності трифазних аксіальних просторових електромагнітних систем з круговими і шестикутними конфігураціями перерізів стрижнів витого секціонованого стикового магнітопроводу.

Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критерию минимума потерь активной мощности трансформатора и выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности трехфазных аксиальных пространственных электромагнитных систем с круговыми и шестиугольными конфигурациями сечений стержней витого секционированного стыкового магнитопровода.

ВВЕДЕНИЕ

Конструктивно-структурные схемы планарных электромагнитных систем (ЭМС) большинства состоящих в производстве трехфазных трансформаторов (ТТ) практически неизменны в течение более столетия [1-4]. Характеристики таких ТТ улучшены во второй половине прошедшего века на основе применения взамен листовой изотропной рулонной изотропной электротехнической стали (ЭТС) [1-4]. Также было освоено производство ТТ с пространственными комбинированными и витыми магнитопроводами [1]. В настоящее время снижение потерь трансформаторов достигается использованием для изготовления магнитопроводов и обмоток соответственно изотропной аморфной ЭТС, транспонированных и ленточных обмоточных проводов [2-5]. В [3] перспективным направлением решения задач новых разработок ТТ мощностью 25...630 кВ·А определено создание пространственных витых разъемных магнитопроводов. Замена в ЭМС обмотываемых челночным станком моноблочных витых магнитопроводов на разрезные стыковые позволяет снизить металлоемкость и обеспечить ремонтпригодность ТТ. Однако возможности дальнейшего энергоресурсосбережения при производстве и эксплуатации конструкций ЭМС с "традиционными" прямоугольными и круговыми образующими контурами (ОК) стержней и катушек обмоток "классическими" способами [6] ограничены достигнутым низким уровнем потерь и пределами физических свойств материалов. Поэтому основным фактором будущего развития трансформаторов с высокой энергетической эффективностью представляется усовершенствование их конструкций на основе структурных преобразований ЭМС [6, 7].

Вариантом структурных преобразований ЭМС с различными исполнениями и технологиями изготовления магнитопроводов является замена круговых ОК сечений стержней и катушек обмоток (рис. 1) на "нетрадиционные" шестиугольные ОК (рис. 2). Такая замена улучшает на 15...20 % показатель компактности и несколько улучшает массосстоимостные показатели трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с витым трехсекционным магнитопроводом, что очень важно, в частности, для объектов специальной техники [7-9].

Целью работы является сравнительный анализ, в дополнение к [8], потерь активной мощности вариантов пространственной аксиальной ЭМС ТТ с витым трехсекционным магнитопроводом (рис. 1, 2).

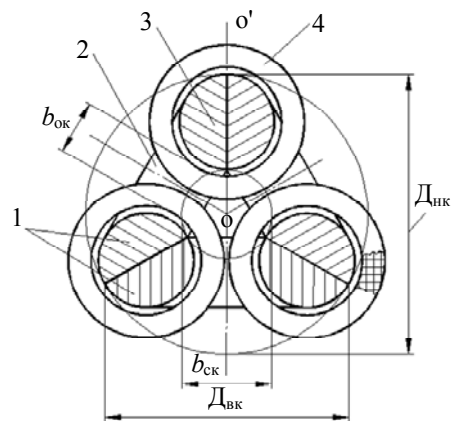


Рис. 1. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

ОСОБЕННОСТИ И МЕТОД АНАЛИЗА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СРАВНИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

В ЭМС (рис. 1, 2) магнитопроводы образуют двухконтурные фазные элементы (участки, охваченные обмоточными катушками) с независимыми (при отсутствии уравнивающего перераспределения магнитного поля в стержневых стыках на оси OO' рис. 1 и рис. 2) секционными магнитными потоками. Вследствие индивидуальности контуров замыкания силовых линий магнитного поля, амплитуды первых гармоник индукции и потоков каждой секции и стержней отличаются в $2/\sqrt{3}$, а магнитный режим характеризуется наличием секционных гармоник поля кратных трем, что приводит к возрастанию добавочных потерь холостого хода ТТ с ЭМС (рис. 1, 2) [1, 3]. При этом амплитуды потоков секций и стержней практически не отличаются, так как третьи гармоники снижают средние значения амплитуд индукции каждой секции B_c до средних значений амплитуды

индукции стержня B_c . Поэтому при расчетах основных потерь в стали ЭМС (рис. 1, 2) принимается $B_c = B'_c$ [1].

Замена круговых ОК на шестигранные ОК дополнительно к улучшению массогабаритных показателей снижает трудоемкость производства, а также массу и потери в стали магнитопровода и обеспечивает коэффициент заполнения ОК сечения стержня $K_{\text{кш}} \approx 1$, но повышаются средние длины витков катушек, а также материалоемкость и потери обмоток [8].

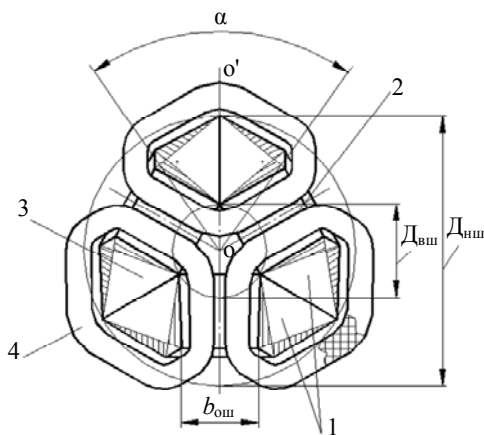


Рис. 2. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

При сравнительном анализе энергетической эффективности ЭМС (рис. 1, 2) принимаются следующие известные допущения [8, 10, 11]. Используется конструкция обмоток с чередующимися фазными катушками и средними витками, расположенными на четверти ширины $b_{\text{ок(ш)}}$ обмоточного окна. В таких обмотках одинаковы плотности фазных токов ($j_{01} = j_{02} = j_0$) высокого и низкого напряжений. Исходя из принципа электромагнитной эквивалентности при сравнительном анализе, принимаются соответственно идентичными электромагнитные нагрузки (ЭМН) – плотности фазных токов проводников катушек ($j_{\text{ок}} = j_{\text{ш}} = j_0$) и средние (по сечению) значения амплитуд магнитной индукции в секциях магнитопроводов ($B'_{\text{ск}} = B'_{\text{сш}} = B'_c$) ЭМС с круговыми и шестигранными ОК. Также соответственно идентичными являются коэффициенты заполнения обмоточного окна ($K_{\text{зок}} = K_{\text{зш}} = K_{\text{зо}}$) и коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС ($K_{\text{зск}} = K_{\text{зсш}} = K_{\text{зс}}$).

Значение коэффициента полезного действия трансформатора определяется суммой потерь холостого хода и потерь короткого замыкания (нагрузочных) [1, 2]. Указанная сумма на основе метода относительных коэффициентов показателей технического уровня [10] представляется полной целевой унимодальной функцией потерь активной мощности $F_{\text{пк}}$ и $F_{\text{пш}}$ вариантов ЭМС соответствующих рис. 1 и рис. 2

$$F_{\text{пк(ш)}} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}})^3 K_{\text{п}} \Pi_{\text{пк(ш)}}^*, \quad (1)$$

где $\Pi_{\text{и}}$ – идентичный для сравниваемых ЭМС показатель исходных данных и ЭМН ТТ; $K_{\text{п}}$ и $\Pi_{\text{пк(ш)}}^*$ – коэффициент потерь холостого хода и относительный коэффициент потерь активной мощности в номинальном режиме вариантов ТТ с ЭМС (рис. 1, 2).

Коэффициенты $K_{\text{п}}$ и $\Pi_{\text{пк(ш)}}^*$ определяются выражениями:

$$K_{\text{п}} = K_{\text{дх}} \gamma_c P_{1/50} (f/50)^{1.5} (B'_c)^2;$$

$$\Pi_{\text{пк}}^* = f(K_{\text{зо}}, K_y, a_m, \lambda_o); \quad (2)$$

$$\Pi_{\text{пш}}^* = f(K_{\text{зо}}, K_y, \alpha_c, a_m, \lambda_o), \quad (3)$$

где $K_{\text{дх}}$ – коэффициент добавочных потерь холостого хода [1]; γ_c – плотность ЭТС; $P_{1/50}$ – удельные потери ЭТС магнитопровода при частоте $f = 50$ Гц и значении индукции 1,0 Тл; K_y – коэффициент удельных показателей и ЭМН; α_c – центральный угол стержня магнитопровода ЭМС (рис. 2); a_m – отношение наружного $D_{\text{нк(ш)}}$ и внутреннего $D_{\text{вк(ш)}}$ диаметров расчетных окружностей магнитопровода; λ_o – отношение высоты $h_{\text{ок(ш)}}$ и ширины $b_{\text{ок(ш)}}$ обмоточного окна,

$$a_m = D_{\text{нк(ш)}} / D_{\text{вк(ш)}}; \quad (4)$$

$$\lambda_o = h_{\text{ок(ш)}} / b_{\text{ок(ш)}}. \quad (5)$$

Входящий в (2) и (3) относительный коэффициент K_y для рассматриваемых ЭМС определяется соотношением

$$K_y = K_{\text{дк}} \gamma_o P_{y0} j_o^2 / [K_{\text{дх}} \gamma_c P_{1/50} (f/50)^{1.5} (B'_c)^2], \quad (6)$$

где γ_o и P_{y0} – плотность и коэффициент удельных потерь активного материала обмотки; $K_{\text{дк}}$ – коэффициент добавочных потерь короткого замыкания [1].

Диапазон изменения значений $K_{\text{п}}$ и K_y является идентичным для сравниваемых ЭМС, а по величинам $\Pi_{\text{пк(ш)}}^*$, а также относительным показателям массы $\Pi_{\text{мк(ш)}}^*$ и стоимости $\Pi_{\text{ск(ш)}}^*$ [8] можно определить целесообразность замены в ЭМС с витым симметричным трехсекционным магнитопроводом круговых ОК (рис. 1) на шестигранные ОК (рис. 2).

При принятых допущениях потери холостого хода $P_{\text{ххк(ш)}}$ и потери короткого замыкания $P_{\text{кзк(ш)}}$ ЭМС ТТ определяются известными, например из [11], уравнениями:

$$P_{\text{ххк(ш)}} = K_{\text{дх}} P_{1/50} (f/50)^{1.5} (B'_c)^2 m_{\text{мк(ш)}}; \quad (7)$$

$$P_{\text{кзк(ш)}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_o P_{y0} j_o^2 K_{\text{зо}} \lambda_o l_{\text{вк(ш)}} b_{\text{ок(ш)}}^2, \quad (8)$$

где $m_{\text{мк(ш)}}$, $l_{\text{вк(ш)}}$ и $b_{\text{ок(ш)}}$ – соответственно масса ЭТС магнитопровода, средняя длина витка катушки и ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 1, рис. 2).

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОТЕРЬ СРАВНИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Входящие в (7), (8) технико-геометрические характеристики определяются полученными в [8] уравнениями:

$$m_{\text{мк}} \approx 2,0665 \gamma_c K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}} / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} K_{\text{кк}} f_{\text{к}} (a_m, \lambda_o)]} \right)^3 \times \left[\lambda_o + 1 \right] (1 - 0,0718 a_m) (a_m - 1)^2 + 0,65654 (a_m - 1)^3 \quad (9)$$

$$l_{\text{вк}} = 1,46555 D_{\text{вк}} (a_m - 0,07181); \quad (10)$$

$$b_{\text{ок}} = 0,933 D_{\text{вк}} (1 - 0,0718 a_m); \quad (11)$$

$$m_{\text{мш}} = 1,5 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}} / [3 K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o f_{\text{ш1}} (a_m, \alpha_c) f_{\text{ш3}} (a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \left[f_{\text{ш1}}^2 (a_m, \alpha_c) F_{\text{ш1}} (a_m, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{ш1}} (a_m, \alpha_c) \times \right. \quad (12)$$

$$\left. \times f_{\text{ш2}} (a_m, \alpha_c) F_{\text{ш2}} (a_m, \lambda_o, \alpha_c) \right] \gamma_c K_{\text{зс}} \cdot l_{\text{вш}} = 1,1547 D_{\text{вш}} [f_{\text{ш1}} (a_m, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{ш2}} (a_m, \alpha_c) + 1,1781] \quad (13)$$

$$b_{\text{ош}} = \sqrt{3} D_{\text{вш}} / 2, \quad (14)$$

где $K_{\text{кк}}$ – коэффициент заполнения кругового ОК поперечным сечением стержня, составляет постоянное значение $K_{\text{кк}} = 0,904$ для трехфазных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А [1]; $f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}})$, $f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$, $f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$, $f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$, $F_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}})$, $F_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}})$ – функциональные множители,

$$f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}) = \lambda_{\text{о}}(1 - 0,0718a_{\text{м}})^2(a_{\text{м}} - 1)^2;$$

$$f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = (a_{\text{м}} + 1) \lg(\alpha_{\text{с}}/2);$$

$$f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = a_{\text{м}} - 1 - f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/\sqrt{3};$$

$$f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = a_{\text{м}} - 1 - f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/(2\sqrt{3});$$

$$F_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) = 1 + \lambda_{\text{о}} + \pi f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/2;$$

$$F_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) = 1 + \lambda_{\text{о}} + \pi f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/4.$$

Диаметры $D_{\text{вк}}$ и $D_{\text{вш}}$ связаны с $\Pi_{\text{и}}$ выражениями [8]:

$$D_{\text{вк}} = 1,555\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}/[K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}K_{\text{кк}}f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}})]}; \quad (15)$$

$$D_{\text{вш}} = 2\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}/[3K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_{\text{о}}f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})]}. \quad (16)$$

Суммарные потери рассматриваемых ЭМС определяются, на основе (6) – (8) уравнением

$$P_{\Sigma \text{к(ш)}} = P_{\text{ххк(ш)}} + P_{\text{кзк(ш)}} = K_{\text{дх}} P_{1/50} (f/50)^{1,5} \times \\ \times (1,1547 B_{\text{с}})^2 \left[m_{\text{МК(ш)}} + 1,5 K_{\text{зо}} \lambda_{\text{о}} l_{\text{МК(ш)}} b_{\text{ОК(ш)}}^2 K'_{\text{у}} \right] \quad (17)$$

где $K'_{\text{у}}$ – коэффициент,

$$K'_{\text{у}} = \gamma_{\text{с}} K_{\text{у}}.$$

После подстановки (9) – (11) и (12) – (14), а также (15) и (16), соответствующие рис. 1 и рис. 2 варианты уравнения (17) преобразуются к виду (1) с показателями:

$$\Pi_{\text{ПК}}^* = 2,0665 \left(\sqrt[4]{1/[K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}K_{\text{кк}}f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}})]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{\text{зс}}K_{\text{кк}} \left[(\lambda_{\text{о}} + 1)(1 - 0,0718a_{\text{м}})(a_{\text{м}} - 1)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,65654(a_{\text{м}} - 1)^3 \right] + 3,482K_{\text{у}}K_{\text{зо}}\lambda_{\text{о}} \times \right. \\ \left. \times (1 - 0,0718a_{\text{м}})(a_{\text{м}} - 0,0718)^2 \right\} \quad (18)$$

$$\Pi_{\text{ПШ}}^* = 1,5 \left(\sqrt[4]{1/[3K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_{\text{о}}f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{\text{зс}} \left[f_{\text{ш1}}^2(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})F_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) + \right. \right. \\ \left. \left. + 3,4661f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})F_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) \right] + \right. \\ \left. + 6,9282K_{\text{у}}K_{\text{зо}}\lambda_{\text{о}} \left[f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,866f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 1,1781 \right] \right\}. \quad (19)$$

Согласно [2-5] в современных ТТ используются анизотропные ЭТС марок 3406 – 3409 с $K_{\text{зс}} = 0,96 \dots 0,97$ при толщине $\delta_{\text{с}} = 0,27 \dots 0,35$ мм и $\gamma_{\text{с}} = 7650$ кг/м³, а также склеенная из пяти слоев толщиной 0,024 мм аморфного сплава *FeSiB* ленточная ЭТС с $K_{\text{зс}} = 0,8 \dots 0,85$ при $\delta_{\text{с}} = 0,15$ мм и $\gamma_{\text{с}} = 7320$ кг/м³. Наибольший эффект дает применение новых высокопроницаемых анизотропных и аморфных ЭТС в ЭМС с витыми пространственными магнитопроводами для которых $K_{\text{дх}}$ не зависит от характеристик применяемой ЭТС [3]. Добавочные потери магнитопроводов ЭМС (рис. 1, 2) обусловлены, как указано выше, несинусоидальностью магнитных потоков секций и учитываются $K_{\text{дх}} = 1,33 \dots 1,35$ [1, 3]. В расчетах "сухих" и "масляных" ТТ мощностью 10...160 кВ·А, а также 160...630 кВ·А используются соответственно значения $K_{\text{дх}} \leq 1,04$ и $K_{\text{дх}} \leq 1,075$ и диапазон индукции $B_{\text{с}} = 1,35 \dots 1,65$ Тл [1].

Для определения $K_{\text{у}}$ и расчетов $\Pi_{\text{ПК(ш)}}^*$ в настоящей работе принимаются значения $B'_{\text{с}} = 1,45 \dots 1,65$ Тл, $P_{1,0/50} = 0,47$ Вт/кг и $K_{\text{зс}} = 0,97$ (сталь 3407, $\delta_{\text{с}} = 0,35$ мм [2]), а также $B'_{\text{с}} = 1,4$ Тл, $P_{1,4/50} = 0,13$ Вт/кг и $K_{\text{зс}} = 0,8$ (аморфная сталь с рабочей индукцией $B_{\text{с}} \leq 1,4$ Тл [3, 5]), принимаются $K_{\text{дх}} = 1,04$ и $K_{\text{дх}} = 1,34$. При использовании медных обмоточных проводов с $\gamma_{\text{о}} = 8900$ кг/м³ и $P_{\text{у}} = 2,4 \cdot 10^{-12}$ Вт·м⁴/(кг·А²), а также частоте сети $f = 50$ Гц, в диапазоне номинальной мощности $S_{\text{н}} = 0,3 - 1$ кВ·А и $S = 1 - 2,5$ кВ·А, плотность тока соответствует значениям: $j_{\text{о}} = 2,4 - 1,7$ А/мм² и $j_{\text{о}} = 1,7 - 1,4$ А/мм² [12]. При аналогичных частоте и активных материалах, согласно [1], в масляных ТТ при $S_{\text{н}} = 2,5 - 63$ кВ·А, $j_{\text{о}} = 1,8 - 2,2$ А/мм² и при $S_{\text{н}} = 63 - 630$ кВ·А, $j_{\text{о}} = 2,2 - 3,5$ А/мм², а в "сухих" ТТ с $S_{\text{н}} = 10 - 1600$ кВ·А полусумма плотностей тока первичной и вторичной концентрических обмоток составляет $j_{\text{о}} = 1,7 - 2,4$ А/мм².

Для рекомендуемых значений и диапазонов изменения ЭМН расчетные величины коэффициента (6) с характеристиками изотропной ЭТС составляют:

$$K_{\text{уmin1}} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,47 \cdot 1,65^2} = 3,319;$$

$$K'_{\text{уmax1}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,47 \cdot 1,65^2} = 9,755;$$

$$K''_{\text{уmax1}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,47 \cdot 1,45^2} = 44,77.$$

Аналогичные величины коэффициента (6) с характеристиками аморфной ЭТС составляют:

$$K_{\text{уmin2}} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7320 \cdot 0,13} = 34,145;$$

$$K'_{\text{уmax2}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7320 \cdot 0,13} = 100,345;$$

$$K''_{\text{уmax2}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7320 \cdot 0,13} = 213,41.$$

Принимаются минимальные $K_{\text{уmin1(2)}}$ и максимальные $K_{\text{уmax1(2)}}$ величины коэффициента удельных показателей и ЭМН

$$3 = K_{\text{уmin1}} \leq K_{\text{у1}} \leq K_{\text{у1}}^{(1)} = 10 \quad (45); \quad (20)$$

$$34 = K_{\text{уmin2}} \leq K_{\text{у2}} \leq K_{\text{у2}}^{(1)} = 100 \quad (214). \quad (21)$$

Результаты расчетов экстремальных значений (минимумов) показателей энергетической эффективности (18) и (19) ЭМС (рис. 1) при $K_{\text{кк}} = 0,904$ [1, 8] и ЭМС (рис. 2) для принятых значений $K_{\text{зс}}$ и величин $K_{\text{у}}$ (20) и (21) приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Минимальные значения показателя потерь активной мощности трехфазной пространственной аксиальной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней витого секционированного магнитопровода

К _{зо} , о.е.	Показатель $\Pi_{\text{ПКз}}$, о.е. при значениях $K_{\text{у}}$, о.е.					
	анизотропная сталь			аморфная сталь		
	3	10	45	34	100	214
0,3	40,80	79,01	200,13	181,01	372,97	633,59
0,25	42,65	81,51	204,7	184,43	377,46	539,02
0,2	45,15	84,91	209,75	189,05	383,53	646,38

Таблица 2

Минимальные значения показателя потерь активной мощности трехфазной пространственной аксиальной электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами стержней витого секционированного магнитопровода

K _{зо} , о.е.	Показатель $\Pi_{\text{шз}}$, о.е. при значениях K _y , о.е.					
	анизотропная сталь			аморфная сталь		
	3	10	45	34	100	214
0,3	40,33	77,91	197,91	178,14	366,68	623,90
0,25	42,17	80,41	201,56	181,54	371,25	628,02
0,2	44,67	83,79	206,51	186,14	377,18	635,33

ВЫВОДЫ

1. Замена в трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с двухконтурными фазными элементами витого магнитопровода круговых ОК на шестигранные ОК сечений стержней и катушек медных обмоток в дополнение к существенному повышению компактности, снижению трудоемкости производства и некоторому улучшению массосистемных показателей, позволяет в диапазоне мощности 0,3 – 1000 кВ·А, на 1...1,5 % и 1,5...1,7 % повысить энергетическую эффективность ТТ с магнитопроводом соответственно из анизотропной и аморфной ЭТС.

2. Потери активной мощности пространственных аксиальных ЭМС при $f = 50$ Гц повышаются с повышением соотношения плотностей тока обмоток и индукции стержня.

3. Энергетическая эффективность ЭМС с шестигранными сечениями стержней повышается относительно электромагнитно эквивалентной ЭМС с круговыми ОК при увеличении индукции стержня (секции).

4. Величины экстремальных значений α_m , λ_o , и α_c зависят от конкретных соотношений ЭМН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
3. Бормосов В.А., Костюсова М.Н., Петренко А.Ф., Смольская Н.Е. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий. Режим доступа: www.trans-form.ru (13.09.2004).
4. Кравченко А., Метельский В. Сухие энергосберегающие трансформаторы // *Электрик*. – 2013. – №4. – С. 12-15.
5. Кравченко А., Метельский В. Масляные энергосберегающие трансформаторы // *Электрик*. – 2013. – №5. – С. 14-17.
6. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зеленый Н.И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромагнитических и статических преобразователей // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2011. – №1(77) – С. 64-69.
7. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – №6. – С. 33-38.
8. Авдеева Е.А., Ставинский Р.А. Массосистемные показатели пространственных аксиальных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых магнитопроводов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №1. – С. 15-20.
9. Блинцов В.С., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А., Садовой А.С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограни-

ченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №2. – С. 16-21.

10. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – №4. – С. 79-82.

11. Авдеева Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими стержней и обмоточных окон (потери активной мощности) // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №5. – С. 13-17.

12. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tihomirov P.M. *Raschet transformatorov*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 528 p. 2. *Power transformers. Reference book* / pod red. S.D. Lizunova, A.K. Lohanina. – Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 2004. 616 p. 3. 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). 4. Kravchenko A., Metel'skij V. *Suhie jenergosberegajushhie transformatory*. *Jelektrik*, 2013, no.4 pp. 12-15. 5. Kravchenko A., Metel'skij V. *Maslyanye jenergosberegajushhie transformatory*. *Jelektrik*, 2013, no.5, pp. 14-17. 6. Stavinskiy A.A., Tishchenko I.A., Zelenyj N.I. *Perspektivy i osobennosti dal'nejshego usovershenstvovaniya indukcionnyh jelektromehaničeskikh i statičeskikh preobrazovatelej*. *Elektrotehničnii ta kompiuterni sistemi*, 2011, no.1(77), pp. 64-69. 7. Stavinskiy 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. 8. 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. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.1, pp. 15-20. 9. Blincov V.S., Stavinskiy R.A., Avdieieva 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. 10. Stavinskiy A.A., Plahytr' O.O., Stavinskiy 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. 11. Avdieieva E.A. Comparative analysis of planar and spatial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of cores and coil windows (watt loss). *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.5, pp. 13-17. 12. Belopol'skij I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. *Raschet transformatorov i drossel'ej maloj moshhnosti*. Izd. 2-e, pererab. i dop. Moscow, Jenergiya Publ., 1973. 400 p.

Поступила (received) 25.08.2013

Авдеева Елена Андреевна¹,
Ставинский Ростислав Андреевич¹, к.т.н., доц.,
¹Национальный 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. Stavinskiy¹
¹National University of Shipbuilding after Admiral Makarov
9, Heroes of Stalingrad Avenue, Nikolaev, 54025, Ukraine

Watt loss in three-phase transformers with circular and hexagonal forming contours of twisted spatial magnetic core rods.

For spatial three-phase axial electromagnetic systems with circular and hexagonal cross-section configurations of twisted butt-end magnetic core rods, analytical dependences for optimal geometrical relations determination over the transformer minimum watt loss criterion are obtained, comparative analysis of the systems energy efficiency made.

Key words – three-phase electromagnetic system, twisted spatial magnetic core, circular and hexagonal forming contours, watt loss minimum.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛІНІЙНОЇ КОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ІЗ МАГНІТНОЮ ПРУЖИНОЮ. ЧАСТИНА 1

Розглянуто пасивний магнітний віброізолятор (магнітну пружину) з циліндричними магнітами. Розроблено математичну модель для розрахунку магнітного поля та сили магнітної пружини. Проведено чисельний розрахунок магнітного поля віброізолятора методом скінченних елементів у тривимірній системі координат. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують достовірність розрахункових даних.

Рассмотрен пассивный магнитный виброизолятор (магнитная пружина) с цилиндрическими магнитами. Разработана математическая модель для расчета магнитного поля и силы магнитной пружины. Выполнен численный расчет магнитного поля виброизолятора методом конечных элементов в трехмерной системе координат. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают достоверность расчетных данных.

ВСТУП

Висока ефективність пасивних віброізоляторів або магнітних пружин з постійними магнітами зумовлена великим значенням магнітної сили та високою залишковою магнітною індукцією рідкоземельних магнітних матеріалів. Більшість магнітних віброізоляторів працюють в режимі, при якому полюси однієї полярності магнітів відштовхуються. Одна з найпростіших конфігурацій магнітної пружини показана на рис. 1, а і складається з двох постійних магнітів, які мають зустрічну намагніченість. Недоліком такої конфігурації є нестійкість системи в боковому напрямку.

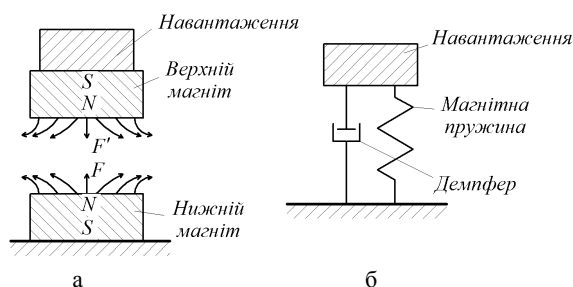


Рис. 1. Конфігурація найпростішої магнітної пружини

На сьогоднішній день, в конструкціях пасивних віброізоляторів, широко використовуються плоскі або циліндричні постійні магніти. Система де верхній постійний магніт підвішений на нижній, може бути представлена еквівалентною магнітною пружиною, як показано на рис. 1, б. Такі магнітні пружини, як правило, застосовуються в системах підвіски транспортних засобів для поліпшення комфорту та безпеки пасажирів або полегшення вібраційного контролю силових машин на судах. Ізолятор з чотирма наборами прямокутних постійних магнітів, описаний в роботі [1], використовується для підвищення точності обладнання. В конструкціях магнітної підвіски ізолятора з одним ступенем свободи [2, 3] магнітні пружні елементи поєднуються з механічними пружинами і збираються паралельно. Це забезпечує низьку динамічну жорсткість та високі статичні показники. В роботі [4] запропоновано тип магнітної пружини з чотирма парами циліндричних постійних магнітів, завдяки чому досягається обмеження горизонтальних переміщень навантаження.

Десять основних конфігурацій магнітних пружин з циліндричними постійними магнітами, відповідно до класифікації наведених в [5] показані на рис. 2. Згідно

теорії коливань, ізолятори повинні бути досить м'якими, щоб мати низьку власну частоту, і знижувати передачу вібрації, та досить жорсткими, щоб гасити генерацію прямих збурень.

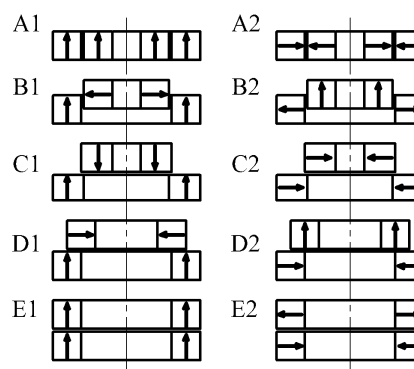


Рис. 2. Основні конфігурації магнітних пружин з постійними магнітами

Головною перевагою магнітної пружини над механічною є те, що енергія, яка розсіюється в її активних елементах, значно менша. Порівняння десятих основних конфігурацій з радіальною та осьюовою намагніченістю свідчить, що циліндричні постійні магніти з радіальною намагніченістю мають відносно низьку жорсткість в осьовому (робочому) напрямку. Тому, в даній роботі, досліджується конфігурація A2, що використовується в якості віброізолятора.

Висока ефективність роботи таких пристроїв суттєво залежить від правильно підібраних головних розмірів та конструкції магнітної пружини. Отже, є актуальним створення відповідних розрахункових моделей, що дозволяють визначити відповідні статичні та динамічні характеристики. З цією метою, в першій частині даної роботи розроблено математичну модель для розрахунку статичних характеристик магнітної пружини з тим, щоб в подальшому використати отримані дані для моделювання динамічних характеристик коливної системи.

КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНОЇ МАГНІТНОЇ ПРУЖИНИ

Магнітна пружина з постійними магнітами, яка показана на рис. 3, має зовнішній та внутрішній циліндричні магніти, які мають зустрічну намагніченість. Це створює вертикальну силу, що намагається виштовхнути

вхнути внутрішній магніт. Крім того, за рахунок бокової сили, що стабілізує останній у центральному положенні, підвищується стійкість щодо бокових зміщень. Навантаження пружини кріпиться до внутрішнього магніту, а зовнішній магніт закріплюється на нерухомій основі.

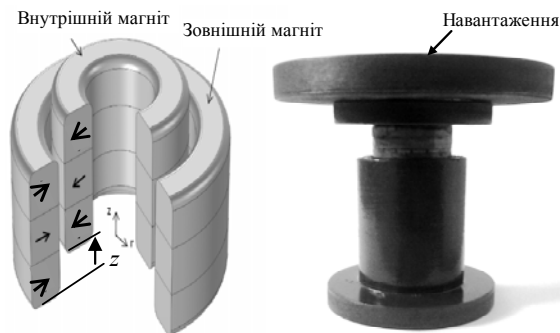


Рис. 3. Конструкція пружини з двома циліндричними постійними магнітами

Основні розміри магнітів та їх характеристики наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри постійних магнітів

Внутрішній магніт	Внутрішній діаметр	32 мм
	Зовнішній діаметр	37 мм
	Висота	60 мм
Зовнішній магніт	Внутрішній діаметр	41 мм
	Зовнішній діаметр	46 мм
	Висота	60 мм
Постійні магніти	NdFeB	
	μ_r	1,06
	B_r	1,2 Тл

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА СИЛИ МАГНІТНОЇ ПРУЖИНИ

Розподіл магнітного поля в системі з постійними магнітами за відсутності електричних струмів, описується системою рівнянь Максвелла в магнітостатичному наближенні:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \Rightarrow \mathbf{H} = -\nabla \varphi_m, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

де $\mathbf{B}$ – вектор магнітної індукції; $\mathbf{H}$ – вектор напруженості магнітного поля; φ_m – скалярний магнітний потенціал.

Будемо використовувати рівняння стану для постійного магніту у вигляді

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_r – відносне значення магнітної проникності матеріалу магніту, $\mathbf{B}_r$ – залишкова магнітна індукція.

На рис. 4 показано тривимірну модель магнітної пружини.

З виразів (1-3) після перетворень одержимо наступне диференціальне рівняння для розрахунку розподілу скалярного магнітного потенціалу в тривимірній області:

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla \varphi_m - \mathbf{B}_r) = 0. \quad (4)$$

Тоді, розподіл напруженості магнітного поля $\mathbf{H}$ визначається з використанням виразу (1), а магнітної індукції $\mathbf{B}$ відповідно до формули (3). Для розрахунку значення магнітної сили, що діє на рухому частину магнітної пружини, використовувався тензор тяжіння Максвелла.

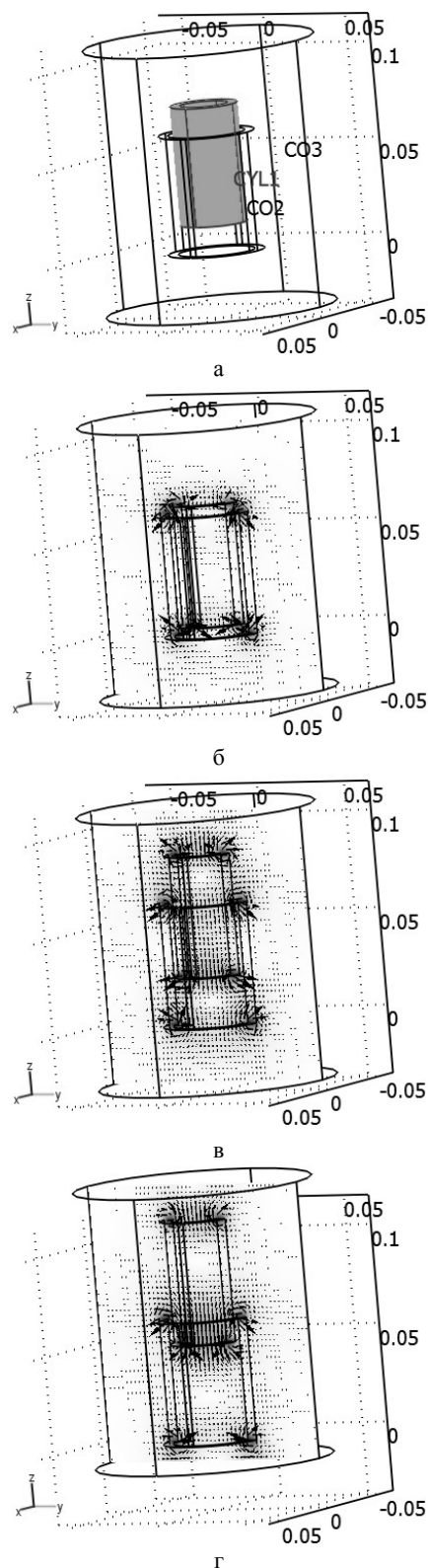


Рис. 4. Розподіл магнітного поля пружини: а – розрахункова область; б, в, г – розподіл магнітної індукції в пружині при різних положеннях внутрішнього магніту

Чисельний розрахунок магнітного поля пружини виконувався методом скінченних елементів за допомогою програми Comsol. Тривимірна постановка задачі дозволяє крім осової, обчислити також бокову горизонтальну силу, що діє на внутрішній магніт при його зміщенні від центрального положення.

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИЛИ ПРУЖИНИ

За результатами розрахунку магнітного поля була визначена магнітна сила, що діє на внутрішній магніт, в залежності від його положення по висоті (в наведеній моделі вздовж осі z). Результати для осьової компоненти сили наведені на рис. 5, де показано також експериментальні дані отримані за допомогою дослідної моделі.

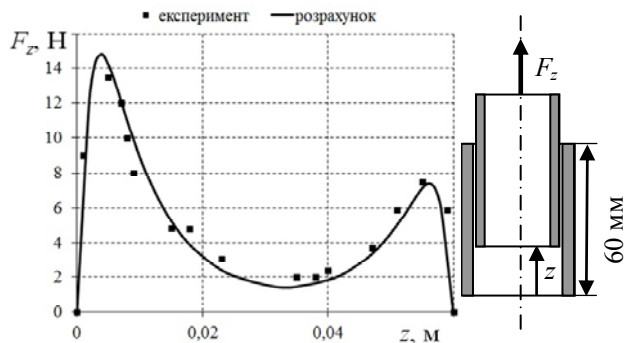


Рис. 5. Залежність осьової складової магнітної сили F_z від положення внутрішнього магніту x

Як видно з рисунку, залежність магнітної сили є суттєво нелінійною.

Стабільна робота магнітної пружини залежить від значення радіальної складової магнітної сили, яка зумовлює розміщення внутрішнього магніту по центру системи. Для розрахунку цієї компоненти сили розглядалась польова задача у тривимірній постановці при зміщенні внутрішнього магніту у радіальному напрямку. Результати розрахунку цієї сили в залежності від відстані між осями магнітів при різному їх зміщенні по вертикалі (по осі z), наведені на рис. 6.

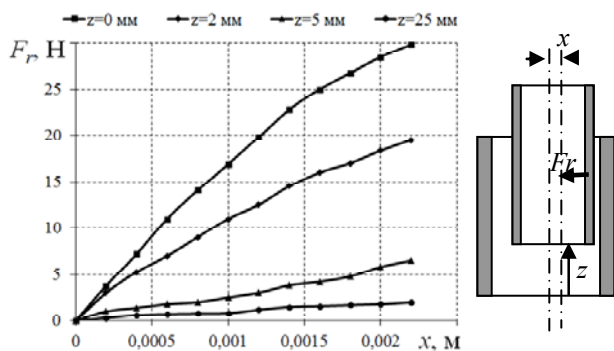


Рис. 6. Залежність радіальної сили F_r , що діє на постійні магніти від відстані між осями магнітів x

З даного рисунку видно, що зі зміщенням внутрішнього магніту в радіальному напрямку відносно центрального положення (вздовж осі x), радіальна складова сили зростає. Але при зміщенні магніту у вертикальному напрямку (вздовж осі z), значення магнітної сили, що стабілізує його положення по центру, зменшується. Тому, з точки зору стабільності роботи пружини, відстань між торцями магнітів не повинна перевищувати 20 мм.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено математичну модель магнітної пружини, побудованої на основі двох постійних магнітів циліндричного типу. Проведено розрахунок

магнітного поля в такій пружині чисельним методом скінчених елементів.

Розраховано механічну характеристику магнітної пружини (залежність осьової магнітної сили від відстані між магнітами) та силу бокового тяжіння. Показано, що механічна характеристика магнітної пружини є суттєво нелінійною. Визначено, що робочою ділянкою механічної характеристики пружини (при зазначених розмірах) є ділянка від 5 мм до 20 мм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Choi K.B. Stabilization of one degree of freedom control type levitation table with magnet repulsive forces. *J. Mechatronics*, 2003, v.13, no.6, pp.587-603.
2. Bonisoli E. Passive effects of rare-earth permanent magnets on flexible conductive structure. *J. Mech. Res. Commun.*, 2007, v.37, no.4.
3. Carrella A. On the design of a high-startic-low dynamic stiffness isolator. *J. Sound Vib.*, 2008, v.315, no.3.
4. Puppini E., Fratello V. Vibration isolation with magnet springs. *J. Rev. Sci. Instrum.*, 2002, v.73, no.11, pp. 4034-4036.
5. Yonnet J.P. Permanent magnet bearing and coupling. *IEEE Mag.*, 1981, v.17, no.1.

Надійшла (received) 22.09.2013

Бондар Роман Петрович¹, к.т.н.,
Чеботарун Інга Сергіївна¹, магістр,
Подольцев Олександр Дмитрович², д.т.н., проф., гол.н.с.,
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Київ, пр. Повітрофлотський, 31,
тел/phone +38 044 2415510, e-mail: rpbondar@gmail.com,
² Інститут електродинаміки НАН України,
03657, Київ, пр. Перемоги, 56,
тел/phone +38 044 4542568

R.P. Bondar¹, I.S. Chebotarun¹, A.D. Podoltsev²
¹ Kyiv National University of Construction and Architecture
31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-37, 03680 Ukraine
² Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine
56, Peremogy Avenue, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Modeling of dynamic characteristics of a nonlinear oscillatory system with a magnetic spring. Part 1.

A passive magnetic vibration isolator (a magnetic spring) with cylindrical magnets is considered. A mathematical model is developed to calculate magnetic spring magnetic field and force. Numerical calculation of the vibration isolator magnetic field via a 3-D finite element method is performed. Experimental results presented prove adequacy of the computational data.

Key words – finite element method, permanent magnet, vibration isolator.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УЗЛОВ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАГРУЗКИ И ТИПА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Розроблена еквівалентна теплова схема, на базі якої складена система рівнянь теплового балансу частотно-керованого асинхронного двигуна. За допомогою системи рівнянь розраховані і експериментально підтверджені температури обмоток і осердь статора і ротора асинхронного двигуна АИР 90В2. Встановлено залежність температури найбільш нагрітих вузлів машини від величини навантаження при різних формах напруги живлення.

Разработана эквивалентная тепловая схема, на базе которой составлена система уравнений теплового баланса частотно-управляемого асинхронного двигателя. С помощью системы уравнений рассчитаны и экспериментально подтверждены температуры обмоток и сердечников статора и ротора асинхронного двигателя АИР 90В2. Установлена зависимость температуры наиболее нагретых узлов машины от величины нагрузки при разных формах питающего напряжения.

Введение. Применение в народном хозяйстве регулируемых электроприводов (РЭП) на базе асинхронных двигателей (АД) позволяет экономить электроэнергию, дает возможность разрабатывать и внедрять новые технологические процессы и улучшать энергетический коэффициент ($\eta \cdot \cos \varphi$) привода в целом. Питание асинхронных частотно-управляемых двигателей (АЧУД) осуществляется преобразователями частоты, которые в значительной мере влияют на технико-экономические показатели регулируемого электропривода. В качестве источников питания для регулируемых электроприводов применяют полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) с использованием широко-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивающие синусоидальное выходное напряжение с переменной скважностью длительности импульсов (Режим Б). В то же время в эксплуатации находится большое количество РЭП, у которых питание двигателей осуществляется ППЧ с автономным инвертором напряжения (ППЧ с АИН) со ступенчатой формой напряжения на выходе (Режим А).

Питание АЧУД напряжением ступенчатой формы (ППЧ с АИН) приводит к росту дополнительных потерь от высших гармоник напряжения (ВГН), которые существенно влияют на нагрев двигателя. При работе АЧУД в его объеме выделяется теплота, источников которой являются потери энергии, возникающие в процессе электромеханического преобразования. Теплота, образуемая в активных элементах, распространяется по всему объему машины и передается в охлаждающую среду с помощью системы охлаждения. Таким образом, в объеме машины существуют тепловые потоки и перепады температуры между отдельными узлами конструкции.

Температура узлов АЧУД в зависимости от нагрузки и типа источника питания. Режимы работы АЧУД характеризуется типом источника питания, величиной нагрузки и частотой вращения, которые определяют электрические, магнитные и механические потери, а также состояние окружающей среды и условия теплообмена с ней [1]. Проведение исследования [2] показали, что при использовании АД общего назначения в качестве АЧУД и ППЧ с АИН мощность двигателя уменьшится на 15-20 %.

Для анализа температуры узлов в АЧУД используется тепловая эквивалентная схема (ЭТС) [3], разбитая до 16 узлов [4] (рис. 1).

Для всех узлов ЭТС составлены уравнения теплового баланса

$$\left. \begin{aligned} 1. & \theta_1 \cdot (\lambda_{0.1} + \lambda_{1.2} + \lambda_{1.10}) - \theta_2 \cdot \lambda_{1.2} - \theta_{10} \cdot \lambda_{1.10} = \\ & = \theta_{01} \cdot \lambda_{0.1}; \\ 2. & -\theta_1 \cdot \lambda_{1.2} + \theta_2 \cdot (\lambda_{0.2} + \lambda_{1.2} + \lambda_{2.6}) - \theta_3 \cdot \lambda_{2.3} - \\ & - \theta_6 \cdot \lambda_{2.6} = \theta_{02} \cdot \lambda_{0.2}; \\ 3. & -\theta_2 \cdot \lambda_{2.3} + \theta_3 \cdot (\lambda_{0.3} + \lambda_{2.3} + \lambda_{3.11}) - \theta_{11} \cdot \lambda_{3.11} = \\ & = \theta_{03} \cdot \lambda_{0.3}; \\ 4. & \theta_4 \cdot (\lambda_{4.5} + \lambda_{4.7} + \lambda_{4.14}) - \theta_5 \cdot \lambda_{4.5} - \theta_7 \cdot \lambda_{4.7} - \\ & - \theta_{14} \cdot \lambda_{4.14} = P_4; \\ 5. & -\theta_4 \cdot \lambda_{4.5} + \theta_5 \cdot (\lambda_{4.5} + \lambda_{5.6} + \lambda_{5.7}) - \theta_6 \cdot \lambda_{5.6} - \\ & - \theta_7 \cdot \lambda_{5.7} = 0; \\ 6. & -\theta_2 \cdot \lambda_{2.6} - \theta_5 \cdot \lambda_{5.6} - \theta_6 \cdot (\lambda_{2.6} + \lambda_{5.6}) = P_6; \\ 7. & -\theta_4 \cdot \lambda_{4.7} + \theta_7 \cdot (\lambda_{7.8} + \lambda_{4.7} + \lambda_{5.7} + \lambda_{7.9}) - \\ & - \theta_8 \cdot \lambda_{7.8} - \theta_9 \cdot \lambda_{7.9} = P_7; \\ 8. & -\theta_7 \cdot \lambda_{7.8} + \theta_8 \cdot (\lambda_{7.8} + \lambda_{8.10}) - \theta_{10} \cdot \lambda_{8.10} = P_8; \\ 9. & -\theta_7 \cdot \lambda_{7.9} + \theta_9 \cdot (\lambda_{7.9} + \lambda_{9.11}) - \theta_{11} \cdot \lambda_{9.11} = P_9; \\ 10. & -\theta_1 \cdot \lambda_{1.10} - \theta_8 \cdot \lambda_{8.10} + \theta_{10} \cdot (\lambda_{1.10} + \lambda_{8.10} + \lambda_{10.12} + \\ & + \lambda_{10.14} + \lambda_{10.15}) - \theta_{12} \cdot \lambda_{10.12} - \theta_{14} \cdot \lambda_{10.14} - \\ & - \theta_{15} \cdot \lambda_{10.15} = P_{10}; \\ 11. & -\theta_3 \cdot \lambda_{3.11} - \theta_9 \cdot \lambda_{9.11} + \theta_{11} \cdot (\lambda_{3.11} + \lambda_{9.11} + \lambda_{11.13} + \\ & + \lambda_{11.14} + \lambda_{11.15}) - \theta_{13} \cdot \lambda_{11.13} - \theta_{14} \cdot \lambda_{11.14} - \\ & - \theta_{15} \cdot \lambda_{11.15} = P_{11}; \\ 12. & -\theta_{10} \cdot \lambda_{10.12} + \theta_{12} \cdot (\lambda_{10.12} + \lambda_{12.0}) = P_{12} + \theta_{01} \cdot \lambda_{12.0}; \\ 13. & -\theta_{11} \cdot \lambda_{11.13} + \theta_{13} \cdot (\lambda_{11.13} + \lambda_{13.0}) = P_{13} + \theta_{01} \cdot \lambda_{13.0}; \\ 14. & -\theta_4 \cdot \lambda_{4.14} - \theta_{10} \cdot \lambda_{10.14} - \theta_{11} \cdot \lambda_{11.14} + \theta_{14} \cdot (\lambda_{4.14} + \\ & + \lambda_{10.14} + \lambda_{11.14} + \lambda_{14.16}) - \theta_{16} \cdot \lambda_{14.16} = P_{14}; \\ 15. & -\theta_{10} \cdot \lambda_{10.15} - \theta_{11} \cdot \lambda_{11.15} + \theta_{15} \cdot (\lambda_{10.15} + \lambda_{11.15} + \\ & + \lambda_{15.16}) - \theta_{16} \cdot \lambda_{15.16} = 0; \\ 16. & -\theta_{14} \cdot \lambda_{14.16} - \theta_{15} \cdot \lambda_{15.16} + \theta_{16} \cdot (\lambda_{14.16} + \lambda_{15.16}) = P_{16}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Принимаем: $\theta_{01} = \theta_{\text{окр}}$; $\theta_{02} = \theta_{01} + \Delta\theta_{\text{в}}/2$; $\theta_{03} = \theta_{01} + \Delta\theta_{\text{в}}$, где $\theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды. Значения θ_{02} , θ_{03} для всех рассматриваемых законов регулирования двигателя АИР90В2 при $0,5 \leq \alpha \leq 1$ и $1 \leq \alpha \leq 1,5$ приведены в табл. 1.

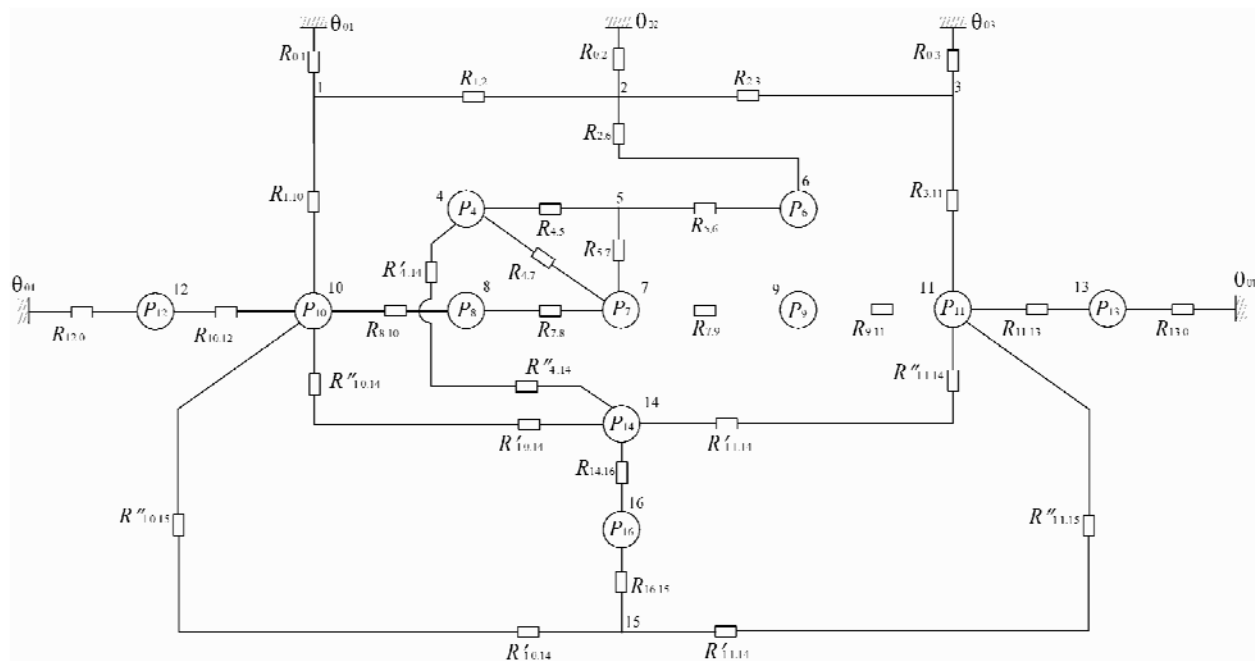


Рис. 1. ЭТС частотно-управляемого асинхронного двигателя

Таблица 1

Значения температуры охлаждающего воздуха
для всех рассматриваемых законов регулирования °C

Закон	α						
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
$\gamma = \alpha \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$	$\frac{36,7^\circ}{48,4^\circ}$	$\frac{33,2^\circ}{41,5^\circ}$	$\frac{31,6^\circ}{38,2^\circ}$	$\frac{30,9^\circ}{36,8^\circ}$	—	—	—
$\gamma = \alpha^2 \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$	$\frac{28,0^\circ}{31,2^\circ}$	$\frac{29,3^\circ}{33,4^\circ}$	$\frac{30,3^\circ}{35,7^\circ}$	$\frac{30,9^\circ}{36,8^\circ}$	—	—	—
$\gamma = \sqrt{\alpha} \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$	—	—	—	$\frac{30,9^\circ}{36,8^\circ}$	$\frac{30,1^\circ}{35,6^\circ}$	$\frac{29,4^\circ}{32,8^\circ}$	$\frac{28,2^\circ}{31,4^\circ}$
$\gamma = 1 \frac{\Theta_{02}}{\Theta_{03}}$ $P_2 = \text{const}$	—	—	—	$\frac{30,9^\circ}{36,8^\circ}$	$\frac{30,2^\circ}{35,4^\circ}$	$\frac{29,5^\circ}{34,0^\circ}$	$\frac{29,2^\circ}{33,5^\circ}$

Температура узлов ЭТС определяется, решая систему уравнений. При ступенчатой форме питающего напряжения (ППЧ с АИН) в сердечнике ротора возникают магнитные потери от высших гармоник (Режим А), существенно изменяются собственные и взаимные тепловые проводимости узлов ротора (обмотка ротора 14, сердечник ротора 16). В обмотке статора, зубцах и спинке сердечника за счет высших гармонических растут основные и дополнительные потери мощности (7 – активная часть обмотки статора, 8, 9 – лобовая часть обмотки соответственно со стороны привода и вентилятора).

Расчетные и экспериментальные данные температуры наиболее нагретых узлов двигателя АИР90В2 при работе с режимом питания А и Б представлены на рис. 2, 3.

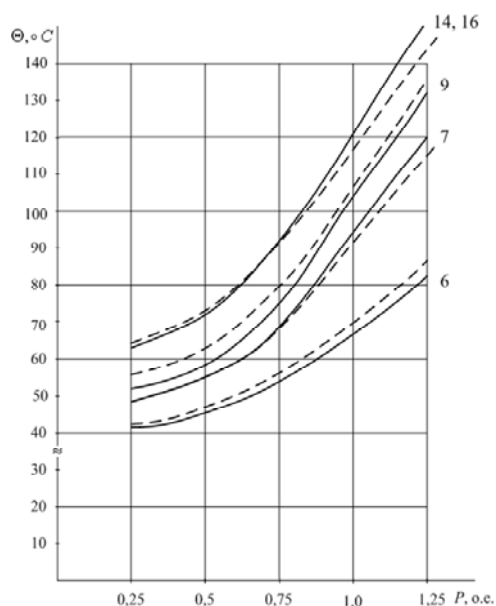


Рис. 2. Зависимость температуры обмоток и сердечников от P_2 . Режим А ($\gamma = \alpha = 1,0$).
Сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчет

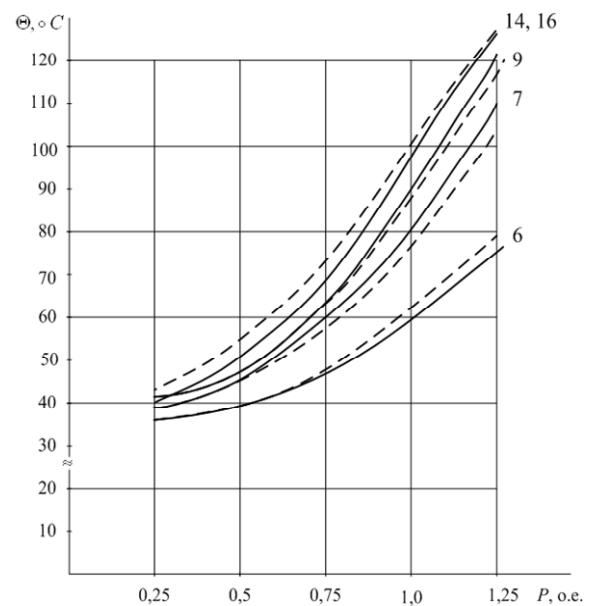


Рис. 3. Зависимость температуры обмоток и сердечников от P_2 . Режим Б ($\gamma = \alpha = 1,0$).
Сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчет

Выводы.

1. Дополнительные потери в узлах статора и ротора от высших гармоник существенно влияют на их температуру и при работе в режимах А и Б составляют 70 % основных потерь.

2. С ростом нагрузки двигателя влияние дополнительных потерь существенно снижается и для обмотки статора при $P_2 = 1,0 \cdot P_{2N}$ составляет 11,3 %, для обмотки ротора 45 %.

3. Распределение температуры по длине двигателя несимметрично и наибольшая неравномерность наблюдается для оребренного корпуса, при этом неравномерность распределения примерно одинакова для обеих форм питающего напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. – М: Высшая школа, 1975. – 495 с.
2. Петрушин В.С. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2008. – №70. – С. 68-71.
3. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
4. Петренко А.Н., Тянаний В.В., Петренко Н.Я. Температурное поле и тепловые потоки частотно-управляемого асинхронного двигателя // Вестник НТУ "ХПИ". – 2012. – №49. – С. 61-65.

Bibliography (transliterated): 1. Bolgarskiy A.V., Muhachev G.A., Shchukin V.K. *Termodinamika i teploperedacha*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 495 p. 2. Petrushin V.S. *Jenergeticheskie i teplovyje pokazateli reguliruemyh asinhronnyh dvigatelej s uchetom vysshih*

prostranstvenno-vremennyh garmonik. Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya, 2008, no.70, pp. 68-71. 3. Borisenko A.I., Dan'ko V.G., Yakovlev A.I. *Aerodinamika i teploperedacha v elektricheskikh mashinah*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 560 p. 4. Petrenko A.N., Tanyanskiy V.V., Petrenko N.Ya. *Temperaturnoe pole i teplovyje potoki chastotno-upravljajemogo asinhronnogo dvigatelja. Bulletin of NTU "KhPI"*, 2012, no.49, pp. 61-65.

Поступила (received) 18.10.2013

Вакарюк Тарас Вячеславович¹, студент,
Петренко Николай Яковлевич¹, к.т.н., доц.,
Петренко Александр Николаевич², к.т.н.,
¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: mvpkpi@kpi.kharkov.ua,

²Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12

T.V. Vakaruk¹, N.Ya. Petrenko¹, A.N. Petrenko²

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

Study of frequency-controlled asynchronous motor units temperature versus load and power supply type.

An equivalent thermal circuit is developed to form the basis of a system of heat-balance equations for a frequency-controlled induction motor. With the system of equations, temperatures of AIP 90B2 induction motor stator and rotor windings and cores are calculated and experimentally confirmed. The load dependence of the machine most heated units temperature at different forms of the supply voltage is revealed.

Key words – inverter, frequency-controlled asynchronous motor, losses, loads, high harmonics, temperature.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЦЕПИ СИНХРОННЫМ ВАКУУМНЫМ КОНТАКТОРОМ

Одержано залежність витрат на виконання однієї комутації синхронним вакуумним контактором від часу попередження і розкиду часу попередження розмикання контактів. Визначено межі допустимих значень часу попередження і розкиду часу попередження для різних рівнів витрат.

Получена зависимость затрат на выполнение одной коммутации синхронным вакуумным контактором от времени упреждения и разброса времени упреждения размыкания контактов. Определены границы допустимых значений времени упреждения и разброса времени упреждения для различных уровней затрат.

ВВЕДЕНИЕ

Как показали проведенные ранее исследования [1, 2], низковольтные синхронные вакуумные контакторы (СВК) имеют улучшенные в сравнении с другими типами контакторов технико-экономические показатели. Однако, выполненные в [1, 2] оценки, проводились только при оптимальных параметрах синхронного отключения (СО) [3]. В условиях реальной эксплуатации под воздействием большого количества возмущающих факторов параметры СО могут отклоняться от оптимальных. Поэтому, определение диапазона параметров синхронного отключения, при котором применение СВК является экономически выгодным, представляется актуальной задачей.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопросам технико-экономического обоснования применения низковольтных контакторов посвящено большое количество публикаций, что косвенно подтверждает актуальность рассматриваемой темы.

В работе [4] выполнено технико-экономическое сравнение контактных, гибридных и тиристорных контакторов. Сравнение проводилось по таким техническим параметрам, как максимальный ток в режиме применения АС-4, коммутационная износостойкость, механическая износостойкость, масса, объём, мощность потерь в контактах во включенном состоянии, мощность потерь в катушке электромагнитного привода, мощность потерь в электрической дуге. Для гибридных контакторов рассчитана масса сэкономленной меди в сравнении с контактными аппаратами. Количественное экономическое сравнение проведено только по отношению "цена расходуемой электроэнергии / цена контактора". Сравнение по затратам на обслуживание контакторов выполнено без указания конкретных цифр, с использованием качественных характеристик "больше – меньше".

В работе [5] приведено сравнение гибридных контакторов КТ64 и КТП64 с электромагнитными контакторами КТ6000 и КТП6000 по коммутационной износостойкости. В качестве экономического параметра приводится срок окупаемости гибридного контактора.

При использовании перечисленных показателей полноценное экономическое сравнение выполнить сложно, так как сравниваемые контакторы имеют разный срок службы, а такие технические параметры,

как коммутационная и механическая износостойкости рассматриваются вне связи с зависящими от них экономическими показателями.

Для более корректного экономического сравнения контакторов в [1, 2] предложено использовать такой показатель, как затраты на одну коммутацию (ЗОК), выполненную аппаратом. При расчёте ЗОК учитываются затраты на приобретение контактора, затраты на приобретение и замену контактов, дугогасительных камер и гибких связей, а также затраты на обслуживание контактора. В предложенную формулу входят коммутационная и механическая износостойкости, количество замен контактов, дугогасительных камер и гибких связей, что позволяет объединить технические и экономические параметры и представить результаты сравнения количественно.

Кроме перечисленных причин, основанием для проведения нового технико-экономического сравнения является отсутствие в работах [4, 5] данных по СВК.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение диапазона экономически обоснованных параметров синхронного отключения при коммутации низковольтной цепи синхронным вакуумным контактором.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коммутационная износостойкость СВК зависит от ряда параметров, среди которых наиболее значимыми являются время упреждения размыкания контактов перед нулём отключаемого тока t_y и разброс времени упреждения Δt_y . Учитывая такую зависимость, формулу для определения ЗОК, приведенную в [1, 2] можно уточнить:

$$Z_{OK} = \frac{Z_K + n_K \cdot (Z_{ПК} + Z_{ЗК}) + n_D \cdot (Z_{ПД} + Z_{ЗД})}{N_M} + \frac{n_G \cdot (Z_{ПГ} + Z_{ЗГ}) + Z_O}{N_M}, \quad (1)$$

где Z_K – затраты на приобретение контактора, грн; $Z_{ПК}$ – затраты на приобретение контактов, грн; $Z_{ЗК}$ – затраты на замену контактов, грн; n_D – количество замен дугогасительных камер контактора; $Z_{ПД}$ – затраты на приобретение дугогасительных камер, грн; $Z_{ЗД}$ – затраты на замену дугогасительных камер, грн; n_G – количество замен гибких связей контактора; $Z_{ПГ}$ – затраты на

приобретение гибких связей, грн; $3_{\text{г}}$ – затраты на замену гибких связей, грн; $3_{\text{о}}$ – затраты на обслуживание контакторов (проверка раствора контактов, проверка и регулировка провалов, контактных нажатий и др.), грн; n_K – количество замен контактов контактора:

$$n_K = \frac{N_M}{N_K(t_y, \Delta t_y)}. \quad (2)$$

Зависимость коммутационной износостойкости N_K от времени упреждения t_y и разброса времени упреждения Δt_y исследована с помощью математических моделей и экспериментально [6, 7]. Было установлено, что, из-за особенностей износа контактов низковольтных вакуумных дугогасительных камер при синхронном отключении разброс времени упреждения может быть достаточно большим с сохранением приемлемых значений износостойкости N_K . Особенностью работы СВК при большом разбросе времени упреждения является то, что распределение времени упреждения перестаёт подчиняться нормальному закону. В результате проведенных исследований установлено [8], что при выполнении условий

$$0 \leq t_p < a, \quad (3)$$

где $t_p = T/2 - t_y$ – момент размыкания контактов, $a = T/2$ – вторая точка наложения ветви распределения, и

$$(3 \cdot \sigma_p - T/2) \leq m_p \leq (T - 3 \cdot \sigma_p), \quad (4)$$

где σ_p – среднее квадратическое отклонение момента размыкания контактов t_p , m_p – математическое ожидание момента размыкания контактов, закон распределения времени упреждения СВК может быть представлен следующим выражением:

$$f(t_p) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_p}} \times \left(\frac{(t_p - m_p)^2}{2 \cdot \sigma_p^2} + e^{-\frac{(t_p - m_p + a)^2}{2 \cdot \sigma_p^2}} + e^{-\frac{(t_p - m_p - a)^2}{2 \cdot \sigma_p^2}} \right). \quad (5)$$

Отличие распределения (5) от нормального обусловлено тем, что в нём имеются две точки наложения. Первая точка наложения $t_p = 0$ – начало полупериода, а вторая точка наложения $t_p = a = T/2$ – конец полупериода отключаемого тока. В точках наложения происходит отсечение ветвей распределения, их смещение на $T/2$ и наложение на основную ветвь. Распределение (5) классифицировано как нормальное наложение с двумя точками наложения [8].

Для расчёта ЗОК с учётом установленной зависимости $N_K(t_y, \Delta t_y)$ был предложен алгоритм и составлена программа, результаты расчёта по которой показаны на рис. 1.

Анализ вида полученной зависимости позволяет сделать следующие выводы:

- величина ЗОК значительно изменяется при изменении времени упреждения, достигая минимума при малых и максимума при больших значениях t_y ;
- в области малых значений t_y (во второй половине полупериода отключаемого тока) увеличение разброса времени упреждения приводит к увеличению ЗОК;
- в области больших значений t_y (в первой половине полупериода отключаемого тока) увеличение разброса времени упреждения приводит к уменьшению ЗОК.

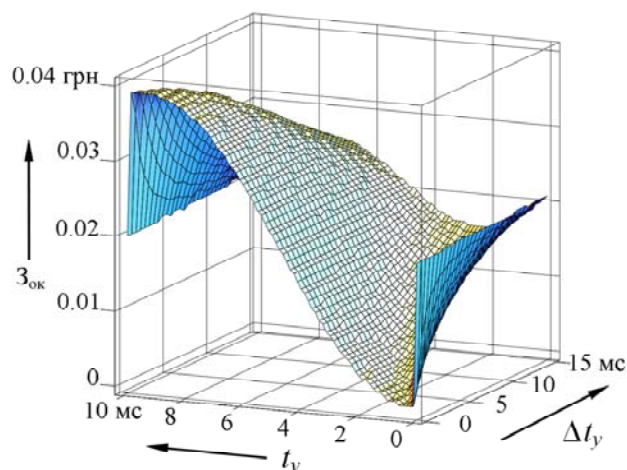


Рис. 1. Затраты на одну коммутацию, выполненную синхронным вакуумным контактором при различных значениях времени упреждения t_y и разброса времени упреждения размыкания контактов Δt_y

Более детально зависимость ЗОК от разброса времени упреждения можно проанализировать с помощью рис. 2.

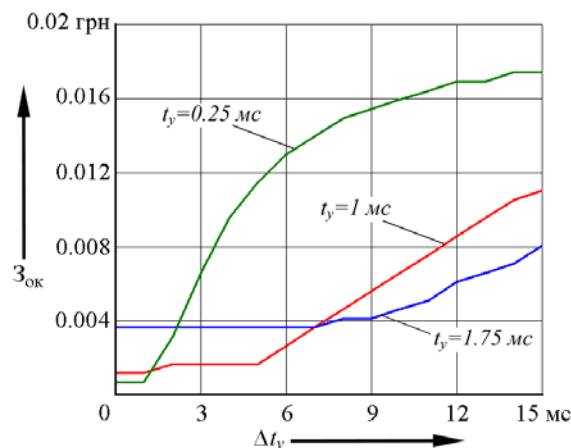


Рис. 2. Затраты на одну коммутацию, выполненную синхронным вакуумным контактором при различных значениях разброса времени упреждения и фиксированном времени упреждения размыкания контактов

Как следует из рис. 2, наименьшие затраты могут быть получены при наименьшем разбросе и наименьшем времени упреждения (кривая при $t_y = 0.25$ мс на участке, где Δt_y находится в пределах от 0 до 1 мс). Однако, если в процессе эксплуатации разброс времени упреждения возрастёт даже незначительно, ЗОК резко увеличивается и уже при $\Delta t_y = 2$ мс в два раза превосходит затраты при $t_y = 1$ мс. Такое поведение функции необходимо учитывать при выборе времени упреждения СВК: если в процессе эксплуатации аппарата высока вероятность увеличения разброса времени упреждения, то целесообразно выбирать большее время упреждения, чем это можно было бы сделать, руководствуясь только начальным значением Δt_y . По мере увеличения времени упреждения влияние разброса на ЗОК уменьшается, но при этом сами затраты увеличиваются (кривая при $t_y = 1.75$ мс).

Зависимости ЗОК показанные на рис. 3, позволяют сделать вывод о том, что каждому разбросу вре-

мени упреждения соответствует своё значение времени упреждения, при котором достигаются минимальные затраты. При этом, увеличение Δt_y приводит к увеличению t_y , обеспечивающему минимум ЗОК. На этом же рисунке видно, что даже при очень больших разбросах времени упреждения (кривая при $\Delta t_y = 15$ мс) правильный выбор t_y обеспечивает преимущество синхронного отключения перед несинхронным. Полученные зависимости показывают, что при увеличении Δt_y ЗОК стремится к уровню 0.02 грн. Это можно объяснить тем, что отключение с бесконечно большим разбросом времени упреждения фактически является несинхронным отключением, а уровень затрат 0.02 грн соответствует именно несинхронному отключению [2].

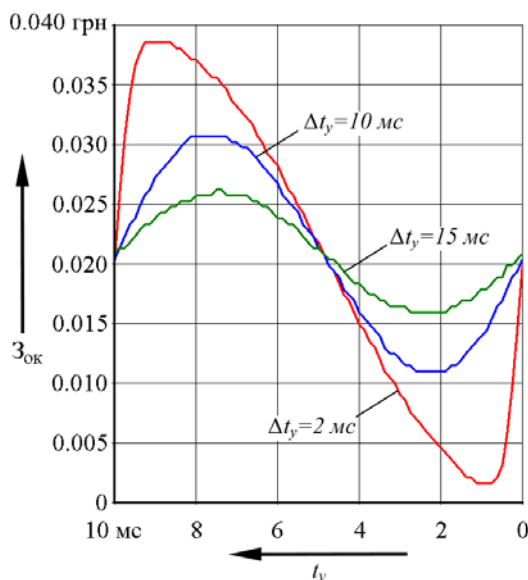


Рис. 3. Затраты на одну коммутацию, выполненную синхронным вакуумным контактором при различных значениях времени упреждения и фиксированном разбросе времени упреждения размыкания контактов

На рис. 4 показаны линии уровня, соответствующие разным значениям ЗОК. Пользуясь приведенными зависимостями, можно определить диапазон t_y и Δt_y при котором достигается желаемый уровень ЗОК. Например, если затраты на одну коммутацию не должны превышать 0.005 грн, то синхронный вакуумный контактор должен иметь разброс времени упреждения не более 5.5 мс, а само время упреждения может быть установлено в пределах от 0 до 2.2 мс. При этом, как видно из рис. 4 и 5, комбинация максимальных значений параметров t_y и Δt_y недопустима, а точка, обозначающая сочетание этих параметров при эксплуатационном дрейфе, не должна пересекать границу заданного уровня ЗОК.

В экспериментальном образце СВК на номинальный ток 400 А реализованы значения $t_y = 1$ мс и $\Delta t_y = 2$ мс. На рис. 4, 5 этим параметрам соответствует точка, обозначенная символом $\oplus$, которая расположена в области затрат на одну коммутацию, не превышающих 0.002 грн.

На рис. 5 выделена область, в пределах которой для экспериментального образца СВК затраты на одну коммутацию не превышают 0.002 грн.

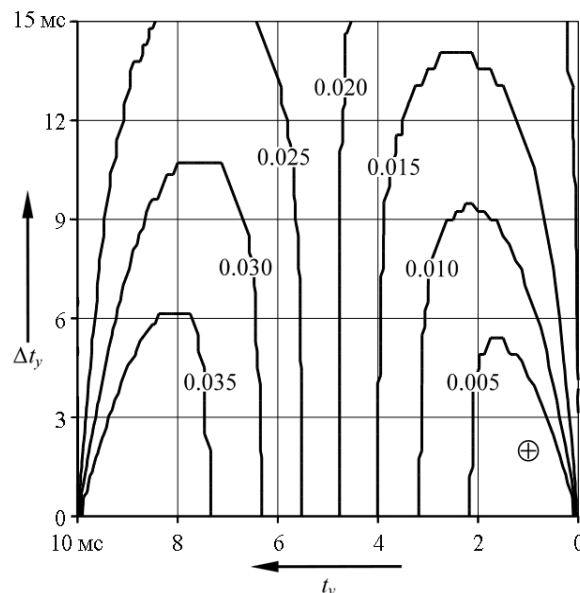


Рис. 4. Линии уровня затрат в гривнах на одну коммутацию в проекции на плоскость параметров Δt_y и t_y для синхронного вакуумного контактора

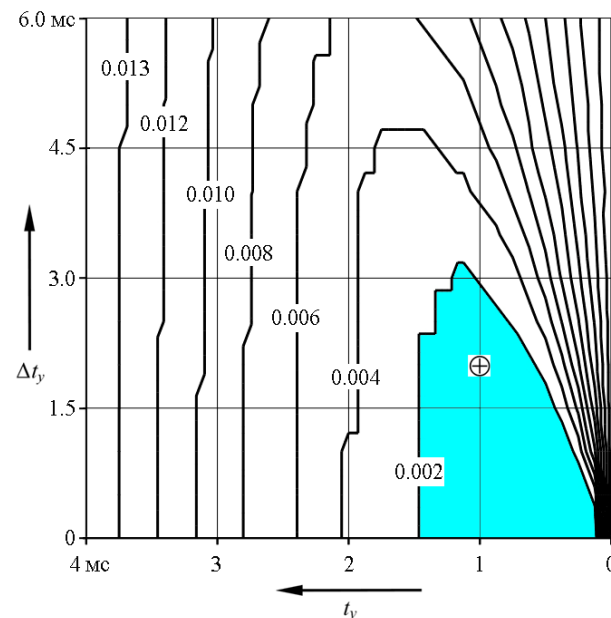


Рис. 5. Линии уровня затрат на одну коммутацию для экспериментального образца СВК. Выделена область параметров Δt_y и t_y , в которой затраты не превышают 0.002 грн

Некоторая ступенчатость поверхности на рис. 1 и линий на рис. 2-5 объясняется тем, что при плавном изменении параметров t_y и Δt_y затраты на коммутацию могут меняться скачкообразно. Это происходит, например, при переходе от варианта сочетания параметров t_y и Δt_y определяющего количество замен n некоторого комплектующего, к варианту с количеством замен $n+1$ или $n-1$. При изменении количества замен эксплуатационные затраты ступенчато изменяются на величину затрат, связанных с заменой данного комплектующего.

Чем меньше разброс времени упреждения, тем шире диапазон изменения t_y , обеспечивающий заданный уровень затрат. С увеличением разброса этот диапазон сужается (рис. 5).

ВЫВОДЫ

1. Для повышения информативности технико-экономического сравнения контакторов целесообразно использовать удельный показатель – затраты на одну коммутацию.

2. Полученная зависимость затрат на выполнение одной коммутации синхронным вакуумным контактором от времени упреждения и разброса времени упреждения размыкания контактов позволяет определить диапазон значений t_y , Δt_y , при котором затраты на коммутацию не превышают заданного значения.

3. Для повышения точности определения границ диапазона в расчётную формулу могут быть введены дополнительные технико-экономические показатели, например, затраты на простой оборудования, связанные с необходимостью замены изнашиваемых деталей контактора, затраты на ликвидацию аварий и другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхола А.В. Оценка технических и экономических характеристик синхронного вакуумного контактора // Вісник Криворізького технічного університету. – 2010. – №25. – С. 41-46.
2. Верхола А.В. Энергоресурсосберегающие свойства синхронного вакуумного контактора // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – №3/2011 (15). – С. 122-124.
3. Верхола А.В. Решение задачи оптимизации процесса отключения цепи синхронным вакуумным контактором // Вестник ХГПУ. – 2000. – №84. – С. 37-40.
4. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
5. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: учебник. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.
6. Верхола А.В. Методика оценки коммутационного износа контактов синхронного вакуумного контактора // Электрические контакты и электроды – Киев: Ин-т пробл. материалов им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 1999. – С. 56-62.
7. Верхола А.В. Влияние износа контактов вакуумной дугогасительной камеры на величину времени упреждения синхронного вакуумного контактора // Вісник СНУ. – 2004. – №12(82). – С. 20-25.
8. Верхола А.В. Методика обработки экспериментальных данных при измерении временных параметров синхронного вакуумного контактора // Вестник ХГПУ. – 2000. – №80. – С. 88-91.

Bibliography (transliterated): 1. Verkhola A.V. Otsenka tehnikeskikh i ekonomicheskikh harakteristik sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu*, 2010, no.25, pp. 41-46. 2. Verkhola A.V. Energoresursosberegayushchie svoystva sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, 2011, no.3/2011 (15), pp. 122-124. 3. Verkhola A.V. Reshenie zadachi optimizatsii protsessa otklyucheniya tsepi sinhronnym vakuumnym kontaktorom. *Vestnik HGPU*, 2000, no.84, pp. 37-40. 4. Mogilevskiy G.V. *Gibridnye elektricheskie apparaty nizkogo napryazheniya*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 232 p. 5. Soskov A.G., Soskova I.A. *Poluprovodnikovye apparaty: kommutatsiya, upravlenie, zaschita: uchebnik*. Kyiv, Karavella Publ., 2005. 344 p. 6. Verkhola A.V. Metodika otsenki kommutatsionnogo iznosa kontaktov sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Elektricheskie kontakty i elektrody*, 1999, pp. 56-62. 7. Verkhola A.V. Vliyanie iznosa kontaktov vakuumnoy dugogasitel'noy kamery na velichinu vremeni uprezhdeniya sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Visnyk SNU*, 2004, no.12(82), pp. 20-25. 8. Verkhola A.V. Metodika obrabotki eksperimentalnykh dannykh pri izmerenii vremennykh parametrov sinhronnogo vakuumnogo kontaktora. *Vestnik HGPU*, 2000, no.80, pp. 88-91.

Поступила (received) 15.10.2013

Верхола Александр Владимирович,
Донбасский государственный технический университет,
94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16,
тел/phone +380 06442 23123, e-mail: verkhola@mail.ru

A.V. Verkhola
Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine
Determination of economically justified parameters of synchronous disconnection at low-voltage circuit switching via a synchronous vacuum contactor.

Dependence of a single switching procedure cost upon the contact opening delay time and delay-time spread is derived for a low-voltage synchronous vacuum contactor. For different cost levels, boundaries of permissible values of delay-time and delay-time spread are specified.

Key words – low-voltage synchronous vacuum contactor, delay time, delay-time spread, cost levels, contact opening.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛАНСА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НАНОЧАСТИЦУ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Наведено аналітичні вирази розрахунку градієнту напруженості магнітного поля. Проведено моделювання стрижня матриці в робочому проміжку магнітної системи методом кінцевих елементів. Розподіл сили магнітного поля представлено у вигляді відносного коефіцієнта. Отримано рівняння балансу сил, яке враховує характер розподілу магнітної сили.

Приведены аналитические выражения расчёта градиента напряжённости магнитного поля. Проведено моделирование стержня матрицы в рабочем зазоре магнитной системы методом конечных элементов. Распределение силы магнитного поля представлено в виде относительного коэффициента. Получено уравнение баланса сил, которое учитывает характер распределения магнитной силы.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день нанотехнологии являются одним из самых быстроразвивающихся и перспективных направлений исследований. Магнитные наночастицы благодаря своим уникальным свойствам находят широкое применение в медицине и фармакологии [1-4]. На их основе разрабатываются новые лекарственные препараты, а также новые методы лечения и диагностики. Одной из проблем производства препаратов на основе магнитных наночастиц является получение монодисперсной фракции. Специальные методы синтеза позволяют сузить распределение по размерам наночастиц, но не всегда до нужных размеров [5]. Для этого также применяется контролируемое осаждение из раствора стабилизированных поверхностно-активными веществами наночастиц с последующим центрифугированием. Но данный процесс характеризуется низкой производительностью [6]. Для получения фракций с нужным размером частиц и удаления избытка поверхностно-активных веществ также может быть применена магнитная сепарация, поскольку фракции значительно различаются значением магнитного момента. Магнитные наночастицы относятся к слабомагнитным материалам, поэтому для разделения их на фракции необходимо применить методы, которые характеризуются высокими значениями магнитной силы. К таким методам относят, прежде всего, высокоградиентную магнитную сепарацию.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Высокоградиентная магнитная сепарация характеризуется наличием ферромагнитных тел в рабочем зазоре, которые, намагничиваясь, создают высокие значения градиента напряжённости магнитного поля. В качестве таких тел используют стальные шары [7], сетки [8] и стержни [9].

В [10] высокоградиентная сепарация с матрицей в виде стальной сетки применялась для извлечения клеточной популяции меченой магнитным наномаркером. Также данный процесс применяется при обогащении каолина и очистке сточных вод [9, 11, 12]. Указанные технологии предназначены для удаления всех магнитных частиц из потока жидкости. В настоящее время не существует высокоградиентных сепарационных систем предназначенных для извлечения определённой фракции наночастиц, поэтому дан-

ный вопрос требует теоретических и экспериментальных исследований.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является определение характера распределения магнитной силы вокруг намагниченного стержня матрицы высокоградиентного сепаратора, что позволит сформулировать баланс сил, действующих на наночастицу в сепарационном канале. В свою очередь из уравнения баланса сил можно получить требуемые параметры стержня и данные для построения области извлечения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как в данном случае задача состоит в том, чтобы извлечь определённую фракцию магнитных частиц, наиболее подходящий тип матрицы – это система ферромагнитных стержней расположенных перпендикулярно магнитному полю и ориентированных вдоль направления потока исходного препарата [13]. Известно, что сила магнитного поля прямо пропорциональна его градиенту:

$$F_m = \mu_0 m_p \text{grad} H_0, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Н/А²; m_p – собственный магнитный момент наночастицы, А·м²; H_0 – напряженность магнитного поля, А/м.

Следовательно, для определения характера распределения силы вокруг намагниченного стержня необходимо исследовать распределение градиента напряжённости поля.

Напряжённость поля намагниченного стержня в цилиндрических координатах определена в [9]:

$$H_r = \left(\frac{M_{rod} a^2}{2r^2} + H_0 \right) \cos \theta; \quad (2)$$

$$H_\theta = \left(\frac{M_{rod} a^2}{2r^2} - H_0 \right) \sin \theta; \quad (3)$$

$$H_z = 0,$$

где M_{rod} – намагниченность стержня матрицы, А/м, a – радиус стержня матрицы, м; r – расстояние до оси стержня матрицы, м; θ – угол, град.

На основании (2) и (3) получим выражения градиента напряжённости магнитного поля вокруг намагниченного стержня:

$$\frac{dH_r}{dr} = \frac{M_{rod}a^2}{r^3} \left(\frac{M_{rod}a^2}{2H_0r^2} + \cos 2\theta \right); \quad (4)$$

$$\frac{dH_\theta}{d\theta} = \frac{M_{rod}a^2}{r^3} \sin 2\theta. \quad (5)$$

С помощью пакета прикладных программ [14], которые используют метод конечных элементов, выполним моделирование магнитной системы с ферромагнитным стержнем в рабочем зазоре. Примем следующие значения параметров плоскостной модели, характерные для подобных систем: намагниченность полюсов магнитной системы 1520 кА/м, материал магнитопровода – магнитомягкая электротехническая сталь, магнитная проницаемость ферромагнитного стержня $\mu_r=1000$, окружающая среда – воздух ($\mu_r=1$). Результатом моделирования является визуализация градиента напряженности магнитного поля намагниченного стержня, которая показывает области притяжения (вдоль оси Ox) и отталкивания (вдоль оси Oy) для магнитных, парамагнитных и суперпарамагнитных частиц (рис. 1).

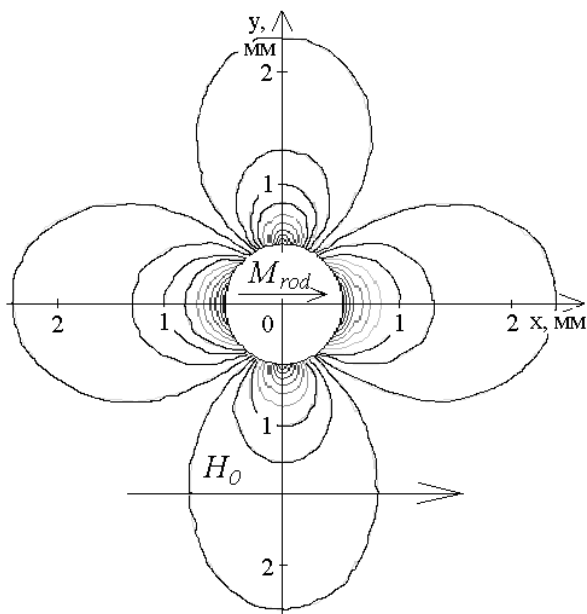


Рис. 1. Визуализация градиента напряженности магнитного поля намагниченного стержня

Известно, что при решении задач магнитостатики метод конечных элементов имеет большую достоверность. Сравним результаты, полученные по (4), (5) и результаты моделирования. Для этого удобно вести анализ распределения градиента напряженности поля вдоль оси Ox , т.е. когда $\theta = 0$. Проведём расчёт градиента напряженности магнитного поля по (4), (5) при следующих значениях: $H_0 = 1,0 \cdot 10^6$ А/м; $M_{rod} = 2,0 \cdot 10^6$ А/м; $a = 1$ мм; $\theta = 0$. Результаты расчёта и моделирования методом конечных элементов представлены на рис. 2.

На графиках распределения градиента напряженности, представленных на рис. 2, видно, что данные полученные разными способами практически совпадают. Следовательно, выражения (4), (5) могут быть использованы для определения градиента напряженности поля вокруг намагниченного стержня.

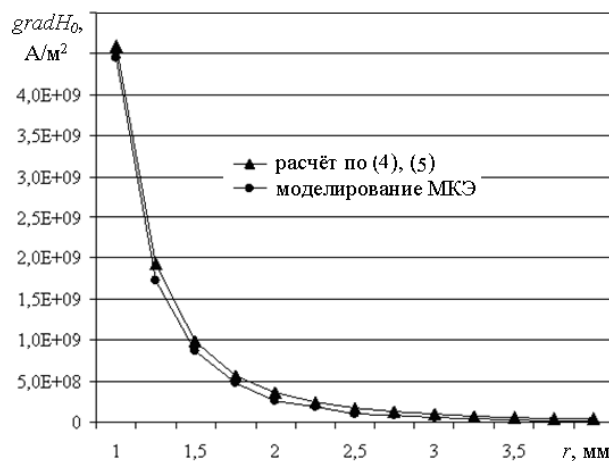


Рис. 2. Распределение градиента напряженности поля намагниченного стержня вдоль оси Ox

Представим распределение градиента напряженности в относительном виде. Согласно методологии, применённой в [9], отношение расстояния от оси стержня к его радиусу определяется коэффициентом:

$$r_a = \frac{r}{a}. \quad (6)$$

Относительный градиент можно представить как отношение градиента напряженности в точке, удалённой от оси стержня с радиусом a на расстояние r ($grad H_{ra}$) к максимальному градиенту ($grad H_{max}$), который наблюдается на поверхности стержня ($r_a=1$). Фактически, относительный градиент показывает, как уменьшается сила магнитного поля по мере удаления от поверхности стержня матрицы:

$$k_F = \frac{F_{mra}}{F_{m \max}} = \frac{grad H_{ra}}{grad H_{\max}}, \quad (7)$$

где k_F – коэффициент уменьшения магнитной силы; F_{mra} – сила магнитного поля в точке удалённой от оси стержня с радиусом a на расстояние r , Н; $F_{m \max}$ – сила магнитного поля на поверхности стержня, Н.

Выполним моделирование методом конечных элементов рабочего зазора магнитной системы шириной w , а также намагниченного стержня в рабочем зазоре (рис. 3). При намагниченности полюсов магнитной системы 1520 кА/м значение напряженности поля в рабочем зазоре составляет $1,0 \cdot 10^6$ А/м (рис. 3,а), а намагниченность стержня матрицы при этом: $2,0 \cdot 10^6$ А/м (рис. 3,б).

Анализ результатов моделирования показал, что при напряженности магнитного поля в рабочем зазоре (H_0) меньшей либо равной напряженности, необходимой для намагничивания ферромагнитного стержня до насыщения (H_s), выполняется равенство:

$$M_{rod} = 2H_0. \quad (8)$$

В [15] показано, что увеличение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре высокоградиентного сепаратора более 1000 кА/м (т.е. $H_0 > H_s$) не приводит к увеличению магнитной силы, так как магнитные частицы в сепарируемом продукте и материал матрицы достигают состояния магнитного насыщения.

Следовательно, магнитная система высокоградиентного сепаратора наночастиц по фракциям должна создать напряженность поля, значение которого доста-

точно для намагничивания наночастиц до насыщенного состояния (не менее 400кА/м [16]) и в то же время не превышать значения, при котором стержни матрицы намагничиваются до насыщения (1000кА/м [15]).

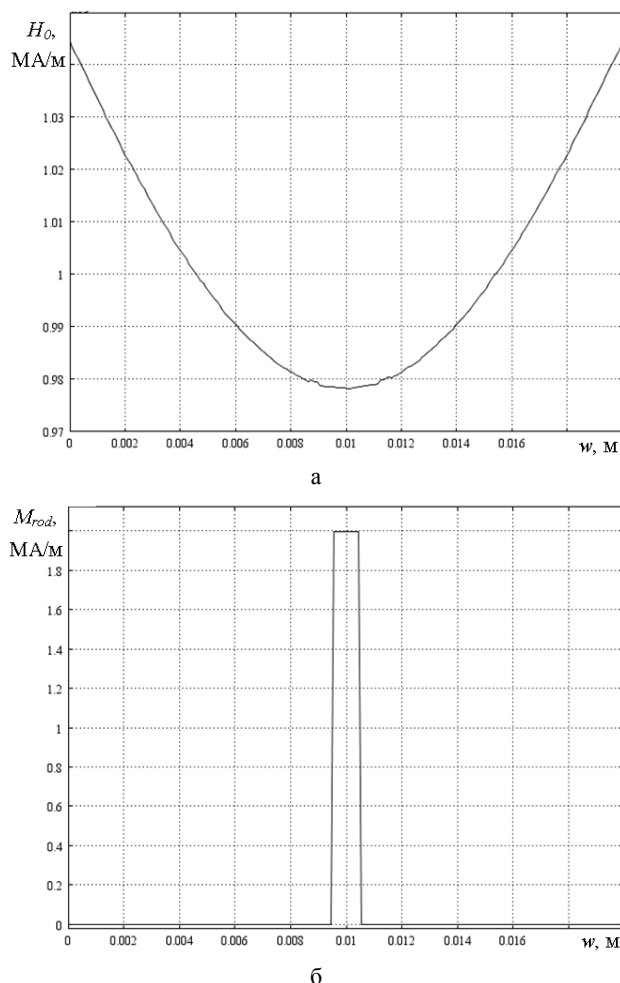


Рис. 3. Результаты моделирования методом конечных элементов: а – напряжённость поля в рабочем зазоре магнитной системы; б – намагниченность стержня в рабочем зазоре

Коэффициент уменьшения магнитной силы при условии $H_0 \leq H_s$ с учётом (4), (6), (8):

$$k_F = \frac{1}{2r_a^3} \left(\frac{1}{r_a^2} + 1 \right). \quad (9)$$

Полученный коэффициент позволяет сформулировать уравнение баланса сил, действующих на наночастицу заданной фракции, вдоль оси Ox :

$$k_F \sum F = F_m, \quad (10)$$

где $\sum F$ – сумма конкурирующих сил, действующих на частицу в потоке жидкости, Н.

Перепишем (10) учитывая (1), (4), (6), (8):

$$k_F \sum F = \frac{\mu_0 m_p M_{rod}}{r_a^3 a} \left(\frac{1}{r_a^2} + \cos 2\theta \right). \quad (11)$$

С помощью уравнения (11) можно определить радиус ферромагнитного стержня матрицы для извлечения наночастиц с известным значением магнитного момента. Решая (11) для стержня с определённым радиусом, при различных значениях θ , получим профиль области извлечения наночастиц заданной фракции.

ВЫВОДЫ

Данные, полученные моделированием методом конечных элементов, и расчёт по аналитическим зависимостям показывают практически точное совпадение значения градиента напряжённости поля вокруг намагниченного стержня матрицы. С помощью аналитических зависимостей значения градиента напряжённости и результатов моделирования получен относительный коэффициент уменьшения магнитной силы. Сформулировано уравнение баланса сил, которое позволяет рассчитать область извлечения, а также радиус стержня матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Г.А., Васильева О.С. Технология будущего: использование магнитных наночастиц в онкологии // Бюл. Сиб. отд. РАМН. – 2008. – №3 (131). – С. 18-22.
2. Першина А.Г., Сазонов А.Э., Мильто И.В. Использование магнитных наночастиц в биомедицине // Бюллетень сибирской медицины. – 2008. – №2. – С. 7078.
3. Ito A., Shinkai M., Honda H., Kobayashi T. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review. J. Bioscience Bioengineering, 2005, no.1, pp. 1-11.
4. Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K., Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. Topical review. J. Phys. D: Appl. Phys., 2003, no.36, pp. 167-181.
5. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение, свойства // Успехи химии. – 2005. – №74. – С. 539-574.
6. Баранов Д.А., Губин С.П. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные Технологии. – 2009. – №1. – С. 129-147.
7. Мясников Н.Ф. Полиградиентные магнитные сепараторы. М.: Недра, 1973.
8. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Kluwer Academic Publishers, 2004.
9. Gerber R., Birss R.R. High Gradient Magnetic Separation. Research Studies Press, London, 1983.
10. Šafarik Ivo, Ptackova L., Šafarikova M. Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents. Biotechnology Letters, 2001, no.23, pp. 1953-1956.
11. Buchholz B.A., Nunez L., Vandegrift G.F. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles. Sep. Sci. Technol., 1996, no.31, pp. 1933.
12. Moeser G.D. Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003.
13. Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е. Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации // Электротехника и электромеханика. – 2012. – №2. – С. 38-41.
14. Электронный ресурс: www.comsol.com.
15. Nadja Schultz. Application of magnetic separation technology for the recovery and re-use of immobilised lipase of Candida antarctica A-type. PhD Thesis, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Technische Biologie Karlsruhe, 2007.
16. Кириленко А.В., Чехун В.Ф., Подольцев А.Д., Кондратенко И.П., Кучерявая И.Н., Бондар В.В., Шпилевая С.И., Тодор И.Н. Анализ силового воздействия высокоградиентного магнитного поля на магнитные наночастицы в потоке жидкости / Доповіді національної академії наук України. – 2010. – №9. – С. 162-172.

Bibliography (transliterated): 1. Mihajlov G.A., Vasil'eva O.S. Tehnologija budushhego: ispol'zovanie magnitnyh nanochastic v onkologii. Bulletin Sib. otd. RAMS, 2008, no.3(131), pp. 18-22. 2. Pershina A.G., Sazonov A.E., Mil'to I.V. Ispol'zovanie magnitnyh nanochastic v

biomedicine. *Bulletin sibirskoj mediciny*, 2008, no.2, pp. 7078. **3.** Ito A., Shinkai M., Honda H., Kobayashi T. Medical application of functionalized magnetic nanoparticles. Review. *J. Bioscience Bioengineering*, 2005, no.1, pp. 1-11. **4.** Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K., Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. Topical review. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, no.36, pp. 167-181. **5.** Gubin S.P., Koksharov Yu.A., Homutov G.B., Yurkov G.Yu. Magnitnye nanochasticy: metody polucheniya, stroenie, svoystva. *Uspehi himii*, 2005, no.74, pp. 539-574. **6.** Baranov D.A., Gubin S.P. Magnitnye nanochasticy: dostizheniya i problemy himicheskogo sinteza. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informacionnye Tehnologii*, 2009, no.1, pp. 129-147. **7.** Mjasnikov N.F. *Poligradientnye magnitnye separatory*. Moscow, Nedra Publ., 1973. **8.** Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. Kluwer Academic Publishers, 2004. **9.** Gerber R., Birss R.R. *High Gradient Magnetic Separation*. Research Studies Press, London, 1983. **10.** Šafarik Ivo, Ptackova L., Šafarikova M. Large-scale separation of magnetic bioaffinity adsorbents. *Biotechnology Letters*, 2001, no.23, pp. 1953-1956. **11.** Buchholz B.A., Nunez L., Vandegrift G.F. Radiolysis and Hydrolysis of Magnetically Assisted Chemical Separation Particles. *Sep. Sci. Technol.*, 1996, no.31, pp. 1933. **12.** Moeser G.D. *Colloidal Magnetic Fluids as Extractants for Chemical Processing Applications*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003. **13.** Kondratenko I.P., Nekrasov A.V., Volkanin E.E. An electrical engineering system with compound bars for high-gradient magnetic separation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 38-41. **14.** Available at: www.comsol.com (accessed 23 June 2013). **15.** Nadja Schultz. *Application of magnetic separation technology for the recovery and re-use of immobilised lipase of Candida antarctica A-type*. PhD Thesis, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Technische Biologie Karlsruhe, 2007. **16.** Kirilenko A.V., Chehun V.F., Podoltsev A.D., Kondratenko I.P., Kucherjavaya I.N., Bondar V.V., Shpilevaya S.I., Todor I.N. Analiz silovogo vozdeystviya vysokogradientnogo magnitnogo polja na magnitnye nanochasticy v potoke zhidkosti. *Theses of National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, no.9, pp. 162-172.

Волканин Евгений Евгеньевич¹, аспирант,
Некрасов Андрей Викторович¹, к.т.н., доц.,
Оксанич Анатолий Петрович¹, д.т.н., проф.,
Ляшенко Виктор Павлович¹, д.т.н., доц.,

¹ Кременчугский национальный университет
им. Михаила Остроградского,
39600, Полтавская обл., Кременчуг, ул. Первомайская, 20,
тел/phone +38 053 743245, e-mail: volkaninz@yandex.ua

E.E. Volkanin¹, A.V. Nekrasov¹, A.P. Oksanych¹, V.P. Ljashenko¹

¹ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

Determination of nanoparticle force balance in an electrical magnetic separation system.

Analytical expressions for magnetic force gradient computation are given. FEM simulation of the matrix core in the working gap of a magnetic system is conducted. The magnetic force distribution is presented as a relative ratio. A force balance equation taking into account the magnetic force pattern is derived.

Key words – high gradient magnetic separation, magnetic nanoparticles, magnetic field gradient.

Поступила (received) 20.09.2013

INDUCTION HEATING OF ROTATING NONMAGNETIC BILLET IN MAGNETIC FIELD PRODUCED BY HIGH-PARAMETER PERMANENT MAGNETS

Обсуждается и моделируется прогрессивный метод индукционного нагрева немагнитных заготовок. Заготовка вращается в стационарном магнитном поле, создаваемом неподвижными высококоэрцитивными постоянными магнитами, закрепленными на магнитопроводе соответствующей формы. Математическая модель задачи, состоящая из двух связанных дифференциальных уравнений в частных производных, решается численно в "жесткой" постановке. Вычисления выполняются с использованием собственного программного обеспечения Agros2D на основе полностью адаптивного метода конечных элементов высоких порядков. Наиболее важные результаты подтверждены экспериментально на собственном лабораторном оборудовании.

An advanced way of induction heating of nonmagnetic billets is discussed and modeled. The billet rotates in a stationary magnetic field produced by unmoving high-parameter permanent magnets fixed on magnetic circuit of an appropriate shape. The mathematical model of the problem consisting of two coupled partial differential equations is solved numerically, in the monolithic formulation. Computations are carried out using our own code Agros2D based on a fully adaptive higher-order finite element method. The most important results are verified experimentally on our own laboratory device.

INTRODUCTION

Induction heating of nonmagnetic billets (mostly of aluminum) belongs to widespread heat treatment technologies applied before their hot forming [1]. To the date, three basic modifications of the process have been introduced in the industrial plants.

The oldest way is heating of an unmoving billet in a system of one or more harmonic or periodic current-carrying inductors (see Fig. 1).

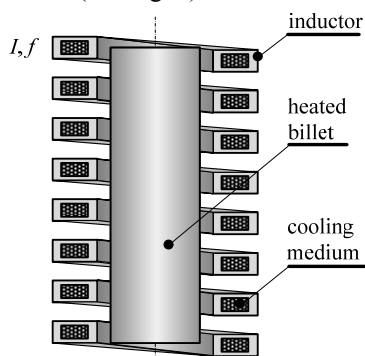


Fig. 1. Classical induction heating of billet in inductor carrying harmonic current of amplitude I and frequency f

Unfortunately, the efficiency of this way is rather low (reported values mostly do not exceed about 45 %), mainly due to high Joule losses in the inductor. More information can be found, for example, in [2-4].

Another technology introduced much later consists in rotation of a billet in static magnetic field produced by one or more longitudinal turns carrying direct current (see Fig. 2).

This way of heating, however, requires a very high magnetic field in order to obtain sufficiently high currents induced in the billet and corresponding Joule losses. This means very high field currents available only in superconducting systems. The Joule losses are now very low, but certain amount of energy is consumed by the cooling devices and for surpassing the drag electromagnetic torque. Presently, such systems work in few industrial plants, but their cost is high and reliability is rather poor. The efficiency is about 70 %. Fig. 3 shows a typical device of this kind at Weseralu (Germany) [5].

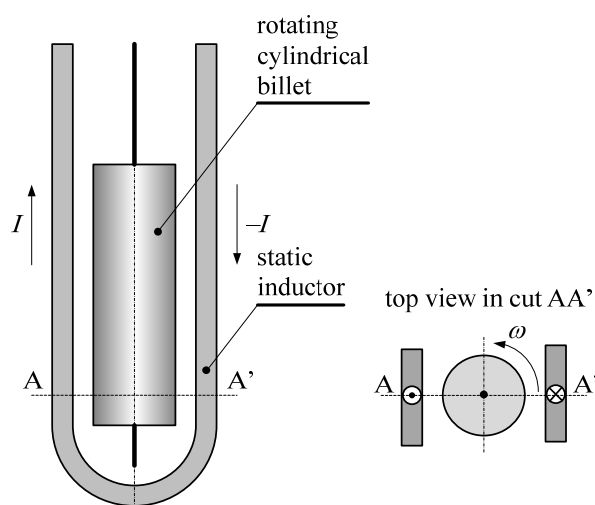


Fig. 2. Billet rotating in static magnetic field produced by direct-current carrying coil



Fig. 3. Induction heating of billet rotating in superconducting system (Weseralu, Germany, 2009)

In years 2009-2010, a new way of induction heating of the billets was suggested and investigated (Finland, Italy, Germany, Czech Republic), namely in static magnetic field produced by a system of high-parameter permanent magnets, see Fig. 4. The arrangement is characterized by the absence of Joule losses and its efficiency exceeds 80 %.

A year later, an inverse version of the system indicated in Fig. 4 was proposed, intended for heating billets of larger radii: a well dynamically balanced ring with permanent magnets rotates around an unmoving billet. Construction of such a system, however, is more complicated from the technological point of view.

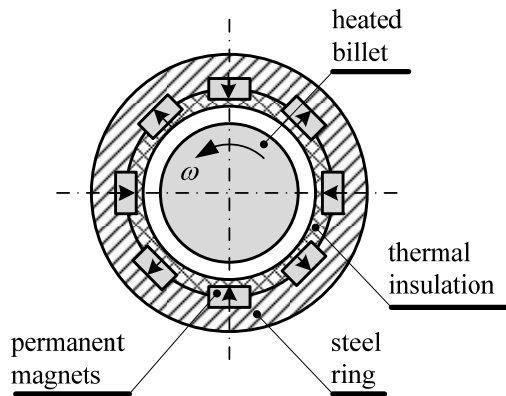


Fig. 4. Billet rotating in static magnetic field produced by high-parameter permanent magnets

FORMULATION OF TECHNICAL PROBLEM

In 2011, after a long testing and evaluating process we decided to build an experimental device for heating billets up to diameter of 60 mm. The device is depicted in Fig. 5. It consists of an induction motor driving the billet and an active part consisting of a massive magnetic circuit with fixed high-parameter permanent magnets. The cross section of the active part, together with its principal dimensions in mm, is shown in Fig. 6.

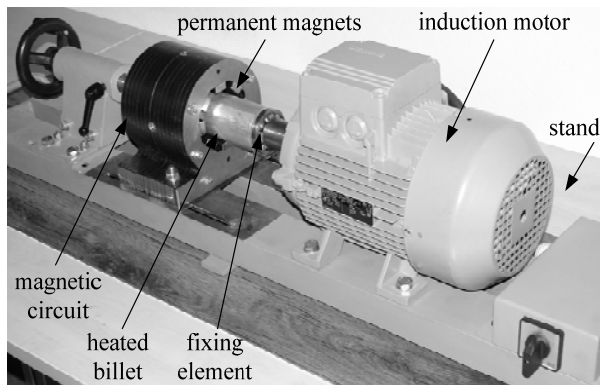


Fig. 5. View of laboratory device

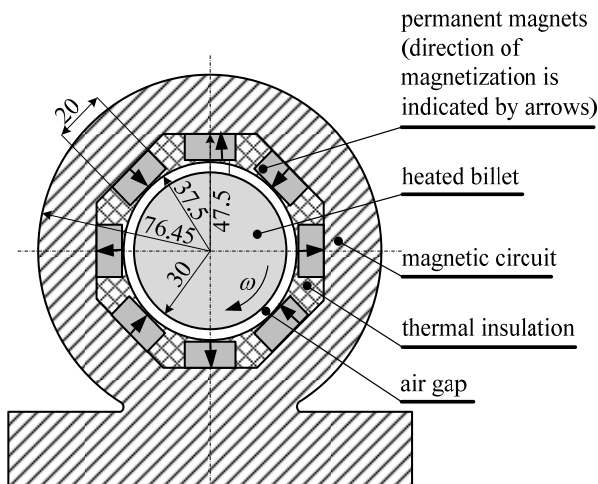


Fig. 6. Cross section of active part of laboratory device

The paper presents the complete continuous mathematical model that is solved numerically in the monolithic formulation and comparison of the most important results with relevant experimental data measured on the above model.

CONTINUOUS MATHEMATICAL MODEL

The problem is characterized by an interaction of two physical fields: magnetic field and temperature field. The volume changes of the billet due to its temperature rise are insignificant in this case and may be neglected.

Magnetic field can conveniently be described in terms of the magnetic vector potential A . Its distribution in the investigated system is given by the equation [6]

$$\text{curl} \left(\frac{1}{\mu} (\text{curl} A - B_r) \right) - \gamma v \times \text{curl} A = 0, \quad (1)$$

where μ is the magnetic permeability (in ferromagnetic materials permeability $\mu = \mu(B)$, B being the module of the magnetic flux density), B_r denotes the remanent magnetization (that is only considered in the permanent magnets, otherwise it vanishes), γ stands for the electric conductivity and v represents the vector of the local velocity of rotation.

The definition area is surrounded by a sufficiently distant boundary described by the Dirichlet condition $A = 0$.

The distribution of temperature field T in the system is described by the heat transfer equation [7]

$$\text{div}(\lambda \text{grad} T) - \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \text{grad} T \right) = -w, \quad (2)$$

where λ denotes the thermal conductivity, ρ is the specific mass, and c_p represents the specific heat at a constant pressure. The equation is time-dependent. The source term w stands for the volumetric heat generated in the material by the Joule and/or magnetization losses. Its value is generally given by the sum of the volumetric Joule losses w_J and volumetric magnetization losses (in ferromagnetic materials) w_m . Here,

$$w_J = \frac{1}{\gamma} |J_{\text{ind}}|^2, \quad J_{\text{ind}} = \gamma v \times \text{curl} A, \quad (3)$$

while the magnetization losses must be determined from the loss curves of the corresponding material or using an appropriate approximate (for example Steinmetz) formula.

The boundary condition respects the heat convection and may generally be expressed by the formula

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{ext}}) + \sigma C(T^4 - T_r^4), \quad (4)$$

where n represents the direction of the outward normal to the surface of the volume in which heat is produced, α denotes the coefficient of convection, T_{ext} is the average temperature of ambient air, $\sigma = 5.67073 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ is the Stefan-Boltzmann constant, C denotes the coefficient of the emissivity (and may also include the influence of the multiple reflections or configuration factor) and, finally, T_r represents the temperature of the reflecting surface.

Unfortunately, in most cases, the coefficients α and C occurring in boundary condition (4), cannot be determined accurately. That is why we use instead of (4) a simplified condition

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\text{gen}}(T - T_{\text{ext}}), \quad (5)$$

where α_{gen} represents a generalized coefficient of the convective heat transfer respecting also the heat losses in the fronts of the active parts of the arrangement. This coefficient has to be usually determined by means of specific measurements.

NUMERICAL SOLUTION

The material parameters are considered to be temperature-dependent functions. This is an important reason why the system must be solved in the hard-coupled formulation (monolithically); otherwise one could not avoid inaccuracies typical for the weakly coupled approach.

On the other hand, such a system of nonlinear and nonstationary PDEs in a 3D domain is still practically insolvable by the available means; the main reason is a relatively long time of heating (on the order of minutes). That is why a few simplifying assumptions had to be accepted:

- the arrangement is considered sufficiently long in the axial direction, so that both magnetic and temperature fields are calculated only in its cross section, as is depicted in Fig. 4. This means that the task is solved as a 2D problem;

- both computations and experiments confirmed that the temperatures of magnetic circuit and permanent magnets remain relatively low (they not exceed about 65 °C). The material properties of the ferromagnetic ring and permanent magnets, therefore, can be considered independent of the temperature.

The numerical solution itself was carried out by our own code. This code called Agros2D [8] cooperating with the library Hermes [9] is based on a fully adaptive higher-order finite element method [10]. Both the codes written in C++ are intended for the numerical solution of systems of generally nonlinear and nonstationary second-order partial differential equations (PDEs) and their principal purpose is to model complex physical phenomena. They are freely distributable under the GNU General Public License. Mentioned should be some of their unique features such as:

- solution of a system of PDEs may be solved in both weakly coupled and hard-coupled formulations. In the latter case the resultant numerical scheme is characterized by just one stiffness matrix;

- there are three kinds of the adaptive algorithms implemented in the code. Except for more common h -adaptivity and p -adaptivity, also the most sophisticated hp -adaptivity may be used;

- each of the mapped physical fields can be solved on a quite different mesh. For example, the temperature field is often highly smooth, so that it is not necessary to solve it on an unnecessarily dense mesh (such as in case of the magnetic fields). As far as the task is nonstationary, the meshes can evolve in time according to the results obtained in the previous step;

- the codes can work with the hanging nodes of any level, which leads to a substantial reduction of the degrees of freedom (DOFs);

- besides classical triangles, the codes are able to mix even quadrilateral and curved elements. The curved elements are very advantageous for accurate modeling curvilinear boundaries and interfaces.

ILLUSTRATIVE EXAMPLE

The methodology was used for mapping the process of induction heating of an aluminum billet of diameter 60 mm. The principal dimensions of the arrangement (in mm) are shown in Fig. 6. Its axial length is 300 mm.

Input Data:

- magnetic circuit: made of carbon steel CSN 12 040 of the Czech make (its magnetization characteristic being depicted in Fig. 7). As its temperature is low during the process, its magnetic permeability is considered temperature-independent.

- The permanent magnets VMM10 are of NdFeB type and their manufacturer provides the following parameters: remanence $B_r = 1.45$ T, relative permeability in the second quadrant $\mu_r = 1.21$ and maximum allowable temperature is 80 °C. Their dimensions are 10×20×40 mm.

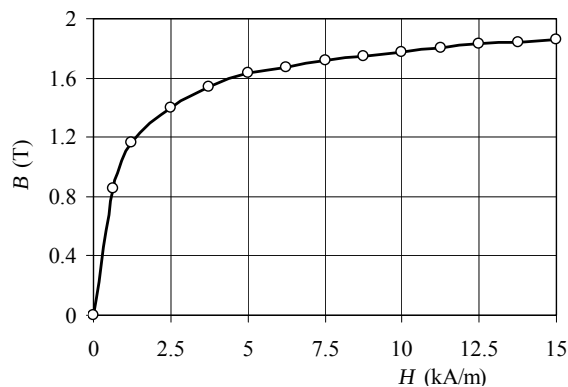


Fig. 7. Magnetization characteristic of steel CSN 12 040

- The thermal insulation is glass wool of very poor thermal conductivity ($\lambda = 0.12$ Wm⁻¹K⁻¹). Except for the front effects, the process of heating of the billet is then almost adiabatic (which was also confirmed both computationally and experimentally).

- Aluminum billet: as its manufacturer was not able to guarantee its exact chemical composition, its properties are described by the temperature-dependent parameters for pure aluminum. These are depicted in Figs. 8-10 (see [11]).

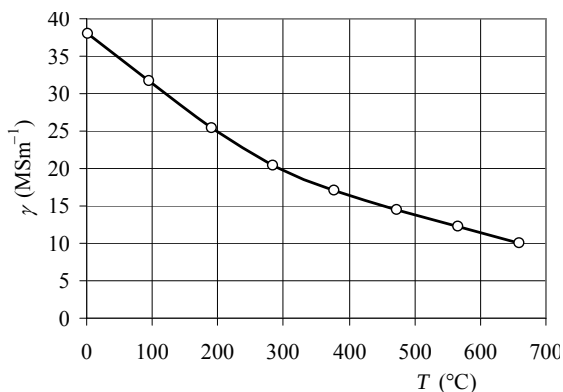


Fig. 8. Electric conductivity γ versus temperature T for pure Al

The principal parameters of the three-phase induction motor are as follows: $P = 3$ kW, $\cos \varphi = 0.82$, $n_{\text{nom}} = 1420$ rpm, $U = 230/400$ V. The initial temperature of the billet before heating (as well as the temperature of ambient air) $T_0 = 20$ °C.

A very complicated business was determination of the exact value of the coefficient α_{gen} , mainly because of the velocity of rotation, configurations factors, multiple reflections and surface properties. That is why this value was found using the experimental calibration consisting in the requirement that the calculated and measured surface temperatures of the billet are in the closest possible rela-

tion. In this way we obtained $\alpha_{gen} = 125 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, which respects all above items.

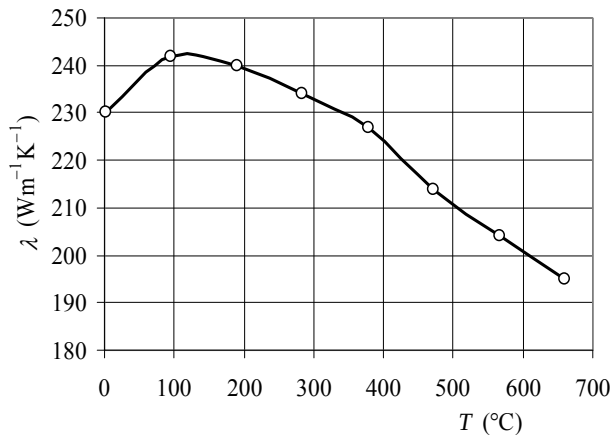


Fig. 9. Thermal conductivity λ versus temperature T for pure Al

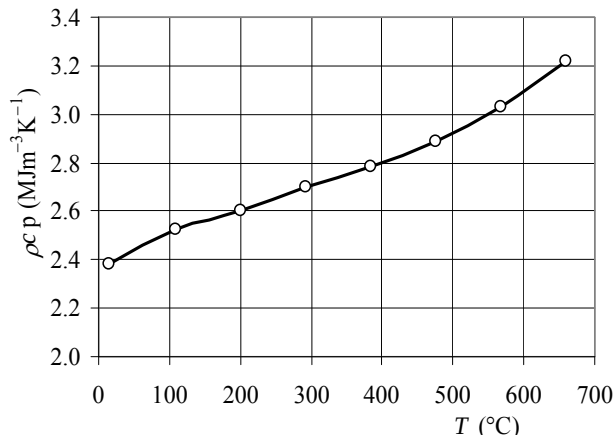


Fig. 10. Heat capacity ρc_p versus temperature T for pure Al

Results:

Fig. 11 shows a substantial part of the discretization mesh covering the active area (at the end of the process of adaptivity) used for computation of magnetic field in the system. The numbers in the rectangles denote the degrees of polynomials in particular elements.

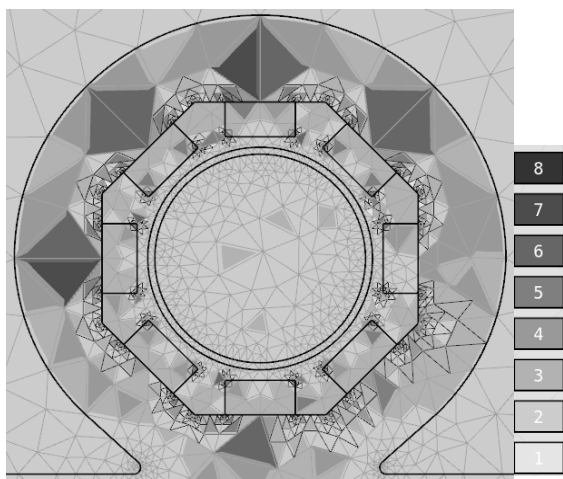


Fig. 11: Discretization mesh: light lines – before adaptivity, dark lines – after adaptivity, numbers in right column show orders of corresponding elements)

The billet is discretized using the triangular and curvilinear elements. The regions in the neighborhood of the

corners of the magnetic circuit representing the singular points are discretized by small triangles of low polynomial orders while places with expected smooth regions are covered by large triangles of high polynomial orders.

Fig. 12 shows the distribution of volumetric Joule losses w_J produced by the currents induced in the rotating billet. In accordance with theory, the highest (both positive and negative) values are generated in the surface layers of the billet.

Fig. 13 shows the distribution of temperature in the billet after 180 s of heating. The temperatures over its whole cross section do not differ more than by a few degrees of centigrade. This is caused by a very good thermal conductivity of aluminum.

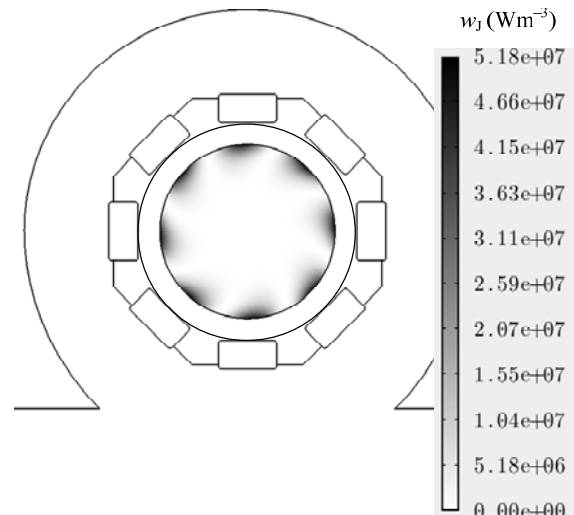


Fig. 12. Volumetric Joule losses w_J in billet at beginning of process of heating

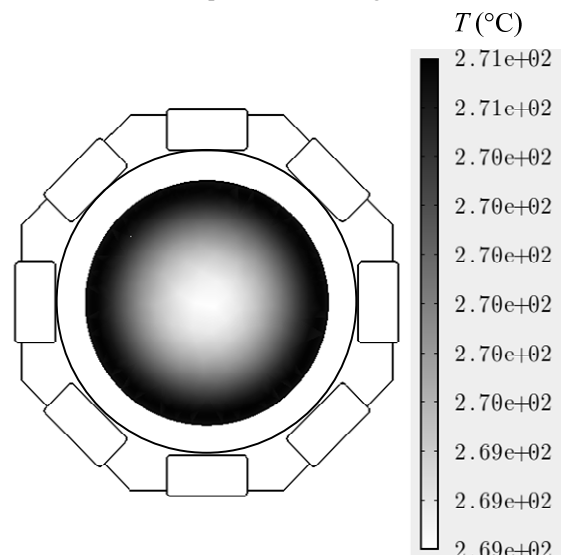


Fig. 13. Distribution of temperature T in billet after 180 s of heating for $n_{nom} = 1420 \text{ rpm}$

Fig. 14 compares the calculated and measured curves of the temperature evolution in the center and on the external surface of the billet. It is evident that the agreement is extremely good.

Another important quantity characterizing the process of heating is its efficiency η . Its value was both measured and calculated. The experimental value was determined as the ratio

$$\eta = \frac{Q_T}{\int_0^{t_{\max}} P_L dt}, \quad (6)$$

where Q_T denotes the heat used for the increase of temperature of the billet and P_L is the active power delivered to the loaded induction motor. Both values of P_L and Q_T are temperature-dependent. Symbol $t_{\max}$ denotes the time of heating. The total active power was measured in all phases by a network analyzer. It decreases with time, because the electric conductivity of the billet decreases with temperature, which leads to subsequent decrease of the induced currents, heat power and also electromagnetic drag torque acting on the billet (see Fig. 15).

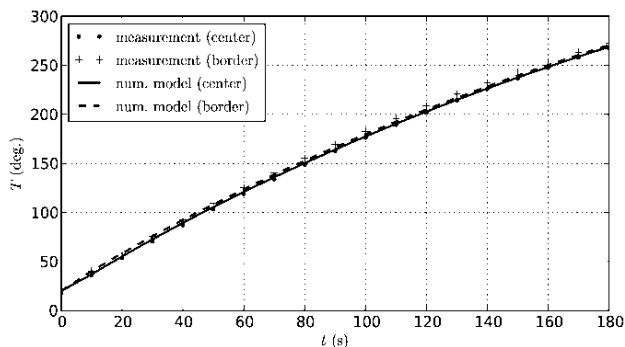


Fig. 14. Comparison of measured and calculated time evolutions of temperature in axis and on surface of billet

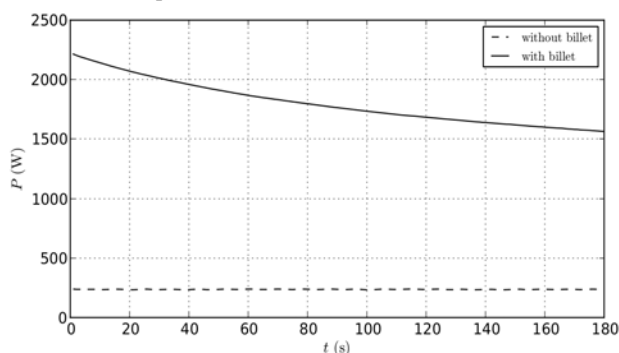


Fig. 15. Measured time evolutions of total active powers of loaded motor and unloaded motor

The heat Q_T can be determined from the formula

$$Q_T = \int_V \rho c_p (T - T_0) dV, \quad (7)$$

where T is the distribution of the final temperature of the billet after ending the heating process and V denotes the volume of the billet. Both measurements and computation provide $\eta = 78 \%$, which is much more in comparison with the classical process.

CONCLUSION

The paper present an alternative way of induction heating of nonmagnetic cylindrical billets consisting in their rotation in static magnetic field generated by high-parameter permanent magnets. The process is modeled and the model is numerically solved by own code based on a fully adaptive higher-order finite element method.

The principal results were verified on an experimental stand built in our laboratory that allows processing billets up to diameter 60 mm. The comparison between

the measurements and simulations is very good and confirms a high efficiency of the process.

Next work in the area will be aimed at the analysis of further possibilities of increasing efficiency of the process. Investigated will be also an inverse solution of the arrangement with unmoving billet and a ring with permanent magnets rotating around it (which will be built in near future).

ACKNOWLEDGMENT

Financial support of the Grant project GACR P102/11/0498 is highly appreciated.

REFERENCES

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.
2. Chaboudez C., Clain S., Glardon R., Mari D., Rappaz J., Swierkosz M. Numerical modeling in induction heating for axisymmetric geometries. *IEEE Trans. Magn.*, 1997, vol.33, no.1, pp. 739-735.
3. Nerg J., Partanen J. Numerical solution of 2D and 3D induction heating problems with non-linear material properties taken into account. *IEEE Trans. Magn.*, 1999, vol.35, no.3, pp. 720-722.
4. Jang J.Y., Chiu Y.W. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol.27, pp. 1883-1894.
5. Available at: <http://www.weseralu.de> (accessed 9 May 2012).
6. Kuczmanski M., Iványi A. *The Finite Element Method in Magnetics*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
7. Holman J.P. *Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York, 2002.
8. Karban P. and others. *Multiplatform C++ application for the solution of PDEs*. Available at: <http://agros2d.org> (accessed 15 May 2013).
9. Solin P. and others, *Hermes-Higher-order modular finite element system (User's guide)*. Available at: <http://hpfem.org/> (accessed 19 October 2012).
10. Solin P., Segeth K., Dolezel I. *Higher-Order Finite Element Methods*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2003.
11. *Temperature dependent elastic and thermal properties database*. Available at: <http://www.jahm.com> (accessed 2 May 2013).

Received 09.10.2013

Ivo Doležel¹, Professor,
Pavel Karban², Associate Professor,
Frantisek Mach², Ph.D. Student,
¹ Czech Technical University, Academy of Sciences
of the Czech Republic (Institute of Thermomechanics),
Technická 2, 182 00 Praha 8, Czech Republic,
e-mail: dolezel@fel.cvut.cz
² University of West Bohemia,
Univerzitní 26, 306 14 Plzeň, Czech Republic,
e-mail: karban@fel.zcu.cz, fmach@kte.zcu.cz

Key words – induction heating in rotation, monolithic model, higher-order finite element method, magnetic field, temperature field.

РЕВЕРС ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ШЕСТИФАЗНИМИ ОБМОТКАМИ

Доведено можливість здійснення реверсу в трифазних асинхронних двигунах з шестифазними обмотками на статорі. Показано, що під час реверсу шестифазні обмотки зберігають всі свої заявлені переваги.

Доказана возможность осуществления реверса в трехфазных асинхронных двигателях с шестифазными обмотками на статоре. Показано, что при реверсе шестифазные обмотки сохраняют все свои заявленные преимущества.

ВСТУП

Шестифазні обмотки трифазних асинхронних двигунів є поєднанням на загальному магнітопроводі двох обмоток трифазного струму. Одна з обмоток ввімкнена зіркою, інша обмотка вмикається трикутником. Ці обмотки повинні бути зміщені взаємно на $1/6$ полюсного ділення, а струми в них повинні бути зсунуті на $1/12$ періоду, причому фазні струми в обмотці, з'єднаний трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника. Шестифазні обмотки мають на 3,5 % більший обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці порівняно з трифазними обмотками та абсолютну відсутність в кривій МРС п'ятої та сьомої гармонік [1]. Коефіцієнт корисної дії збільшується, вібрації зменшуються на 30 % [2], що призводить до підвищення надійності роботи асинхронних двигунів з шестифазними обмотками.

"Донецький електротехнічний завод" в 2012 р. почав серійний випуск конвеєрних двообмоткових двигунів АДВК 355 LA12/4-М з шестифазними обмотками потужністю 85/250 кВт [2], "Луганський енергозавод" з 2011 р., ремонтуючи двигуни АИУМ потужністю 55 кВт, вкладає в статори шестифазну обмотку. По цій же схемі "Луганський енергозавод" приступає до ремонту двигунів 2ЭДКОФВ 250 потужністю 55 кВт і 110 кВт напругою 1140 В, а також починає серійний випуск двигунів ВАО2 560 LA4 потужністю 800 кВт напругою 6000 В і двигунів ВРМ 160 потужністю 25 кВт.

Деякі з зазначених двигунів повинні мати можливість бути реверсивними, тобто мати можливість зміни напрямку обертання ротора. В трифазних двигунах це досягається зміною чергування фаз статорних обмоток, для чого необхідно поміняти місцями відносно записки мережі будь-які два із трьох проводів, які з'єднують обмотку статора з мережею. Відносно асинхронних двигунів з шестифазними обмотками це питання слід розглянути окремо, тому що, наприклад, зсув фазних струмів трикутнкової обмотки по фазі в протилежному напрямі, в якому просторово зсунута обмотка трикутника, призведе до зменшення обмоткового коефіцієнта по основній гармоніці на 13,4 %, виникнення в кривій МРС п'ятої та сьомої гармонік [1].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

На рис. 1,а приведена схема шестифазної двополюсної обмотки, виконаної на $z = 12$ пазах, в якій фазні струми обмотки, з'єднаної трикутником, зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

Кількість пазів на полюс і фазу кожної окремої трифазної обмотки $q = 1$, тому кожна фаза складається з одної котушки. Поряд показана принципова електрична схема, дві трифазні обмотки включені паралельно, а також вектори МРС всіх фаз для миті часу, коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна.

Використовуючи розклад в ряд Фур'є для прямокутної форми кривої МРС окремої котушки:

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \pi v (T_0/T)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \quad (1)$$

де T_0 – крок котушки; T – просторова координата; дорівнює подвійному полюсному діленню; v – порядок гармоніки; x – змінна просторова координата; та вибравши початок координат по вісі фази А, з'єднаної в зірку, а також враховуючи просторовий зсув фаз В і С відповідно на кут 120° та 240° , одержимо значення МРС фазних обмоток, з'єднаних в зірку:

$$F_{AY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x,$$

$$F_{BY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2)$$

$$F_{CY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки потрібно скласти відповідні гармоніки всіх трьох фаз.

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Y} = \frac{1}{\pi} I_m w \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{8\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) \right] = \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right). \quad (3)$$

Лівобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут 120° , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5Y} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x \right). \quad (4)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7Y} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x). \quad (5)$$

МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник:

$$F_{A\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}),$$

$$F_{B\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{5\pi}{3}) \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}), \quad (6)$$

$$F_{C\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{9\pi}{3}) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{1}{\pi} I_m w \left(\sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) + \right.$$

$$\left. + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) \right) = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (7)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{1}{5\pi} I_m w \left[\sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi) + \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 5\pi) + \right.$$

$$\left. + \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 9\pi) \right] = \quad (8)$$

$$= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi).$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[\sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi) + \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 5\pi) + \right.$$

$$\left. + \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 9\pi) \right] = \quad (9)$$

$$= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi).$$

Складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (10)$$

Отже, перша гармоніка рухається вправо.

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,\Delta} = \frac{6}{5\pi} I_m w \times$$

$$\times \left[\sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x) + \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi) \right] = 0, \quad (11)$$

$$\sum F_{7Y,\Delta} = -\frac{6}{7\pi} I_m w \times$$

$$\times \left[\sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi) \right] = 0. \quad (12)$$

Як бачимо, в кривій МРС, створеній шестифазною обмоткою, відсутні п'ята та сьома гармоніки, а обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці $k_{об,1} = 1$.

Графік МРС шестифазної обмотки для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 1,б. Відповідні напрями струмів показані у верхній частині паів на рис. 1,а.

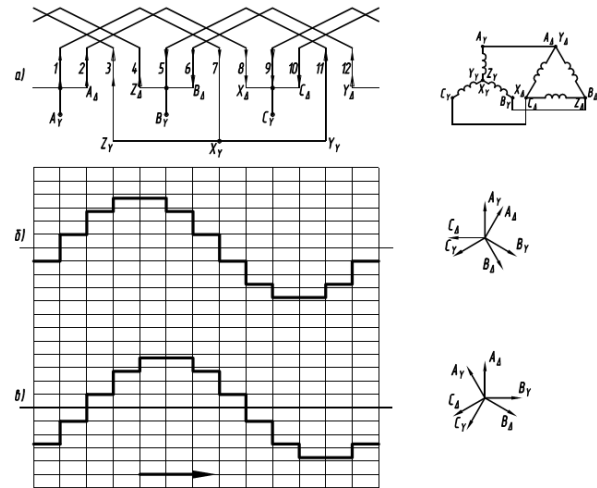


Рис. 1. Шестифазна обмотка ($z = 12, 2p = 2$)

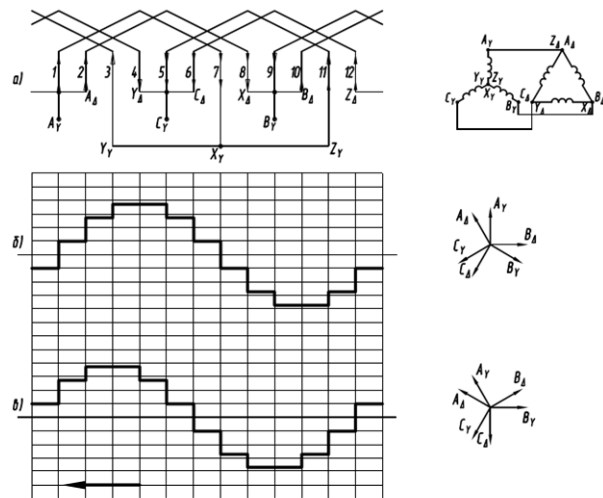


Рис. 2. Шестифазна обмотка ($z = 12, 2p = 2$) під час реверсу

При повороті векторів МРС всіх фаз на кут 30° в напрямі проти годинникової стрілки (в позитивному напрямі) графік МРС зміщується вправо (рис. 1,б). Відповідні напрями струмів показані у нижній частині паів на рис. 1,а.

На рис. 2,а показана шестифазна обмотка, в якій до фази В обмотки на рис. 1,а приєднується провід мережі, що живив попередню фазу С, а до фази С на рис. 1,а приєднаний провід, що живив фазу В.

Враховуючи, що струми мережі фаз А, В, С не змінились, а фази В і С помінялись місцями, МРС фазних обмоток, з'єднаних в зірку:

$$F_{AY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x,$$

$$F_{BY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3}), \quad (13)$$

$$F_{CY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Y} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x). \quad (14)$$

Правобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут 120° , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5Y} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x). \quad (15)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7Y} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x). \quad (16)$$

Враховуючи, що фазові струми трикутнкової обмотки випереджують на кут 30° струми обмотки, з'єднаної в зірку (рис. 2,б – вектори МРС), МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник:

$$\begin{aligned} F_{A\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \cdot \sin v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}), \\ F_{B\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{3\pi}{6}) \cdot \sin v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}), \\ F_{C\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6}) \cdot \sin v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}). \end{aligned} \quad (17)$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x). \quad (18)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x + \pi). \quad (19)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x - \pi). \quad (20)$$

Складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x). \quad (21)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\begin{aligned} \sum F_{5Y,\Delta} &= \frac{6}{5\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x + \pi) \right] = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum F_{7Y,\Delta} &= -\frac{6}{7\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x) + \sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x - \pi) \right] = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Графік МРС обмотки для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 2,б. Напрями струмів показані у верхній частині пазів на рис. 2,а.

При повороті векторів МРС всіх фаз на кут 30° в напрямі проти годинникової стрілки графік МРС зміщується вліво. Відповідні напрями струмів показані в нижній частині пазів на рис. 2,а.

ВИСНОВКИ

Однією з суттєвих переваг трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою є можливість здійснення реверсу простим способом: зміною порядку чергування фаз джерела живлення, або зміною підключення двох фаз.

У випадку трифазного двигуна з шестифазною обмоткою така можливість реверсу обґрунтована теоретично і підтверджена практичними дослідженнями.

Можливість здійснення реверсу простим способом дозволяє практично замінити всі трифазні обмотки в асинхронних двигунах шестифазними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лущик В.Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 42-44.
2. Лущик В.Д., Кирьянов В.В., Полезін С.Ю. Електромагнітний розрахунок трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №1. – С. 35-37.

Bibliography (transliterated): 1. Lushchik V.D. A six-phase winding of induction motors. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 42-44. 2. Lushchik V.D., Kiryanov V.V., Polezin S.Yu. Electromagnetic calculation of three-phase asynchronous motors with a six-phase winding. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 35-37.

Надійшла (received) 20.09.2013

Лущик В'ячеслав Данилович¹, д.т.н., проф.,

Полезін Сергій Юрійович¹, аспірант,

¹Донбаський державний технічний університет,

94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,

тел/phone +38 099 7654495,

e-mail: v.d.lushchik@yandex.ua, news4xander@mail.ru

V.D. Lushchik¹, S.Yu. Polezin¹

¹Donbass State Technical University

16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine

A reverse mode of three-phase asynchronous motors with hexaphase windings.

A reverse operation feasibility in three-phase asynchronous motors with the stator hexaphase windings is proved. In the reverse mode, the hexaphase windings are shown to keep all their declared advantages.

Key words – asynchronous motor, hexaphase winding, winding factor, MMF, higher harmonics, reverse mode.

МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ДВОПОЛЮСНИХ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ МАШИН ІЗ ЗБІЛЬШЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ГІЛОК

Подана методика створення двополусных обмоток асинхронных машин із збільшеною кількістю паралельних гілок у фазах в 1,5 і 2 рази порівняно з кількістю полюсів. Методика підтверджується результатами експериментальних досліджень.

Представлена методика создания двухполусных обмоток асинхронных машин с большим количеством параллельных ветвей в фазах в 1,5 и 2 раза по сравнению с числом полюсов. Методика подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Актуальність проблеми. В обмотках трифазних двополусних асинхронних двигунів середньої потужності при виготовленні котушок виникає необхідність у великій кількості елементарних (паралельних) провідників $n_{ел.}$ в цих котушках при максимально можливій кількості паралельних гілок $a=2p=2$.

Так, в двигунах серії А2 і АО2, які експлуатуються і періодично ремонтуються, в А2-82-2 $n_{ел.}=6$, в А2-91-2 $n_{ел.}=9$, А2-92-2 $n_{ел.}=11$. В двигунах з жорсткими котушками А102-2М, А103-2М, А112-2 – $n_{ел.}=4$.

В двигунах серії 4А – в 4А225М2 $n_{ел.}=6$ ($U_1=220/380$ В), в 4А250S2 $n_{ел.}=8$ при $U_1=380$ В і $n_{ел.}=6$ при $U_1=660$ В, в 4А250М2 відповідно $n_{ел.}=9$ і $n_{ел.}=6$. В двигунах з жорсткими котушками 4А280S2 і М2, 4А315S2 і М2, 4А355S2 – $n_{ел.}=4$, а в двигуні 4А355М2 $n_{ел.}=6$!

В той же час відомі рекомендації: "В сучасних машинах намагаються зменшити кількість елементарних провідників в одному ефективному до 5-6, а в обмотці, призначеній для механізованої укладки, до 2-3. В обмотках з жорсткими котушками $n_{ел.}$ зазвичай не більше двох. Виконання котушок із $n_{ел.}=4$ ускладнюється" [1].

Виникають проблеми і з одним елементарним провідником. В двигуні ВАО2-315L2, який серійно виготовляє Первомайський електромеханічний завод, площа поперечного перерізу елементарного прямокутного провідника $S=27,55$ мм², в двигуні ВАО2-280М2 – $S=24,66$ мм². Однак існує рекомендація: "Площа прямокутних провідників, із яких виготовляють жорсткі і напівжорсткі котушки, не повинна перевищувати 17-20 мм², оскільки при більших перерізах в провідниках обмотки значно збільшуються втрати від вихрових струмів" [2].

Якщо ж виконувати обмотки кількістю паралельних гілок у фазі в два рази більшим, ніж кількість полюсів, $a=4p=4$, то кількість елементарних провідників в котушках зменшується в два рази, площа перерізу елементарного прямокутного провідника при $n_{ел.}=1$ зменшується в два рази. Але такі обмотки не висвітлені в підручниках і посібниках з ремонту електричних машин, тому в більшості випадків виконання таких обмоток на ремонтних заводах призводить до появи значних зрівняльних струмів між паралельними гілками, що робить неможливою нормальну роботу машини.

Мета роботи – розробити методику створення трифазних двополусних обмоток кількістю паралельних гілок у фазах більшим, ніж кількість полюсів.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Відомі публікації по обмоткам із збільшеною кількістю паралельних гілок стосуються обмоток потужних турбогенераторів [3-5]. ЕРС в кожному провіднику обмотки якоря турбогенератора сягає багатьох сотень вольт, і при заданому значенні номінальної напруги неможливо виконати обмотку якоря при найбільш можливій кількості паралельних гілок, яке дорівнює кількості полюсів. Однак у відомих публікаціях приведені вже готові апробовані схеми, пояснення одержання обмоток із збільшеною кількістю паралельних гілок відсутні. Методика по конструюванню таких обмоток не була створена. Щоб пояснити причину, чому не з'явилась методика по створенню таких обмоток, приведемо цитату із монографії Жерве Г.К. [5]: "З огляду на різноманітність розподілу котушок в котушкових групах різних паралельних гілок нема можливості дати загальні правила обчислювання обмоткових коефіцієнтів, які можна вирахувати тільки методом проєкцій векторів ЕРС окремих пазів на дві взаємно перпендикулярні вісі".

На теперішній час, коли розроблена і відома універсальна формула розрахунку обмоткових коефіцієнтів [6], таку методику є можливість створити.

Матеріал і результати досліджень. На заводі "Луганський енергозавод" була виготовлена двополусна обмотка для двигуна 5АМН-315М2, який і спричинив дане дослідження. Потужність двигуна $P_2=250$ кВт, напруга $U_1=380/660$ В, струм $I=433/250$ А. Кількість пазів статора $z_1=48$, кількість пазів на полюс і фазу $q=8$, крок $y=1-16$. Кількість витків котушок $w_k=7$, провід $d_{зол.}=1,5$ мм із 9 елементарних (паралельних) провідників, кількість паралельних гілок $a=4$. Необхідність у збільшенні паралельних гілок виникла тому, що при двох паралельних гілках обмотку потрібно було б виконувати із 18 елементарних провідників. Таке виготовлення обмотки стає практично неможливим.

Обмотку виконали найбільш простим з точки зору технологічності способом: подвоєнням кількості паралельних гілок поділом існуючих паралельних гілок через одну котушку, одна фаза на одному полюсному поділі показана на рис. 1.

Обмоткові коефіцієнти можливо вирахувати по відомих формулам, якщо прийняти кут α не між двома поряд розміщеними пазами, а в 2 рази більшим:

$$\alpha = 2 \frac{360^\circ \cdot p}{z} = 2 \frac{360^\circ \cdot 1}{48} = 15^\circ, \quad (1)$$

а q – в два рази меншим:

$$q = \frac{z}{2 \cdot 2pm} = 4. \quad (2)$$

Тоді:

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 4 \cdot 7,5^\circ}{4 \cdot \sin 7,5^\circ} = 0,957662, \quad (3)$$

$$k_{ск.} = \sin \frac{15}{24} \cdot 90^\circ = 0,83147, \quad (4)$$

$$k_{об.} = k_p \cdot k_{ск.} = 0,79626.$$

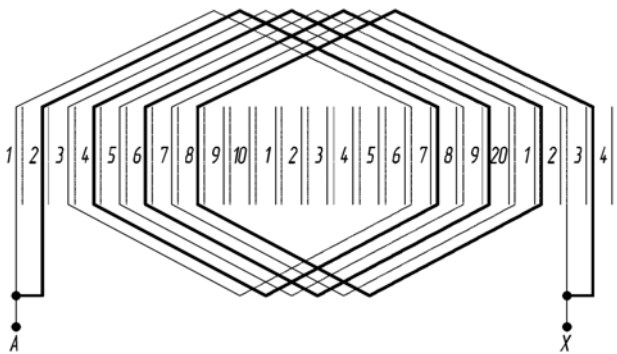


Рис. 1. Подвоєння кількості паралельних гілок

Обмоткові коефіцієнти для всіх паралельних гілок однакові, але ця однаковість оманлива. Умовою утворення паралельних гілок, які забезпечують відсутність зрівняльних струмів між паралельними гілками, є однакова кількість послідовно ввімкнених котушок в кожній гілці та однакове їх розміщення в магнітному полі. В даному випадку дві паралельні гілки, що знаходяться на одному полюсному поділі (рис. 1), зсунуті по фазі одна відносно іншої на кут $\alpha=7,5^\circ$, і геометрична різниця ЕРС двох паралельних гілок, що знаходяться на одному полюсному поділі:

$$\Delta E = 2 \cdot E_\phi \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} = 2 \cdot 380 \cdot \sin \frac{7,5^\circ}{2} = 49,7 \text{ В}. \quad (5)$$

Під дією цієї різницевої ЕРС в паралельних гілках обмотки виникає значний зрівняльний струм, який можна вирахувати за формулою:

$$I = \frac{\Delta E}{2\sqrt{R^2 + x^2}}, \quad (6)$$

де R і x – активний та індуктивний опір паралельної гілки.

В режимі холостого ходу при напрузі $U_n=380 \text{ В}$ і з'єднанні фаз трикутником були зроблені заміри струму і споживаної потужності: $I_0=120 \text{ А}$, $P_0=8,8 \text{ кВт}$. Нажаль, не був ввімкнений амперметр в одну із паралельних гілок, але судячи із швидкого нагрівання обмотки статора зрівняльний струм в паралельних гілках був не менший, ніж струм в номінальному режимі. Збільшення потужності P_0 більш як в 2 рази порівняно з обмоткою без зрівняльних струмів пояснюється виникненням гальмівного електромагнітного моменту, викликаного зрівняльними струмами.

Реальне уявлення про ЕРС паралельних гілок можливо отримати з допомогою універсальної методики розрахунку обмоткових коефіцієнтів [6]. Геометричну суму ЕРС паралельної гілки на комплексній площині визначаємо так:

$$\dot{E} = \sum_{n=1,2,\dots,n} (\cos n\alpha + j \sin n\alpha) - \sum_{k=1+y,2+y,\dots,n+y} (\cos k\alpha + j \sin k\alpha), \quad (7)$$

де n – перші сторони котушок паралельної гілки, k – другі сторони котушок цієї ж гілки.

Для першої паралельної гілки (рис. 1) $n=1, 3, 5, 7$; $k=16, 18, 20, 22$.

Після розрахунків за формулою (7) одержуємо вектор ЕРС першої паралельної гілки:

$$\dot{E}_1 = 6,35644 - j0,416625, \quad (8)$$

а модуль цієї комплексної величини

$$E_1 = \sqrt{(6,35644^2 + 0,416625^2)} = 6,37,$$

є величина ЕРС у відносних одиницях першої паралельної гілки.

Обмотковий коефіцієнт одержимо, поділивши величину ЕРС на кількість активних сторін котушок:

$$k_{об.} = \frac{E_1}{N} = \frac{6,37}{8} = 0,79626.$$

Одержаний обмотковий коефіцієнт повністю збігається з одержаним раніше по відомій формулі (4).

Аналогічно одержуємо вектор ЕРС для другої паралельної гілки ($n=2, 4, 6, 8$; $k=17, 19, 21, 23$):

$$\dot{E}_1 = 6,3563844 + j0,41663, \quad (9)$$

модуль:

$$E_1 = \sqrt{(6,3563844^2 + 0,41663^2)} = 6,37.$$

Величини ЕРС повністю співпадають, а вектори ЕРС відрізняються (формули 8 і 9).

Порівняння паралельних гілок набагато спрощується, якщо розглядати ЕРС тільки перших сторін котушок, що входять в паралельну гілку, тобто користуватись першою частиною формули (7).

Для першої гілки ($n_1=1, 3, 5, 7$) отримуємо ЕРС перших сторін котушок:

$$\dot{E}_{1,1} = 3,316744 + j1,9153244.$$

Модуль цієї комплексної величини: $E_{1,1}=3,83065$, а обмотковий коефіцієнт одержимо, поділивши модуль на кількість сторін котушок:

$$k_p = \frac{E_{1,1}}{N_1} = \frac{3,83065}{4} = 0,957662,$$

який є коефіцієнтом розподілу паралельної гілки і повністю збігається з одержаним по формулі (3). Якщо розглядувані котушки мають однаковий крок, коефіцієнт розподілу обчислюється із врахуванням розміщення тільки перших сторін котушок, тобто використовується перша частина формули (7).

Для другої гілки ($n_2=2, 4, 6, 8$) отримуємо ЕРС:

$$\dot{E}_{2,1} = 3,3039 + j2,33195.$$

Модуль $E_{2,1}=3,83065$, коефіцієнт розподілу $k_p=0,957662$.

Отже, паралельні гілки потрібно одержувати із таких котушок, геометрична сума ЕРС яких була б однакова.

З огляду на безкінечно велику кількість варіантів поєднання котушок в паралельні гілки, потрібно виявити явно неприйнятні варіанти, щоб їх не обраховувати. Зобразимо на рис. 2 в межах однієї фазної зони на одному секторі по радіусам 4 прийнятні варіанти поєднання котушок в паралельні гілки і виконаємо відповідний аналіз цих варіантів.

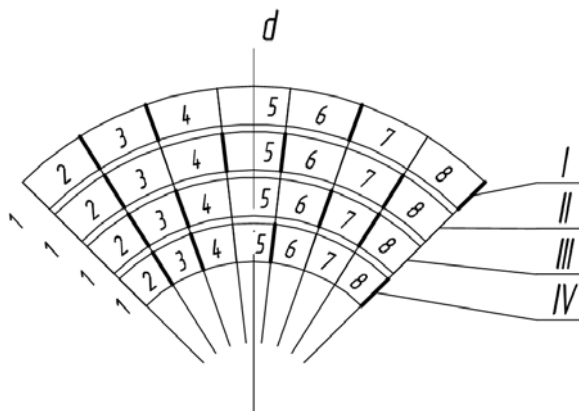


Рис. 2. Варіанти поєднання котушок в паралельні гілки для $q=8$

I варіант:

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 4, 5, 7$:

$$\dot{E}_{1,1} = 3,2596 + j2,03264; E_{1,1}=3,8414.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 3, 6, 8$:

$$\dot{E}_{1,2} = 3,0969 + j2,2146; E_{1,2}=3,8073.$$

II варіант:

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 3, 6, 8$:

$$\dot{E}_{2,1} = 3,12243 + j2,08634; E_{2,1}=3,7553.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 4, 5, 7$:

$$\dot{E}_{2,2} = 3,008705 + j2,25459; E_{2,2}=3,8227.$$

III варіант

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 4, 5, 8$:

$$\dot{E}_{3,1} = 3,15 + j2,1050; E_{3,1}=3,78877.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 3, 6, 7$:

$$\dot{E}_{3,2} = 3,20567 + j2,1542; E_{3,2}=3,86224.$$

IV варіант

Перша паралельна гілка, $n_1=1, 4, 6, 7$:

$$\dot{E}_{4,1} = 3,1733385 + j2,131; E_{4,1}=3,822455.$$

Друга паралельна гілка, $n_2=2, 3, 5, 8$:

$$\dot{E}_{4,2} = 3,1831587 + j2,116289; E_{4,2}=3,82247.$$

Аналізуючи показані на рис. 2 варіанти, можна зробити такі висновки:

1. Котушки паралельних гілок повинні бути рівномірно розподілені в межах фазної зони.

2. ЕРС паралельних гілок повинні співпадати по фазі.

3. Суми проекцій ЕРС сторін котушок кожної з паралельних гілок на вісь d (рис. 2) не повинні відрізнятися.

Найкраще цим вимогам задовольняє IV варіант, ЕРС паралельних гілок якого зсунуті по фазі на кут $\gamma=15'54''$, тобто практично співпадають, а максимальні значення ЕРС однакові.

В уже згадуваному двигуні 5АМН-315М2 котушки паралельних гілок згідно з рис. 1 були пе-

рез'єднані згідно IV варіанта (рис. 3). В режимі холостого ходу $I_0=78$ А, $P_0=4$ кВт. Струм зменшився в 1,5 рази, потужність холостого ходу – в 2,2 рази.

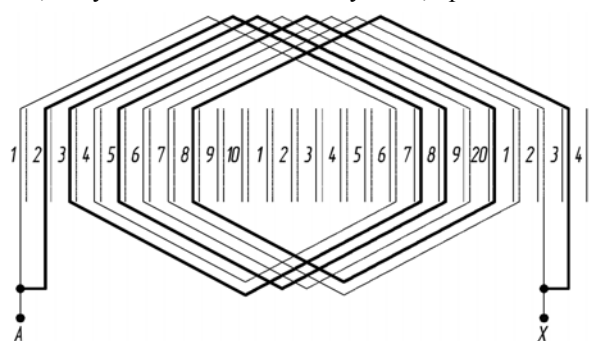


Рис. 3. Дві паралельні гілки з однаковими векторами ЕРС

На рис. 4, 5 показані найкращі варіанти для обмоток, що мають $q=6$ і $q=10$. Ці варіанти підтверджують зроблені висновки відносно способу об'єднання котушок в паралельні гілки.

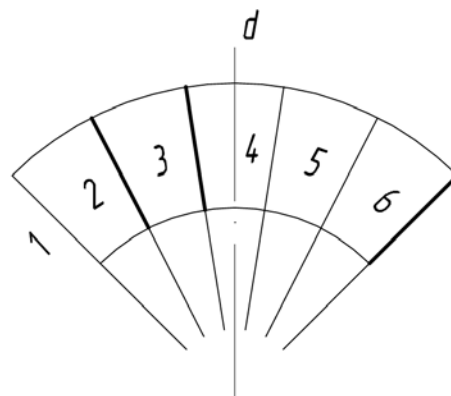


Рис. 4. Поєднання котушок в паралельні гілки для $q=6$

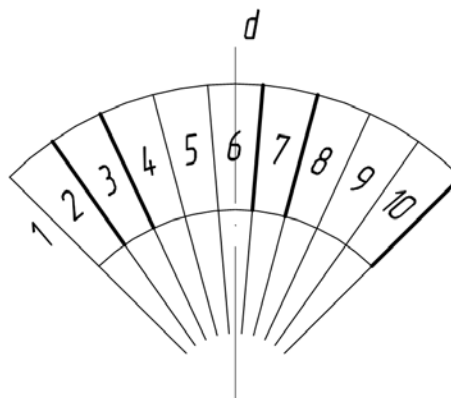


Рис. 5. Поєднання котушок в паралельні гілки для $q=10$

Для $q=6$

перша гілка $n_1=1, 4, 5$:

$$\dot{E}_1 = 2,39364 + j1,58248; E_1=2,86944;$$

друга гілка $n_2=2, 3, 6$:

$$\dot{E}_2 = 2,3057 + j1,708; E_1=2,86944.$$

Для $q=10$

перша гілка $n_1=1, 4, 5, 8, 9$:

$$\dot{E}_1 = 4,031 + j2,563427; E_1=4,777;$$

друга гілка $n_2=2, 3, 6, 7, 10$:

$$\dot{E}_2 = 3,981366 + j2,63987; E_1=4,777;$$

Використовуючи описаний спосіб об'єднання котушок в паралельні гілки, можливо створювати двополосні обмотки з кількістю паралельних гілок $a=3$. Збільшення кількості паралельних гілок в 1,5 рази можливе в обмотках, кількість пазів яких на полюс і фазу q кратне трьом, тобто в обмотках, що мають $q=6, 9, 12, 15$.

Так, наприклад, для $q=6$ дві паралельні гілки формуються з котушок, які розміщені на двох полюсних поділах. Для першої гілки – котушка 1, 3, 5 і котушка, розміщена в 23-му пази. Оскільки вектор ЕРС 23-го паза направлений зустрічно, ЕРС 23-го паза потрібно вираховувати з від'ємним знаком. Аналогічно дії проводять з другою гілкою.

Для першої гілки $n_1=1, 3, 5, -23$:

$$\dot{E}_1 = 3,1364 + j2,2057; E_1=3,834.$$

Для другої гілки $n_2=2, 4, 6, -19$:

$$\dot{E}_2 = 3,19 + j2,02465; E_2=3,778.$$

Для третьої гілки $n_3=20, 21, 22, 24$:

$$\dot{E}_3 = 3,0718 + j2,351; E_3=3,868.$$

ВИСНОВКИ

Розроблена методика створення двополосних обмоток асинхронних машин із збільшеною кількістю паралельних гілок дозволяє пропорційно зменшувати кількість елементарних провідників в котушках, виконуваних як із круглих провідників, так і з прямокутних провідників, що значно спрощує технологію виготовлення обмоток. У двигунах з одним елементарним прямокутним провідником у випадку його надмірно великого поперечного перерізу збільшення кількості паралельних гілок дозволяє пропорційно зменшувати поперечний переріз провідника.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гури́н Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

3. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. Турбогенераторы. Расчет и конструкция – М.: Энергия, 1967. – 895 с.
4. Титов В.В. Статорные обмотки с увеличенным числом параллельных ветвей // Электросила. – 1979. – № 32.
5. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 400 с.
6. Лущик В.Д. Універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 28-31.

Bibliography (transliterated): 1. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. *Proektirovanie serij jelektricheskikh mashin*. Moscow, Energija Publ., 1978. 480 p. 2. Kopylov I.P., Gorjainov F.A., Klovov B.K. and others. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin. Ucheb. posobie dlja vuzov*. Moscow, Energija, 1980. 496 p. 3. Titov V.V., Hutoreckij G.M., Zagorodnaja G.A. *Turbogenerator. Raschet i konstrukcija*. Moscow, Energija, 1967. 895 p. 4. Titov V.V. Statomnye obmotki s uvelichenym chislom parallel'nyh vetvej. *Elektrosila*, 1979, no.32. 5. Zherve G.K. *Obmotki jelektricheskikh mashin*. Leningrad, Energoatomizdat. Publ., 1989. 400 p. 6. Lushchik V.D. Universal method of winding coefficients calculation. *Electrical engineering & electromechnics*, 2011, no.1, pp. 28-31.

Надійшла (received) 20.09.2013

Лущик В'ячеслав Данилович¹, д.т.н., проф.,
Тимошенко Володимир Олексійович², голова правління,
¹Донбаський державний технічний університет,
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,
тел/phone +38 099 7654495, e-mail: v.d.luschnik@yandex.ua,
²ПАТ "Луганський енергозавод",
91020, Луганськ, вул. Руднева, 56,
тел/phone +38 0642 934412, e-mail: lez-zavod@ukr.net

V.D. Lushchik¹, V.O. Tymoshchenko²

¹Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine

²Public Joint Stock Company "Lugansk Energozavod"
56, Rudnev Str., Lugansk, 91020, Ukraine

A 2-pole winding development technique for asynchronous machines with increased number of parallel branches.

A 2-pole winding development technique is introduced for asynchronous machines with the number of parallel branches in phases increased in 1.5 and 2 times as compared with the number of poles. The technique is confirmed by results of pilot studies.

Key words – asynchronous machine, 2-pole winding, parallel branch, EMF, winding factor.

КЛАССОВАЯ СТРУКТУРА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ UML-ДИАГРАММ

Приведені результати теоретичних досліджень, показано формування математичної моделі довільного електро-механічного перетворювача енергії шляхом наслідування від узагальненого класового шаблону.

Приведены результаты теоретических исследований, показано формирование математической модели произвольного электро-механического преобразователя энергии путем наследования от обобщенного классового шаблона.

Строгая постановка такой сложной проблемы, как пояснение принципов формообразования и структурообразования объектов электромеханики невозможна без наличия научно обоснованной классификации их порождающих структур. Определение признаков и принципов построения такой классификации составляет отдельную проблему системного характера [1].

Фактическое отсутствие научно-обоснованных подходов, которые можно было бы положить в основу структурной классификации электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), привела к тому, что в электромеханике существует путаница в вопросах классификации большого количества структурных и функциональных разновидностей электрических машин (ЭМ).

Структурно-системные исследования, которые в последнее время проводятся в направлении создания обобщенной теории физических структур, определения закономерностей общего развития технических систем в целом, не могут быть использованы для решения фундаментальных и прикладных задач электромеханики, так как они имеют общий характер и не учитывают особенностей структурной организации и специфики электромагнитных процессов, определяющих функционирование и поведение электромеханических систем (ЭС).

Так, электрические машины разделяют на синхронные и асинхронные, беря за основу классификации соотношение между угловыми скоростями ротора ω_r и поля статора ω_s . Электрические машины делят по роду питания [2]. Надо ли говорить, что такая классификация является условной? Ведь одна и та же машина может работать и как синхронная, и как асинхронная, а при наличии выпрямителей машину постоянного тока можно использовать в сети переменного тока. Не более удачным является классификация ЭМ по их математическим моделям, а именно по числу уравнений, отражающих процессы электромеханического преобразования энергии [2]. Так, для определенного числа полюсов и числа обмоток на статоре и роторе приводятся уравнения напряжений и пары произведений токов в статоре и роторе в уравнении электромагнитного момента. По сформированной таблице "можно для машин с определенным числом обмоток и гармоник в воздушном зазоре представить сложность уравнений, оценить необходимое время для программирования". Также утверждается, что классификация ЭМПЭ по виду их математических моделей "позволяет накопить стандартные программы для ЭВМ и сравнительно быстро определить динамические и статические характеристики для задач электромеханики, не прибегая всякий раз к составлению уравнений и программ".

Однако, приведенные выше выдержки из работы [2] можно считать скорее внутренним содержанием объ-

ектов электромеханики (и в этом плане к ним замечаний нет), способом их математического описания, но никак не средством классификации. Математическая модель – это лишь абстрактное представление реальных объектов, способная замещать его в определенных отношениях, дающая при ее исследовании, в конечном счете, информацию о самом моделируемом объекте.

В последние годы интенсивно развивается информационная технология, особенно в направлении исследований, называемых искусственным интеллектом.

Общие недостатки, как традиционных информационных систем, так и методов программного представления расчета, моделирования и проектирования ЭМПЭ, заключаются в слабой адаптивности к изменениям в предметной области и информационным потребностям пользователей, в невозможности решать плохо формализуемые задачи, с которыми проектировщики постоянно имеют дело: анализ проблемных ситуаций, возникающих в расчетных процессах, прогноз дальнейшего использования и надежности, принятие решений и выбор оптимального варианта в задачах оптимизации. Для решения подобных задач разрабатываются и используются системы искусственного интеллекта.

Более того, существующая классификация и алгоритмы расчета ЭМПЭ базируются на устаревших принципах, так называемых "процедурных" языках программирования. Современные объектно-ориентированные языки программирования и программные платформы разработки программного обеспечения нуждаются в изменении принципов классификации и структурообразования ЭМПЭ.

В данной работе рассматриваются модели, методы и средства разработки программных систем ЭМПЭ на основе методологии объектно-ориентированного анализа и проектирования [3-5].

Основная идея объектного подхода состоит в том, чтобы заключить данные и связанные с ними процедуры в некие структуры (объекты), объединенные механизмом наследования. Объектно-ориентированный подход к моделированию и проектированию программных систем наилучшим образом подходит для решения проблем, требующих детального представления объектов реального мира и динамических отношений между ними. В таких программах компоненты сложной системы представляются структурами, инкапсулирующими и данные, и функции, моделирующие поведение соответствующих компонентов.

Основные идеи объектно-ориентированного подхода опираются на следующие положения:

- программа представляет собой модель некоторого реального процесса, части реального мира;

- модель реального мира или его части может быть описана как совокупность взаимодействующих между собой объектов;

- объект описывается набором параметров, значения которых определяют состояние объекта, и набором операций (действий), которые может выполнять объект;

- взаимодействие между объектами осуществляется посылкой специальных сообщений от одного объекта к другому. Сообщение, полученное объектом, может потребовать выполнения определенных действий, например, изменения состояния объекта;

- объекты, описанные одним и тем же набором параметров и способные выполнять один и тот же набор действий, представляют собой класс однотипных объектов.

Философия представления знаний о реальном мире в терминах взаимодействия объектов и субъектов предоставляет достаточно удобную среду для решения большого класса задач моделирования и проектирования сложных систем, в том числе систем искусственного интеллекта. Методика представления абстрактных данных и процедур позволяет разработчикам на ранних этапах сосредоточиться на выборе подходящих видов объектов и их поведении, не вдаваясь в подробности реализации функций и структур данных.

Методология объектно-ориентированного анализа и проектирования получила широкое распространение с появлением языка объектного моделирования нового поколения – унифицированного языка моделирования Unified Modeling Language (UML), предназначенного для визуального моделирования и проектирования информационных систем [6]. Применение современных средств моделирования позволяет реализовать такие методы системного анализа, как создание иерархии понятий, обобщение понятий, наследование свойств, многообразие моделей описания предметной области, визуализацию представлений о процессах, протекающих в рассматриваемой предметной области.

В связи с этим значение языка UML существенно возрастает, поскольку он все более приобретает черты языка представления знаний. При этом, наличие в языке UML изобразительных средств для представления структуры и поведения модели, позволяет достичь адекватного представления декларативных и процедурных знаний и, что не менее важно, установить между этими формами знаний семантическое соответствие. Все эти особенности языка UML позволяют сделать вывод о том, что он имеет самые серьезные перспективы в качестве средства разработки моделей представления знаний.

Классовая структура математической модели обобщенного ЭМПЭ представлена в виде UML-диаграммы на рис. 1.

Особенностью диаграммы, показанной на рис. 1 является то, что она выступает в роли некоего шаблона, а говоря в терминах программирования, класса обобщенной электрической машины. Другими словами, изначально отсутствует деление ЭМПЭ по каким-либо признакам. Кроме того, ключевыми словами являются "класс" и "обобщенный". Диаграмма не является сущностью, замещающей реальную машину – это инструмент для генерации множества объектов-машин посредством предоставляемых инструментов наследования и выбора.

На диаграмме (рис. 1) блок атрибутов является матрицей параметров обобщенной модели ЭМПЭ,

записанной в представленном случае, для двухфазной системы координат. Обобщенная модель, характерная для любых типов машин, уточняется посредством блоков, расположенных ниже. Блок дополнительных атрибутов представляет собой набор модификаторов параметров цепей статора и ротора в системе дифференциальных уравнений [2]. Блок напряжений отвечает за источники питания первичной и вторичной цепей машины. Связанные блоки функции вращения и событий являются модификаторами вращения вторичного элемента. Наконец, набор атрибутов с подмножеством ассоциаций формирует требования ко вторичному элементу машины.

Пользуясь классовым шаблоном обобщенного ЭМПЭ (рис. 1) и выбирая определенные признаки, можно перейти к объекту конкретного ЭМПЭ. Так, на рис. 2 показана уже не классовая, а объектная диаграмма асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, порожденного из классовой диаграммы рис. 1.

На рис. 3 показана диаграмма, аналогичная приведенной на рис. 2, но с обозначениями, присущими для математических моделей, записанных в дифференциальной форме. Так, показанная на диаграмме таблица с занесенными в нее модификаторами, является ничем иным, как матрицей параметров в системе дифференциальных уравнений обобщенного ЭМПЭ.

Алгоритм формирования объектной модели показан на рис. 4. Эта диаграмма носит названия диаграммы состояний. Модель состояний описывает последовательности операций, происходящих в системе в ответ на внешние воздействия (в противоположность содержанию, предмету и реализации операций, описываемых моделью классов) [6].

Диаграммы на рис. 2, 3 являются непосредственным воплощением асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в виде абстрактной модели, по которой можно выполнять расчеты. Аналогичным образом, можно порождать объектные модели как известных видов ЭМПЭ, так и еще не созданных, наделяя их новыми признаками.

В настоящее время программные продукты и средства моделирования и проектирования электрических машин представлены преимущественно объектно-ориентированными языками программирования, такими как Visual Basic, Delphi, C++, C#, Eiffel, Oberon, Java. В то же время, описанные в многочисленных учебниках и справочной литературе алгоритмы, последовательности расчета электрических машин идеологически соответствуют устаревшему и изжившему себя процедурному подходу в программировании. Разработчик программного продукта выполняет лишний шаг, сначала переделывая процедурную методику в объектную, а затем объектную в программный код.

Целью последующих исследований автора является приведение в соответствие расчетных методик электромеханических преобразователей энергии их программному отображению согласно объектно-ориентированной концепции. Ведь, несмотря ни на что, машины рассчитываются, и будут рассчитываться не вручную, по формулам, а в объектно-ориентированных программах. Поэтому, представляется актуальной проблема именно объектно-ориентированного расчета и моделирования электрических машин.

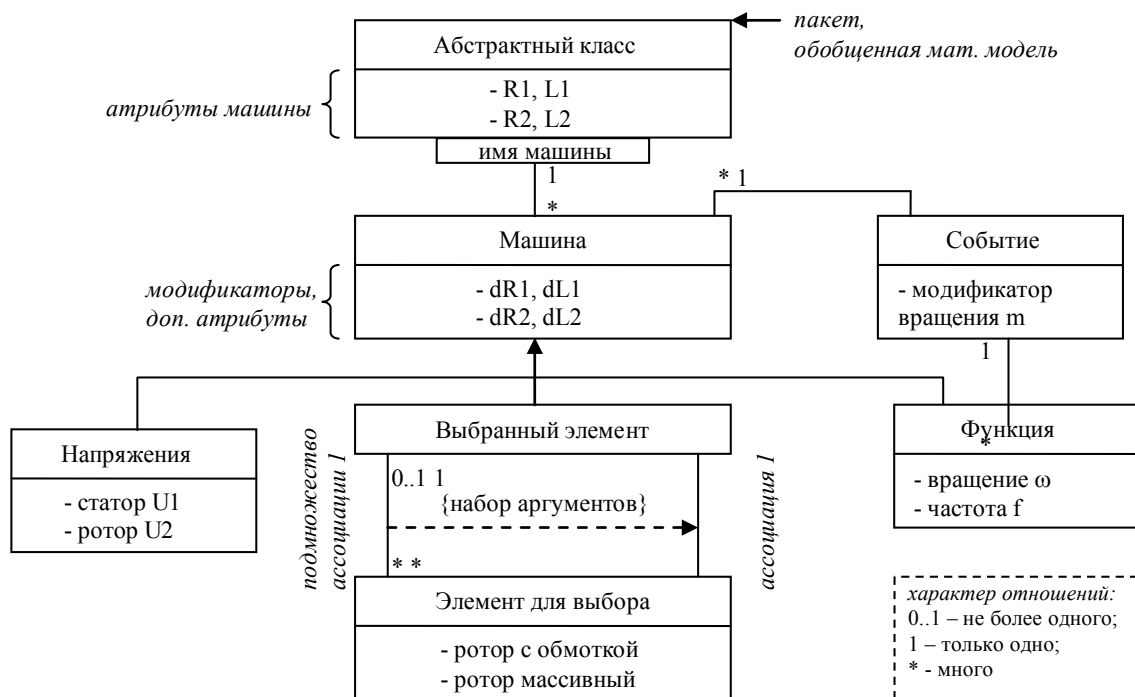


Рис. 1. Классовая модель обобщенного ЭМПЭ

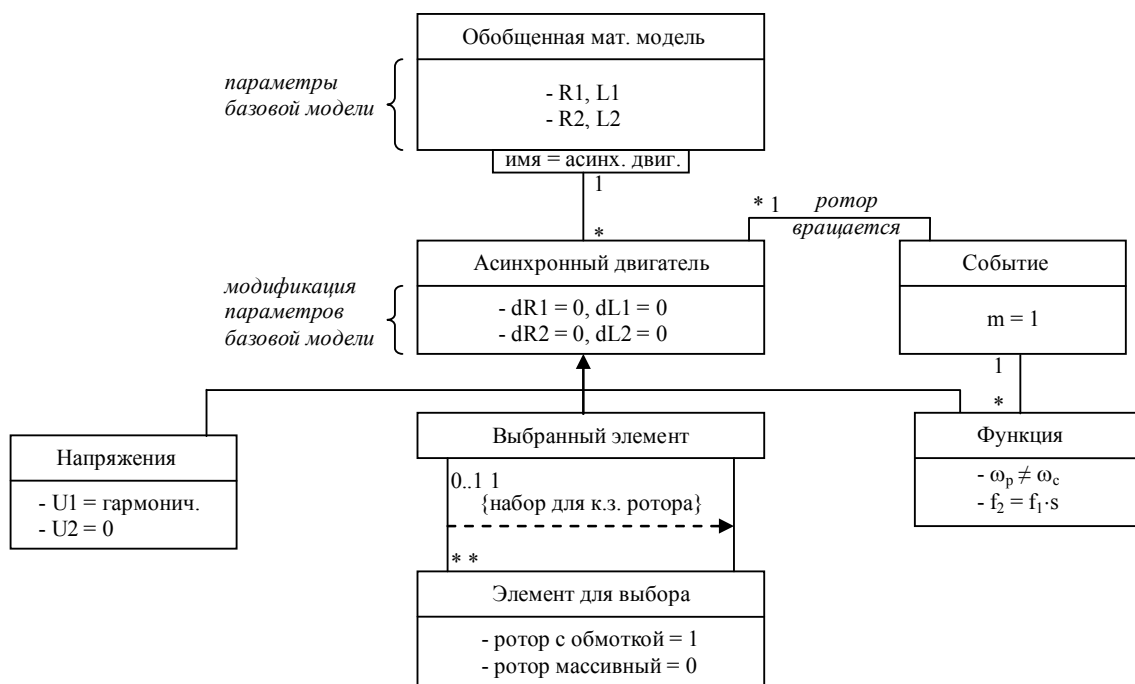


Рис. 2. Диаграмма объекта: асинхронный двигатель с к.з. ротором

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы существующие подходы к классификации разновидностей ЭМ и доказана их несостоятельность в отношении адекватного отражения картины реального мира. В качестве инновационного метода классификации видов ЭМ предложен подход, основанный синтезе моделей с использованием диаграмм UML.

2. Все многообразие ЭМПЭ представлено в виде диаграммы классов, содержащей атрибуты наследования, ограничения, события выбора, элементов агрегации и композиции. Классовая диаграмма ЭМПЭ является абстрактным шаблоном для порождения

объектных моделей конкретных видов ЭМПЭ.

3. Особенностью классового представления ЭМПЭ в виде универсальной диаграммы является отсутствие деления машин по каким-либо признакам. Наоборот, любую машину можно получить из универсальной диаграммы, задаваясь определенными предпосылками. Это касается как уже известных на сегодняшний день видов машин, так и еще не открытых.

4. Объектные модели, порожденные от класса обобщенного ЭМПЭ, обладают признаками, присущими конкретному виду ЭМПЭ. Объектная модель приводит к формированию математической модели ЭМПЭ, готовой к расчетам.

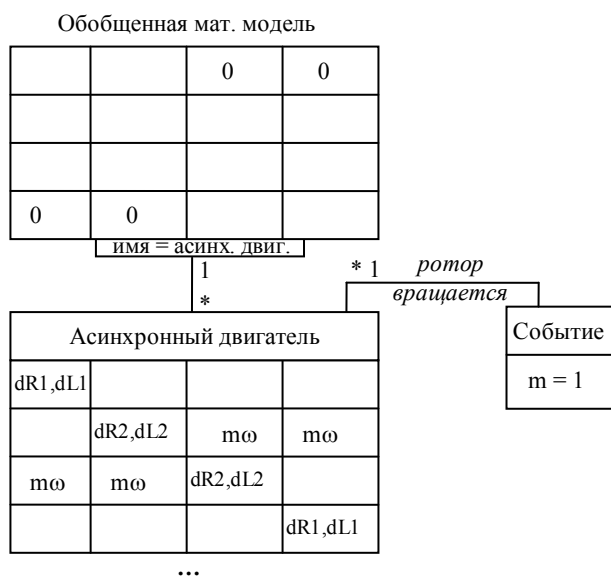


Рис. 3. Фрагмент объектной модели асинхронного двигателя с к.з. ротором

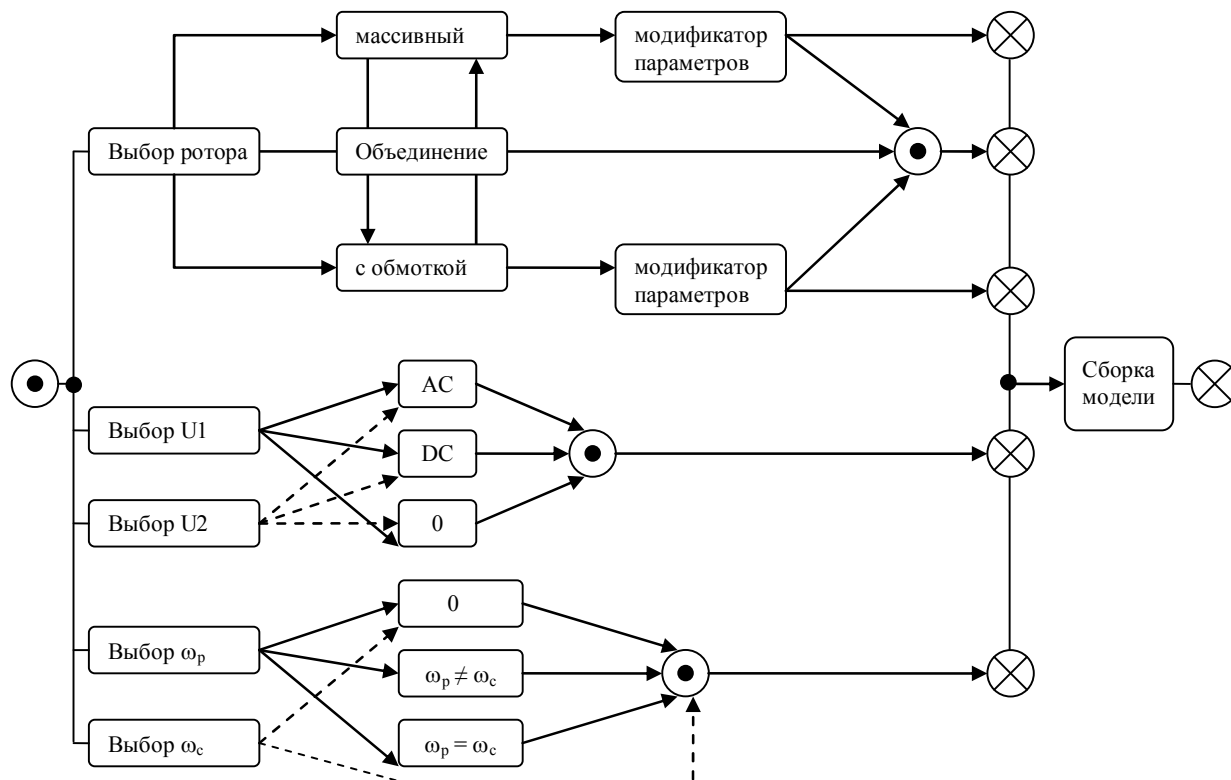


Рис. 4. Диаграмма состояний формирования модели асинхронного двигателя с к.з. ротором

Bibliography (transliterated): 1. Shynkarenko V.F. *Osnovy teorii evoliutsii elektromekhanichnykh system*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2002. 288 p. 2. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh mashin: High school book*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2001. 327 p. 3. Shynkarenko V.F., Zablodskiy N.N., Plyugin V.Ye. Substantiation of principles of object-oriented designing in electromechanical energy converters. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2011, no.48, pp. 76-83. 4. Zablodskiy N.N., Plyugin V.Ye. Ob'ektno-orientirovannoe proektirovanie jelektrimekhanicheskikh preobrazovatelej jenerгии s sovmeshhennymi funktsijami. *Sb. nauk. prats DonDTU*. Alchevsk: DonDTU, Lado Publ., 2011, no.34, pp. 321-327. 5. Plyugin V.Ye. A mathematical model of an electromechanical energy converter with a massive rotor. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 42-44. 6. Rambo Dzh., Blaha M.. *UML 2.0. Ob'ektno-orientirovannoe modelirovanie i razrabotka*. St.Petersburg, Piter Publ., 2007. 544 p.

Поступила (received) 18.10.2013

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для студ. ВУЗов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
3. Шинкаренко В.Ф., Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Обоснование принципов объектно-ориентированного проектирования электромеханических преобразователей энергии // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – №48 – С. 76-83.
4. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Объектно-ориентированное проектирование электромеханических преобразователей энергии с совмещенными функциями // Сб. наук. пр. ДонДТУ. Алчевськ: ДонДТУ, ВПЦ "Ладол". – 2011. – №34. – С. 321-327.
5. Плюгин В.Е. Математическая модель электромеханического преобразователя энергии с массивным ротором // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С. 42-44.
6. Рамбо Дж., Блах М. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. – СПб.: Питер, 2007. – 544 с.

Плюгин Владислав Евгеньевич, к.т.н., доц.,
Донбасский государственный технический университет,
94204, Алчевск, пр. Ленина, 16,
тел/phone +38 050 2021045, e-mail: vlad.plyugin@gmail.com

V.Ye. Plyugin

Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine

Class structure of electromechanical energy converter models with UML-diagrams application.

Theoretical results are presented, mathematical model formation by means of inheritance from a generalized class template is shown for a general electromechanical energy converter.

Key words – object-oriented, design, electrical machine, class, object, mathematical model, inheritance, template.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Запропоновано діагностичну модель паперово-масляної ізоляції трансформатора струму на основі нейронної мережі прямого розповсюдження, виконано експериментальну перевірку в порівнянні з регресійною моделлю.

Предложена диагностическая модель бумажно-масляной изоляции трансформатора тока на основе нейронной сети прямого распространения, выполнена экспериментальная проверка в сравнении с регрессионной моделью.

ВВЕДЕНИЕ

Своевременное выявление неисправностей электрических аппаратов позволяет поддерживать их в рабочем состоянии, предупреждать поломки, продлевать ресурс и планировать предстоящие замены.

Для повышения надежности электроснабжения в настоящее время активно применяются системы непрерывного контроля состояния электрических аппаратов [1, 2]. Преимущество непрерывного контроля заключается в многократном снижении межконтрольного интервала, по сравнению с классическим периодическим контролем, однако в процессе своей работы такие системы формируют большие по объему массивы данных, которые необходимо хранить и обрабатывать для получения диагностического заключения о состоянии оборудования.

Анализ полученных от таких систем данных в отношении трансформаторов тока показывает, что ухудшение технического состояния основной изоляции происходит непрерывно, как при работе в номинальных, так и в аварийных и недогруженных режимах [3], поэтому особенно важно вовремя выявлять тенденции в развитии дефектов основной изоляции трансформаторов тока. Данную задачу можно решить при помощи соответствующих моделей диагностирования состояния измерительных трансформаторов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Широко применяемые в диагностировании электрических аппаратов модели на основе закона распределения Вейбулла для вычисления вероятности безотказной работы не позволяют выявить тенденции к выходу конкретной единицы оборудования из строя [4, 5]. Модели для пообъектного вычисления показателей вероятности безотказной работы имеют тоже недостаток, связанный с неоднозначностью заключения, например, если объект имеет вероятность безотказной работы на прогнозируемом интервале равную 0,8, то не ясно нужно ли его отбраковывать или можно продолжать дальнейшую эксплуатацию. Широко распространенные регрессионные модели имеют также недостаток, заключающийся в линейности описания зависимости между параметрами, характеризующими состояние электрического аппарата, и его реальным состоянием, что негативно сказывается на их точности.

Поэтому для построения модели диагностирования состояния изоляции трансформаторов тока в настоящей работе предлагается использовать модели на основе искусственных нейронных сетей [6-9], которые позволяют эффективно аппроксимировать мно-

гомерные нелинейные зависимости и обладают высокими обобщающими способностями.

Целью данной работы является разработка нейросетевых моделей диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока, позволяющих описать нелинейные зависимости между параметрами основной изоляции (x_1 – тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции под рабочим напряжением; x_2 – отклонение емкости основной изоляции от паспортного значения; x_3 и x_4 – влажность и температура воздуха окружающей среды, соответственно) и более эффективно прогнозировать состояние изоляции (Y) для осуществления своевременного превентивного обслуживания.

1. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Поскольку на состояние изоляции трансформатора и на его возможность выхода из строя влияет множество факторов, в качестве базиса для построения диагностической модели целесообразно выбрать модели на основе искусственных нейронных сетей прямого распространения. Для построения диагностической модели на основе нейронной сети прямого распространения было исследовано состояние 320 трансформаторов ТФКН-330, и выявлены диагностические признаки [10], существенно влияющие на состояние изоляции измерительного трансформатора тока. По результатам исследований сформирована обучающая выборка (1), содержащая, соответственно 320 экземпляров, каждый из которых характеризовался четырьмя признаками:

$$D = \langle X, Y \rangle, \quad (1)$$

где $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ – множество входных признаков, описывающих состояние бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока; $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}\}$ – множество значений i -го признака в обучающей выборке D ; x_{ij} – значение i -го признака для j -го экземпляра, соответствующее значению i -й характеристики j -го трансформатора; $N=320$ – количество экземпляров в выборке D ; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ – множество значений выходного параметра.

Таким образом, обучающая выборка представляла собой таблицу чисел, состоящую из 320 строк и пяти столбцов, содержащих значения четырех входных признаков и одного выходного для каждого из исследованных трансформаторов.

С целью исключения влияния различного порядка значений признаков на синтезируемую модель предварительно выполнялось нормирование призна-

ков, т.е. приведение диапазона их значений к единому интервалу $x_{in} \in [0;1]$ по формуле (2):

$$x_{ijn} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}, \quad (2)$$

где x_{ijn} – нормированное значение i -го признака j -го экземпляра, $i=1,4$, $j=1,320$; $x_{i\min}$ и $x_{i\max}$ – соответственно, минимальное и максимальное значения i -го признака в обучающей выборке D .

Фрагмент обучающей выборки, содержащей нормированные значения признаков, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент обучающей выборки					
Номер трансформатора	Значения признаков				Y
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	0,5364	0,0681	0	0,3287	1
2	0,5231	0,4772	1	0,2986	1
3	0,5463	0,8181	1	0,3534	1
4	0,5496	0,3636	0	0,5452	1
5	0,5364	0,5681	0	1	0
6	0,5496	0,7045	0	0,9219	1
7	0,5430	0,6818	0	0,9506	1
8	0,5364	0,5454	0	0,9945	0
9	0,5463	0,4090	0	0,9520	1
10	0,5364	0,25	0	0,55890	1
...	...	...	...	...	...
320	0,8212	0,8182	0	0,6822	0

Моделирование состояния исправности изоляции трансформаторов осуществлялось на основе построенной обучающей выборки с помощью трехслойного персептрона [6-8], первый слой которого содержал четыре нейрона, второй слой – два нейрона, третий слой – один нейрон. Все нейроны первого слоя имели сигмоидную функцию активации (3):

$$\psi(\varphi) = \frac{1}{1 + e^{-\varphi}}, \quad (3)$$

где φ – аргумент функции активации, представляющий собой дискриминантную функцию [6-9, 11, 12] $\varphi = \varphi(w; x)$, w – матрица весовых коэффициентов, x – множество аргументов дискриминантной функции. При синтезе нейромодели для автоматизации диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока в качестве дискриминантной функции использовалась взвешенная сумма (4):

$$\varphi(w; x) = w_0 + \sum_{i=1}^{|x|} w_i x_i, \quad (4)$$

где w_i – значение i -го весового коэффициента, определяющее значимость i -го входного параметра x_i в функции $\varphi(w; x)$; $|x|$ – количество аргументов функции $\varphi(w; x)$; w_0 – значение смещения функции $\varphi(w; x)$.

Таким образом, структура синтезируемой трехслойной нейромодели Y_{NN} может быть представлена следующим образом (5):

$$\begin{cases} Y_{NN} = \psi_{(3,1)}(\varphi_{(3,1)}(w_{(3,1)}; \psi_{(2)})); \\ \psi_{(2)} = \{\psi_{(2,1)}; \psi_{(2,2)}\}; \\ \psi_{(2,k)} = \psi_{(2,k)}(\varphi_{(2,k)}(w_{(2,k)}; \psi_{(1)})), k=1,2; \\ \psi_{(1)} = \{\psi_{(1,1)}; \psi_{(1,2)}; \psi_{(1,3)}; \psi_{(1,4)}\}; \\ \psi_{(1,l)} = \psi_{(1,l)}(\varphi_{(1,l)}(w_{(1,l)}; X)), l=1,2,3,4, \end{cases} \quad (5)$$

где $\psi_{(\mu,\rho)}$ – функция активации ρ -го нейрона μ -го слоя; $\varphi_{(\mu,\rho)}$ – дискриминантная функция ρ -го нейрона μ -го слоя.

Для построения нейромодели и определения значений ее параметров (весовых коэффициентов и смещений каждого нейрона) на ее входы подавались значения пронормированных признаков, на выход – значение выходного параметра для соответствующего экземпляра (0 – изоляция трансформатора нуждается в ремонте и рекомендуется его вывод из эксплуатации; 1 – изоляция трансформатора пригодна к дальнейшей эксплуатации). В качестве целевой функции при обучении нейромодели использовался минимум ошибки P_0 распознавания, определяемой как отношение количества ошибочно классифицированных трансформаторов K_0 к общему количеству экземпляров (трансформаторов) в обучающей выборке N (6):

$$P_0 = K_0 / N. \quad (6)$$

Обучение нейросети производилось на основе метода обратного распространения ошибки [4-7, 9, 10]. Приемлемым считалось достижение ошибки распознавания, не превышающей значение $P_{0min}=0,01$.

Матрица весовых коэффициентов w построенной нейромодели приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица весовых коэффициентов w				
Номер слоя, μ	Номер нейрона в слое, ρ	Значение смещения w_0	Связи (соединения)	
			узел, от которого идет соединение	значение весового коэффициента
1	1	30,161	признак x_1	-1,76
			признак x_2	-99,142
			признак x_3	7,413
			признак x_4	13,707
	2	-36,203	признак x_1	7,8
			признак x_2	0,667
			признак x_3	0,852
			признак x_4	39,674
	3	168,607	признак x_1	59,402
			признак x_2	-227,376
			признак x_3	-81,146
			признак x_4	-10,997
	4	30,194	признак x_1	-46,056
			признак x_2	44,165
			признак x_3	-15,499
			признак x_4	-35,356
2	1	-1,145	нейрон (1, 1)	-8,493
			нейрон (1, 2)	-529,631
			нейрон (1, 3)	9,555
			нейрон (1, 4)	-8,287
	2	1,095	нейрон (1, 1)	69,829
			нейрон (1, 2)	11,735
			нейрон (1, 3)	-69,994
			нейрон (1, 4)	69,967
3	1	-547,979	нейрон (2, 1)	772,39
			нейрон (2, 2)	659,629

Подставив полученные значения весовых коэффициентов и смещений в систему (5), а также, учитывая, что в качестве функции активации и дискриминантной функции использовались (3) и (4), получаем математическое описание синтезированной нейросетевой модели диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока (7):

$$\begin{aligned} Y_{NN} &= \psi_{(3,1)} = \\ &= \left(1 + e^{-(-547,979 + 772,39\psi_{(2,1)} + 659,629\psi_{(2,2)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(2,1)} &= \\ &= \left(1 + e^{-(-1,145 - 8,493\psi_{(1,1)} - 529,631\psi_{(1,2)} + 9,555\psi_{(1,3)} - 8,287\psi_{(1,4)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(2,2)} &= \\ &= \left(1 + e^{-(-1,095 + 69,829\psi_{(1,1)} + 11,735\psi_{(1,2)} - 69,994\psi_{(1,3)} + 69,967\psi_{(1,4)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,1)} &= \left(1 + e^{-(30,161 - 1,76x_1 - 99,142x_2 + 7,413x_3 + 13,707x_4)} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,2)} &= \left(1 + e^{-(36,203 + 7,8x_1 + 0,667x_2 + 0,852x_3 + 39,674x_4)} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,3)} &= \\ &= \left(1 + e^{-(168,607 + 59,402x_1 - 227,376x_2 - 81,146x_3 - 10,997x_4)} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,4)} &= \left(1 + e^{-(30,194 - 46,056x_1 + 44,165x_2 - 15,499x_3 - 35,356x_4)} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Графическая интерпретация синтезированной нейромодели для прогнозирования состояния изоляции трансформатора приведена на рис. 1.

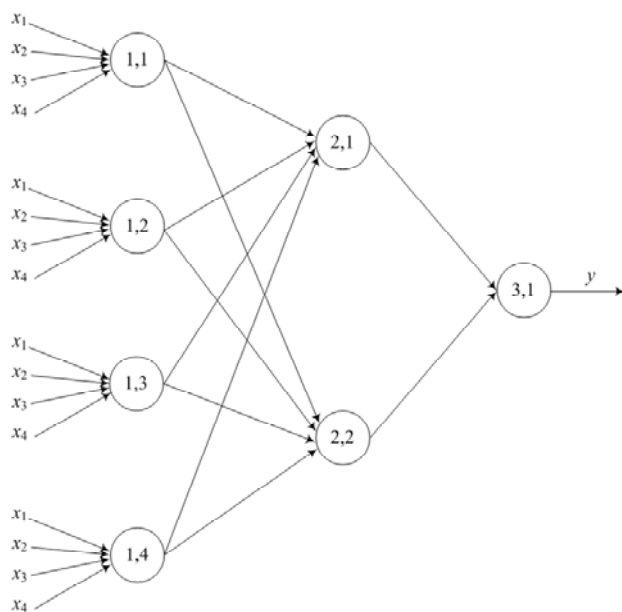


Рис. 1. Синтезированная нейросетевая модель

Построенная нейросетевая модель представляет собой иерархическую структуру, содержащую вычислительные элементы (нейроны), и позволяет выполнять диагностирование состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока по измеряемым значениям входных характеристик.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для использования синтезированной нейросетевой модели на практике было разработано программное обеспечение, реализующее выражение (7) и принимающее в качестве входных данных вышеуказанные характеристики изоляции трансформаторов.

Для оценивания целесообразности применения предложенной модели проводилось ее сравнение с регрессионной моделью Y_r (8), построенной на основе обучающей выборки (1), содержащей нормированные значения входных параметров:

$$Y_r = 1,1468 - 0,2856x_1 + 0,144x_2 - 0,0312x_3 - 0,3151x_4. \quad (8)$$

Для проверки эффективности применения построенной нейросетевой модели для диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока проводилось экспериментальное исследование на данных тестовой выборки, содержащей значения диагностических характеристик $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ 492-х экземпляров, не входящих в обучающую выборку.

Результаты экспериментов приведены в табл. 3, где используются такие обозначения: K_{on} – количество трансформаторов тока, у которых основная изоляция пригодна к эксплуатации, однако неверно отнесена к числу непригодных для дальнейшего использования; K_{og} – количество трансформаторов тока, у которых основная изоляция непригодна к эксплуатации, однако неверно отнесена к числу пригодных для дальнейшего использования; $K_o = K_{on} + K_{og}$ – количество ошибочно классифицированных трансформаторов; P_0 – ошибка распознавания (6).

Таблица 3

Критерий сравнения	Результаты экспериментов			
	Обучающая выборка		Тестовая выборка	
	Регрессионная модель (8)	Нейросетевая модель (7)	Регрессионная модель (8)	Нейросетевая модель (7)
K_o	26	3	63	8
K_{on}	2	3	14	8
K_{og}	24	0	49	0
P_0	0,081	0,0094	0,128	0,016

Как видно из табл. 3, предложенная нейросетевая модель обеспечивает лучшие значения ошибки распознавания (0,0094 по сравнению с 0,081), что подтверждает целесообразность ее применения на практике. Показатели K_o , K_{on} и P_0 несколько увеличились на данных тестовой выборки (так, например, значение ошибки распознавания возросло с 0,0094 до 0,016). Не смотря на это, нейросетевая модель более адекватна и вполне приемлема для практического применения в отличие от регрессионной модели. Важно отметить, что все случаи ошибочной классификации с помощью синтезированной нейромодели относятся к ситуациям, когда экземпляры (основная изоляция трансформаторов) являются пригодными к эксплуатации, однако неверно отнесены к непригодным для дальнейшего использования. Следовательно, даже те редкие случаи ошибочной классификации с помощью предложенной модели (7) не приведут к продолжению эксплуатации аварийноопасного трансформатора, а лишь вызовут необходимость дополнительного исследования экземпляров, являющихся пригодными для дальнейшего использования.

Таким образом, результаты экспериментов показали, что построенная нейросетевая модель обеспечивает приемлемую точность и может быть использована для диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока, на основе измеряемых значений входных параметров.

ВЫВОД

В работе решена актуальная задача автоматизации процесса диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока.

Научная новизна работы заключается в том, что предложена диагностическая нейросетевая модель, которая представляет собой иерархическую структуру, содержащую вычислительные элементы (нейроны), и позволяет выполнять диагностирование состояния основной изоляции трансформаторов тока по измеряемым значениям входных характеристик (тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции под рабочим напряжением, емкость основной изоляции, температура окружающей среды, влажность воздуха окружающей среды).

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенную нейросетевую модель, принимающую в качестве входных данных значения характеристик изоляции измерительных трансформаторов (x_1 , x_2 , x_4) и значение фактора окружающей среды, влияющего на точность полученных характеристик изоляции (x_3). Модель позволяет выполнять диагностирование состояния основной изоляции трансформаторов тока и делать вывод о возможности их дальнейшей эксплуатации с большой вероятностью адекватности вывода ($\approx 0,984$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассальский А.Н., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Гук А.А. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330-750 кВ // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – №3 (56), ч.1. – С. 67-70.
2. Боянич Б., Поляк М. Измерительные трансформаторы – диагностика как предпосылка надежной работы // Электротехнический институт, Загреб. – 2007. – №1. – С. 26-37.
3. Сахно А.А. Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа // Вісник НТУ "ХПИ" – 2010. – №55. – С. 97-105.
4. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
5. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем энергоснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 224 с.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – СПб: Издательский дом "Вильямс", 2005. – 1104 с.
7. Руденко О.Г., Бодянский Є.В. Штучні нейронні мережі. – Х.: Компанія СМІТ, 2006. – 404 с.
8. Субботин С.А., Олейник А.А., Гофман Е.А., Зайцев С.А., Олейник А.А. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов. – Х.: ООО "Компания Смит", 2012. – 317 с.
9. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
10. Сахно А.А. Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330-750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением // Електротехніка і електромеханіка – 2010. – №2. – С. 54-56.
11. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. – 382 с.
12. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rassalskiy A.N., Sakhno A.A., Konograj S.P., Spitsa A.G., Guk A.A. The analyze of the online-monitoring methods of the main isolation of current transformers and bushings 330-750 kV. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2009, no.3 (56), part 1, pp. 67-70. 2. Bojanich B., Poljak M. Izmeritel'nye transformatory – diagnostika kak predposylka nadezhnoy raboty. *Zagreb Electrotechnical Institute*, 2007, no.1, pp. 26-37. 3. Sakhno A.A. Mathematical model for prediction of the remaining resource of current transformers of 330-750 kV with paper-oil insulation. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no.55, pp. 97-105. 4. Guk Yu.B. *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike: High school book*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 208 p. 5. Fokin Yu.A., Tufanov V.A. *Ocenka nadezhnosti sistem energosnabzheniya*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 224 p. 6. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs*. St.Petersburg, Williams Publ., 2005. 1104 p. 7. Rudenko O.H., Bodianskiy Ye.V. *Shtuchni neironni mrezihi*. Kharkiv, SMIT Company, 2006. 404 p. 8. Subbotin S.A., Olejnik A.A., Gofman E.A., Zajcev S.A., Olejnik A.A. *Intellectual'nye informacionnye tehnologii proektirovaniya avtomatizirovannyh sistem diagnostirovaniya i raspoznavaniya obrazov*. Kharkov, SMIT Company, 2012. 317 p. 9. Subbotin S.O., Oliinyk A.O., Oliinyk O.O. *Neiterativni, evoliutsiini ta multyagentni metody sintezu nechitkolohichnykh i neiromerezhnykh modelei*. Zaporizhzhia, ZNTU Publ., 2009. 375 p. 10. Sakhno A.A. A dielectric dissipation measurement algorithm for the main insulation of current transformers and 330-750 kV bushings under on-line monitoring. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.2, pp. 54-56. 11. Kруглов V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennye nejronnye seti: Teoriya i praktika*. Moscow, Gorjachaja liniya-Telekom Publ., 2001. 382 p. 12. Russell S., Norvig P. *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod*. Moscow, Williams Publ., 2006. 1408 p.

Поступила (received) 07.10.2013

Скрупская Людмила Степановна¹, ассистент,

Олейник Андрей Александрович¹, к.т.н., доц.,

Сахно Александр Анатольевич¹, к.т.н., ст. преп.,

¹ Запорожский национальный технический университет,

69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,

тел/phone +38 061 7698549, e-mail: skrupskaya_ls@mail.ru

L.S. Skrupskaya¹, A.O. Oliinyk¹, A.A. Sakhno¹

¹ Zaporozhye National Technical University

64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine

Model building for current transformer paper-oil insulation state diagnostics.

A feedforward neural network based diagnostic model of oil-impregnated paper insulation of a current transformer has been developed. Its experimental validation as compared with a regression model has been performed.

Key words – diagnostics, transformer equipment, insulation, a neural network.

УРАХУВАННЯ ЗМІНИ ТЕПЛОВИХ ТА ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ІЗ ТРИВАЛИМ НАПРАЦЮВАННЯМ НА ВІДМОВУ

Обґрунтовано особливості визначення теплових та вібраційних параметрів електричних машин при тривалому напруженні на відмову за умов наявності дефектів основних конструктивних вузлів та елементів. Обумовлено необхідність удосконалення існуючих та розробки нових методів дослідження та моделей надійності на їх основі.

Обоснованы особенности определения тепловых и вибрационных параметров электрических машин при продолжительной наработке на отказ при условии наличия дефектов основных конструктивных узлов и элементов. Обусловлена необходимость усовершенствования существующих и разработки новых методов исследования и моделей надежности на их основе.

ВСТУП

Парк електричних машин, що експлуатуються на сьогодні в умовах промислового виробництва та сільськогосподарства, є переважно застарілим, так як складається з електричних машин (ЕМ), введених до експлуатації понад 10-15 років тому. Для них важливою задачею є визначення поточного технічного стану та залишкового ресурсу роботи, оскільки втрати від простою приводного обладнання можуть бути достатньо суттєвими. На сьогодні задача забезпечення надійності ЕМ переважно вирішується за рахунок застосування системи планово-попереджувальних робіт (ППР), що передбачає проведення періодичних оглядів та випробування досліджуваних машин через певні проміжки часу. Останнє пов'язано із виведенням їх з експлуатації та не гарантує безвідмовної роботи у міжремонтний період внаслідок загального старіння конструкції.

Серед різних факторів, що погіршують властивості ЕМ, одними з основних є механічні та термомеханічні навантаження.

Відомо, що при додаванні до фактору теплового старіння фактора вібрації, середнє напруження на відмову електричних машин зменшується приблизно у 4 рази, при додатковому урахуванні частих динамічних зусиль і перенапруг при реверсах – у 2,5 рази, а при одночасному впливі перерахованих факторів – майже у 30 разів [1].

Таким чином, актуальним науковим завданням є спільне урахування теплових та вібраційних впливів при розрахунках працездатності ЕМ.

При цьому слід враховувати, що електрична машина є складним об'єктом, який об'єднує невідновлювані та відновлювані вузли, для кожного з яких розрахунки показників надійності певною мірою різняться.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Існує ряд робіт, що доводять суттєву зміну теплових та вібраційних параметрів електричних машин при тривалому напруженні на відмову та у процесі ремонту [2, 3].

Також частково досліджено вплив пошкоджень окремих вузлів електричних машин на вібраційні параметри. Так, для пошкодженої сталі осердя якоря машин постійного струму доведено, що навіть несуттєве за глибиною і за площею закорочення зубцевої зони призводить до зниження значення магнітної індукції в

області пошкоджених зубців на 17-23 % [4]. Отримані результати вказують на суттєву (від 20 до 45 %) зміну величини нормальної складової електромагнітної сили у зоні дефектів шихтованих осердь, що обумовлює зростання електромагнітної складової вібрації.

Аналогічні дослідження для асинхронних двигунів показали, що зміни властивостей сталі зубцевої зони статора суттєво послаблюють основний магнітний потік АД та викликають перерозподіл електромагнітних зусиль у зоні ушкоджень [5]. Окреме урахування змін властивостей сталі ярма і зубців сердечника статора дає додаткове зниження вібробуджуючої сили на 15,61 %, а урахування нерівномірності розподілу властивостей сталі зубцевої зони – ще на 17,11 %. Для нормальної складової ці зміни є більш значними і становлять 20,61 % і 23,42 % відповідно. З урахуванням того, що складові зусиль на діаметрально протилежних щодо ротора ділянках магнітного кола: зубці статора – повітряний проміжок – зубці ротора, у правильно спроектованій машині без дефектів врівноважені, описані зміни призводять до виникнення розбалансу зусиль, що є причиною додаткової вібрації.

Відомі також результати досліджень впливу на вібрацію інших дефектів конструкції, зокрема, дефектів стрижнів короткозамкненого ротора [6].

МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На даний час оцінка теплового навантаження обмоток електричних машин виконується відповідно до ГОСТ 183-74 та проводиться на дослідному зразку машини під час приймальних і періодичних випробувань, а також при типових випробуваннях у разі зміни конструкції, параметрів або технології. У програмі приймально-здавальних випробувань, яким підлягає кожна електрична машина, що випускається, випробування на нагрівання не передбачені, що пояснюється їх значною тривалістю.

Слід зазначити, що можливості судження про теплові навантаження електричних машин за результатами випробувань, передбачених різними стандартами, обмежені. Як правило, це температура обмоток або інших частин машини у тривалому режимі S1. Передбачаються випробування і у короткочасному режимі S2 (при тривалості 30 або 60 хв). Випробування проводяться при номінальному струмі для відповідного режиму; при цьому фіксується максимальна температура $\theta_{\max}$, яка не

повинна перевищувати допустиму. Для електричних машин, призначених для роботи у повторно-короткочасних режимах, випробування проводяться у режимі S3 (зазвичай при тривалості циклу $t_{\text{ц}} = 10$ хв. та тривалості включення 40 %). Випробування тривають до переходу у квазіусталений стан, коли зміна температури $\theta(t)$ у циклі періодично повторюється в наступних циклах. Фіксуються максимальна θ_{max} і мінімальна θ_{min} температури у циклі. Стандартом, за спеціальної вимоги замовника, передбачені типові випробування у більш складних режимах роботи, однак це потребує наявності спеціальних випробувальних стендів.

У загальному ж випадку в електродвигунах має місце перехідний тепловий стан, що характеризується зміною температури їх окремих частин, мінливістю теплових потоків, незбалансованістю теплової енергії, що виділяється усередині машин та енергії, що відводиться за її межі. Виникаючи при цьому теплові перевантаження приводять до скорочення терміну служби ізоляції обмоток машини, а іноді і до аварійних ситуацій. Тепловий стан визначається не тільки потужністю джерел тепла (втратами в елементах конструкції), але і параметрами, що характеризують динаміку теплових процесів. Тому температури вузлів машин у нестационарних режимах не знаходяться у прямій залежності від потужності джерел тепла, як це має місце в усталеному стані для тривалого режиму S1.

Також існують окремі співвідношення і для оцінювання зношування ізоляції у період пусків ξ , за один пуск ЕМ в долях терміну служби [7]. На основі даних про кількість пусків та зміну температури можливо уточнити прогнозування терміну роботи ізоляції.

Зазначені вище методики застосовні для ЕМ із напрацюванням на відмову у межах припустимого ресурсу, тобто без явного проявлення існуючих дефектів їх конструктивних вузлів та елементів. Для машин із суттєвим напрацюванням на відмову необхідне їх уточнення та підвищення інформативності використовуваних показників.

Так, при розрахунку та аналізі динаміки теплового стану елементів конструкції ЕМ у різних режимах роботи раціонально використовувати систему диференціальних рівнянь, побудовану на основі еквівалентних теплових схем. При цьому слід враховувати всі можливі зовнішні і внутрішні чинники. Останнє означає, що час роботи теплові моделі слід розбивати на інтервали, які характеризуються однаковими умовами тепловідведення і потужністю джерел тепла.

За такого підходу було досліджено вплив зміни властивостей осердя статора на температуру його обмотки [3]. Як видно з рис. 1, за інших рівних умов, урахування реального розподілу втрат у сталі дає інші значення її максимуму, а введення в методику змін значень коефіцієнта теплопровідності (КТП), що обумовлено наявністю дефектів осердя, суттєво змінює форму цієї кривої і дає максимальне перевищення температури обмотки, більше за вихідне її значення на 7-10 %. Це певним чином переформулює та ускладнює задачу визначення максимуму температури.

Суть визначення вібраційних параметрів відповідно до стандартів зводиться до їх безпосереднього

вимірювання у різних точках електродвигуна. При цьому реєстрації підлягають як діючі (середньоквадратичні) значення, так і пікфактори. Межеві рівні припустимих вібрацій наведені у ГОСТ 20815-93, у відповідності з чим, критерієм, прийнятим для оцінки інтенсивності вібрації машин є середнє квадратичне значення віброшвидкості v_e (мм/с).

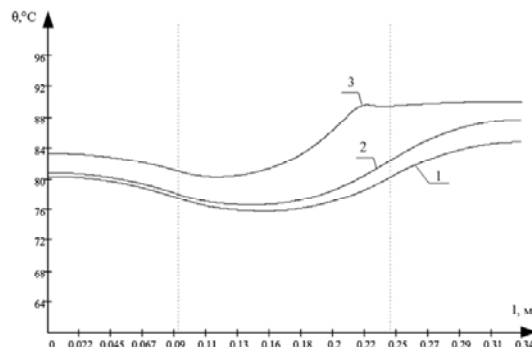


Рис. 1. Порівняльні залежності зміни перевищення температури обмотки статора θ по її довжині l_1 (1 – відповідає нормальному стану осердя статора, 2 – враховує тільки локальну зміну втрат в сталі, 3 – додатково враховує зміну КТП)

Більш перспективним у застосуванні є метод спектрального аналізу обвідної, в якому аналізується не сама високочастотна вібрація, а низькочастотні коливання її потужності [2].

Однак для детального визначення параметрів вібрації слід застосовувати методи спектрального аналізу, в яких як діагностичний параметр використовують значення амплітуди окремих гармонічних складових вібраційного сигналу. В основу цих методів покладено той факт, що різні види дефектів призводять до зростання складових вібрації у різних смугах частот [8]. При цьому для поділу на окремі складові широкосмугових сигналів слід використовувати частотний аналіз, що дозволяє оцінювати рівні вібрації у необхідних діапазонах частот.

На рис. 2, 3 наведено результати експериментальних досліджень інформативності спектрів радіальної складової вібрації АД типу АОЛ 12-4. Під час експериментів досліджувались віброспектри на частоті живлення (рис. 2) та частоті обертання АД (рис. 3) для випадків непошкодженого двигуна та двигуна з ослабленою посадкою ротора у корпусні кришки (сточене за колом зовнішнє кільце підшипника).

Як видно із отриманих результатів, про наявність статичного дисбалансу ротора свідчить збільшення першої та третьої гармоніки. У той же час наявність незмінної восьмої складової, більш за все, свідчить про порушення властивостей магнітної системи, а її додаткове насичення. Велика доля постійної складової може бути пояснена розвитком додаткових високочастотних коливань в АД малої потужності при поганому закріпленні фундаменту, що призводить до його власних коливань, розцінюваних засобами вібродіагностики як нормальний зважений шум.

Таким чином, незважаючи на велику кількість методів діагностики теплового стану та вібродіагностики електродвигунів, це питання продовжує залишатися актуальним, особливо для машин із суттєвим

напрацюванням на відмову. Серед основних причин цього є відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, методів прогнозування залишкового ресурсу, врахування наявності дефектів у конструктивних вузлах та елементах ЕМ. Наявні критерії враховують тільки межові значення параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку.

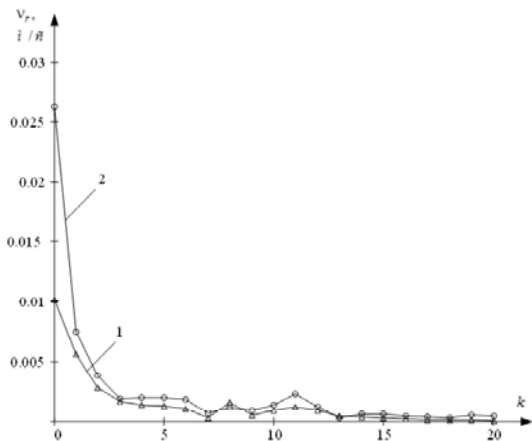


Рис. 2. Результати спектрального аналізу радіальної v_r складової вібрації відносно частоти живлення (1 – ЕМ без дефекту; 2 – ЕМ зі штучно внесеним дефектом)

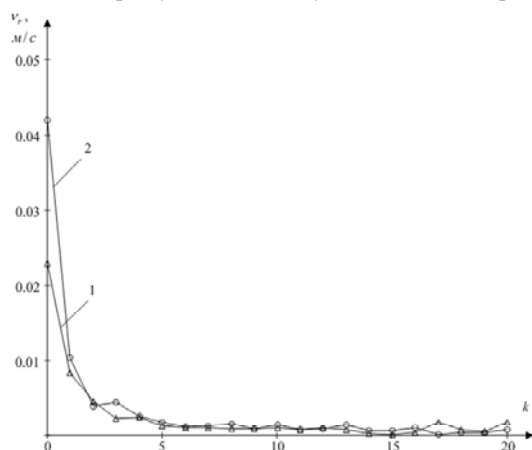


Рис. 3. Результати спектрального аналізу радіальної v_r складової вібрації відносно частоти обертання (1 – ЕМ без дефекту; 2 – ЕМ зі штучно внесеним дефектом)

До того ж існують особливості режимів роботи та вихідного стану ЕМ, що обумовлюють погіршення теплових та вібраційних параметрів. Так, до основних причин додаткового погіршення теплового стану обмоток ЕМ слід віднести наступне:

- перевантаження, викликані періодичним збільшенням моменту на валу робочої машини, що створюють кидки струму при зміні частоти обертання;
- робота на зниженій напрузі живлення, що призводить до значного збільшення часу розгону електродвигуна, при якому виділяється велика кількість тепла;
- робота при несиметрії живильної напруги, що зумовлює появу напруги зворотної послідовності та призводить до нерівномірного розподілу струмів в обмотках електродвигунів і зростання температур окремих фаз;
- значний період пуску двигуна при якому різко збільшується виділення тепла в обмотках, що може визвати перегрів та пошкодження ізоляції;

- висока частота включення-виключення ЕМ, що приводить, особливо у машинах великої потужності, до зменшення часу, відведеного на охолодження, та відповідно обумовлює перегрівання конструктивних вузлів та елементів;

- наявність виткових замикань, що супроводжуються суттєвими перегріваннями обмотки при збільшенні числа замкнених провідників.

Розглядаючи причини підвищення рівня вібрації ЕМ, слід враховувати саму природу вібрацій.

Зокрема, підвищення механічної складової вібрації виникає внаслідок дефектів підшипникового та колекторно-щіткового вузла, незбалансованості, неспівісності та перекошування ротора, при дефектах кріплення тощо. Електромагнітна складова вібрації, як зазначено вище, обумовлюється принципами утворення та просторовим розподілом вібробуджуючих зусиль. Основним проявом того, що дефект, який діагностується, має електромагнітну природу, є миттєве зникнення відповідної складової у спектрі вібрації після відключення електричної машини від мережі.

Проаналізувавши зазначене відповідно до [9], можна дійти висновку, що розвиток та прояв дефектів внаслідок збільшення складових вібрацій спостерігається у наступних випадках:

- ослаблення пресування осердь сталі, обрив або замикання в обмотці, що проявляються на подвійній частоті дії електромагнітних сил, рівній подвійній частоті живильної мережі;

- ексцентриситет внутрішньої розточки статора щодо вісі обертання ротора, що виникає зазвичай як дефект монтажу підшипникових стійок, дефект стану підшипникових щитів або при деформації статора та проявляється на частоті обертання поля у повітряному проміжку, іноді супроводжуючись появою бічних гармонік та нерівністю вертикальної і поперечної складовою відповідних гармонік;

- ексцентриситет зовнішньої поверхні ротора щодо вісі його обертання – проявляється на спектрі вібросигналу у посиленні першої гармоніки частоти обертання ротора. При цьому посилюється частота дії електромагнітної сили, навколо якої іноді з'являються бічні гармоніки, зсунуті одна відносно одної на частоту ковзання ротора, помножену на число полюсів;

- обрив або порушення контакту у стрижнях або кільцях "білячої клітки", що в асинхронному двигуні зазвичай проявляється поблизу частоти обертання вала ротора і завжди супроводжується появою бічних смуг, зсунутих щодо гармоніки частоти обертання ротора на інтервал, що дорівнює добутку частоти ковзання на число полюсів двигуна;

- ослаблення пресування всього пакету сталі ротора або тільки в області зубців, що супроводжується посиленням другої гармоніки живильної мережі або, при ослабленні сталі в області зубців, появою пазової частоти ротора з бічними смугами, зсунутими одна від одної на частоту, рівну подвійній частоті живлення.

Із наведених вище причин погіршення теплового стану ЕМ постає необхідність у розробці нових методів діагностики та моделей надійності, з відповідними експериментами для їх побудови, які будуть враховувати

вплив зміни стану конструктивних вузлів через розподіл джерел тепловиділення й умови теплопередачі.

Перерозподіл вібробуджуючих зусиль зумовлює необхідність розглядання впливу як єдиного цілого системи складного поєднання взаємопов'язаних джерел вібрації та механічних вузлів, через які вона передається, на розвиток дефектів конструктивних вузлів та елементів ЕМ. Тобто, необхідно дослідити, як на них буде впливати та проявлятися окремо механічна та електромагнітна складова вібрації.

При оцінці показників надійності ЕМ можна враховувати основні положення [10], згідно з якими інтенсивність відмов визначається перш за все різною дефективністю конструктивних вузлів та елементів і складається із наступних складових:

$$\lambda_{\text{def}}(t) = \text{def}_0 + \Delta \text{def}_t + \Delta \text{def}_e, \quad (1)$$

де def_0 – дефективність у вихідному стані; Δdef_t – прирощення дефективності, обумовлене впливом технологічних факторів при виготовленні конструктивних вузлів та елементів; Δdef_e – прирощення дефективності, обумовлене впливом експлуатаційних факторів

$$\Delta \text{def}_e = H \times \tau, \quad (2)$$

де H – швидкість утворення дефектів, що залежить від величини основних експлуатаційних впливів: температури – θ , частоти комутації – n_k , вібрації – v_e .

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано особливості визначення теплових та вібраційних параметрів електричних машин за умови наявності окремих видів конструктивних дефектів та пошкоджень.

2. Доведено необхідність та можливість урахування процесів старіння основних конструктивних вузлів та елементів електричних машин з високим рівнем напруження на відмову шляхом введення додаткових поправок на реальні теплові та вібраційні характеристики у розрахункові співвідношення для визначення показників надійності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мамед-Заде М.С. Исследование состояния асинхронных двигателей в режиме искусственной нагрузки // Известия вузов. Энергетика. – 1961. – С. 30-34.
2. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: методические указания // Санкт-Петербург: Северо-Западный учебный центр, 2006. – 36 с.
3. Прус В.В., Загирняк М.В., Колотило И.А. Определение максимума температуры обмотки статора отремонтированных асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008(50). Частина 2. – С. 68-72.
4. Zagirnyak M., Prus V., Kushch I., Miljavec D. Modeling of electromagnetic field of electric machines with local variation of laminated core steel properties // Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering – ISEF 2013. – Ohrid, Macedonia, 2013.
5. Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Miljavec D. Research of induction motors magnetic system changed properties influence on vibration electromagnetic component // Materialy XXIII Sympozjum Srodowiskowe PTZE'2013 "Zastosowanie elektro-

magnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce". – Mikolajki, 2013. – P. 232-234.

6. Гераскин О.А. Вибродиагностика uszkodzeń rotorów potężnych asynchronnych dwiuguniv na osnovi polowych matematycznych modeley: avtoref. diss. kand. tehn. nauk : 05.09.01. – K., 2012. – 18 s.
7. Сташко В. И. Система управления надежностью на базе регионального центра диагностики электрооборудования // Электронный физико-технический журнал. – 2011. – С. 44-51.
8. Баркова Н.А., Дорошев Ю.С. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб. пособие // Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 157 с.
9. Спектральная вибродиагностика [Электронный ресурс]: Русов В.А., 1996. – Режим доступа: vibrocenter.ru/book8.htm.
10. Конарев О.Г. Обеспечение эксплуатационной надежности асинхронных двигателей малой и средней мощности: Автореф. дис. канд. техн. наук: 15.09.01. – Томск, 2000. – 19 с.

Bibliography (transliterated): 1. Mamed-Zade M.S. Issledovanie sostojaniya asinhronnyh dvigatelej v rezhime iskusstvennoj nagruzki. *Izvestija vuzov. Jenergetika*, 1961, pp. 30-34. 2. Barkov A.V., Barkova N.A., Borisov A.A. *Vibracionnaja diagnostika jelektricheskix mashin v ustanovivshisja rezhimah raboty: metodicheskie ukazaniya*. St. Petersburg, Northwest educational center, 2006. 36 p. 3. Prus V.V., Zagirnyak M.V., Kolotilo I.A. Opredelenie maksimuma temperatury obmotki statora otremonirovannyh asinhronnyh dvigatelej. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2008, no.3(50), part 2, pp. 68-72. 4. Zagirnyak M., Prus V., Kushch I., Miljavec D. Modeling of electromagnetic field of electric machines with local variation of laminated core steel properties. *Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering – ISEF 2013*. Ohrid, Macedonia, 2013. 5. Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Miljavec D. Research of induction motors magnetic system changed properties influence on vibration electromagnetic component. *Materialy XXIII Sympozjum Srodowiskowe PTZE'2013 "Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce"*. Mikolajki, 2013, pp. 232-234. 6. Heraskin O.A. *Vibrodiahnostyka ushkodzen rotoriv potuzhnykh asynkhronnykh dyvuhuniv na osnovi polovykh matematychnykh modeley*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Kyiv, 2012. 18 p. 7. Stashko V.I. Sistema upravleniya nadezhnostyu na baze regionalnogo centra diagnostiki elektrooborudovaniya. *Elektronnyj fiziko-tekhnicheskij zhurnal*, 2011, pp. 44-51. 8. Barkova N.A., Doroshev Yu.S. *Nerazrushayushhij kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya gornyx mashin i oborudovaniya: ucheb. posobie*. Vladivostok, DVGUTU Publ., 2009. 157 p. 9. Rusov V.A. *Spektralnaya vibrodiahnostika*. Available at: vibrocenter.ru/book8.htm (accessed 13 September 2013). 10. Konarev O.G. *Obespechenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti asinhrnnix dvigatelej maloj i srednij moshhnosti*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2000. – 19 p.

Поступила (received) 26.01.2014

Сьомка Олександр Олександрович¹, аспірант,
Прус В'ячеслав В'ячеславович¹, к.т.н., доц.

¹ Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
39600, Кременчук, вул. Першотравнева, 20,
тел/phone +38 0536 743245, e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

O.O. Somka¹, V.V. Prus¹

¹ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

Allowance for heat and vibration parameters variation of electric machines with extended failure interval.

Peculiarities of heat and vibration parameters determination are substantiated for electric machines with extended failure interval under conditions of defects in the main structural units and elements. The necessity of their application to improving the existing research methods and reliability models and developing new ones is grounded.

Key words – electric machine, reliability, temperature, vibration parameters.

УЧЕТ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА И НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Описано методику синтезу математичної моделі асинхронного двигуна. Пропонується виконувати експерименти в такій послідовності. У середовищі AutoCAD створюються геометричні моделі, після імпорту яких в Comsol Multiphysics і подальшої доробки під управлінням Matlab проводиться розрахунок коефіцієнтів і залежностей, які використовуються в математичній моделі асинхронного двигуна.

Описана методика синтеза математической модели асинхронного двигателя. Предлагается выполнять эксперименты в следующей последовательности. В среде AutoCAD строятся геометрические модели, после импорта которых в Comsol Multiphysics и последующей доработки под управлением Matlab производится расчет коэффициентов и зависимостей, которые используются в математической модели асинхронного двигателя.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие вычислительной техники позволяет применять математическое моделирование при решении различных инженерных и научных задач.

Среди огромного количества математических моделей, используемых при решении задач электротехнического характера – математическая модель асинхронного двигателя занимает достойное место. К настоящему времени разработаны десятки вариантов моделей асинхронных двигателей, но их слабым местом является пренебрежение или приближенный учет эффекта вытеснения тока в пазу ротора и насыщения магнитной цепи в работе рассматриваются принципы синтеза математической модели асинхронного двигателя, которая учитывает эффект вытеснения тока в пазу ротора и насыщение магнитной цепи.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Классической математической моделью асинхронного двигателя – является математическая модель, синтезированная на основе уравнений Парка-Горева. В этой модели предполагается, что машина имеет постоянные параметры. Применительно к асинхронным машинам такое допущение вносит значительную погрешность.

Поэтому многие авторы (например, [2]), предлагают корректировать параметры ротора, как наиболее сильно зависящие от эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной цепи, по мере разгона двигателя. Но в этом случае в основном учитывается эффект вытеснения тока но не учитывается насыщение магнитной цепи. Да и изменение параметров в зависимости от скорости вращения не совсем корректно. Дело в том, что при переходных процессах в стержне паза протекают как периодическая, так и апериодическая составляющая тока. Эффект вытеснения тока для этих составляющих проявляется в разной степени – поэтому и коррекция параметров становится не однозначной. Еще одна трудность, связанная с пошаговой коррекцией параметров – это определение значений активного и индуктивного сопротивлений в зависимости от частоты тока. В [1] такую зависимость предлагается определять экспериментально. Такое решение значительно снижает ценность модели, так как условие, что для синтеза математической модели необходима физическая модель нежелательно. Такой подход применим только в тех случаях, когда эксперименты

проводятся с системой управления, а в параметры двигателя внесение изменений не планируется.

Следует отметить, что для расчетов на стадии проектирования, при определении статических характеристик, разработаны методики, которые позволяют учесть эффект вытеснения тока и насыщение магнитной цепи. Эти методики обеспечивают приемлемую точность, зависящую от формы паза ротора, но они не применимы в расчетах динамических характеристик.

Современное развитие вычислительной техники, в частности, появление такого мощного программного продукта как Comsol Multiphysics ставит задачу использования появившихся возможностей для повышения точности расчетов.

Comsol Multiphysics – это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов. Моделирование асинхронного двигателя в Comsol Multiphysics позволяет определить его параметры в различных режимах работы. Однако, непосредственное использование модели, полученной в Comsol Multiphysics, для решения динамических задач затруднительно. Связано это с тем, что моделирование динамических процессов – это решение задачи Коши и осуществляется решение такой задачи пошаговым методом. Значит, для решения задачи придется выполнить десятки или сотни тысяч раз вычисление параметров асинхронного двигателя, что даже для современного компьютера непосильная задача. Поэтому надо искать методы использования результатов моделирования в Comsol Multiphysics для синтеза динамических моделей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

На основе численно-полевых расчетов разработать математическую модель асинхронного двигателя, которая учитывает эффект вытеснения тока и насыщения магнитной цепи, что позволит реализовать ее в структурных блоках пакета Matlab/Simulink.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее существенно эффект вытеснения тока проявляется в пазовой части обмотки ротора. Для учета эффекта вытеснения тока в [2] предложено разбить паз по высоте на отдельные слои, причем при-

нимается, что плотность тока в пределах слоя остается постоянной. Там же приведены аналитические соотношения для расчета параметров слоя.

Потокоосцепления слоев определяется по соотношениям

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= i_1 \cdot L_{1,1} + i_2 \cdot M_{1,2} + i_3 \cdot M_{1,3}; \\ \Psi_2 &= i_1 \cdot M_{2,1} + i_2 \cdot L_{2,2} + i_3 \cdot M_{2,3}; \\ \Psi_3 &= i_1 \cdot M_{3,1} + i_2 \cdot M_{3,2} + i_3 \cdot L_{3,3},\end{aligned}\quad (1)$$

где $L_{1,1}, M_{1,2} \dots L_{3,3}$ – индуктивности и взаимные индуктивности слоев, i_1, i_2, i_3 – токи в слоях 1, 2, 3.

Для дальнейших расчетов будем считать, что магнитный поток замыкается по путям, показанным на (рис. 1) т.е. он полностью охватывает слой.

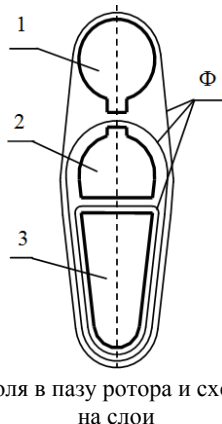


Рис. 1. Картина поля в пазу ротора и схема разбиения паза на слои

При таких допущениях соотношение (1) значительно упрощается

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= L_{1,1} \cdot (i_1 + i_2 + i_3); \\ \Psi_2 &= i_1 \cdot L_{1,1} + L_{2,2} \cdot (i_2 + i_3); \\ \Psi_3 &= i_1 \cdot L_{1,1} + L_{2,2} \cdot i_2 + i_3 \cdot L_{3,3},\end{aligned}\quad (2)$$

где $L_{1,1}, L_{2,2}, L_{3,3}$ – расчетные индуктивности слоев.

При такой постановке схема замещения математической модели асинхронного двигателя, у которого паз ротора разбит на три слоя, имеет вид, приведенный на рис. 2.

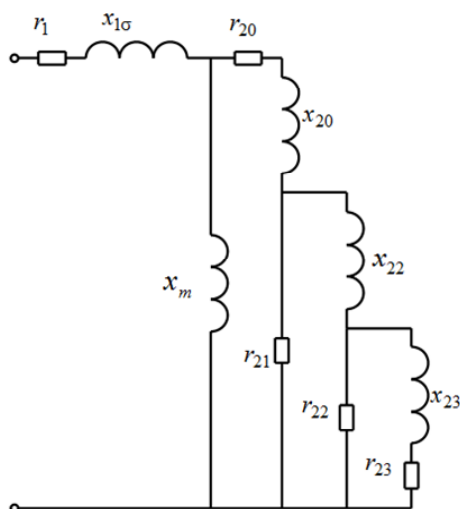


Рис. 2. Схема замещения математической модели

Здесь приняты следующие обозначения параметров r_1 – активное сопротивление обмотки статора, $x_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ста-

тора, x_m – индуктивное сопротивление взаимоиндукции, r_{20} – активное сопротивление участка короткозамыкающего кольца, приведенное к стержню;

$$x_{20} = x_{2k} + x_{2\text{диф}} + x_{21},$$

где x_{2k} – индуктивное сопротивление участка короткозамыкающего кольца, приведенное к стержню; $x_{2\text{диф}}$ – дифференциальное индуктивное сопротивление x_{21} – индуктивное сопротивление верхнего слоя; $r_{21}, r_{22}, r_{23}, x_{21}, x_{22}, x_{23}$ – активные и индуктивные сопротивления слоев. Нумерация слоев начинается сверху.

Следует отметить, что данная схема замещения отображает математическую модель асинхронного двигателя в осях жестко связанных с ротором, поэтому расчетное напряжение на ее зажимах содержит ЭДС вращения. Для уравнений электрического равновесия в контурах, находящихся по оси d

$$U = U_d + \frac{d\psi}{dt} \cdot \Psi_q.$$

Для контуров, размещенных по оси q

$$U = U_q - \frac{d\psi}{dt} \cdot \Psi_d.$$

Большинство индуктивных сопротивлений схемы замещения зависят от насыщения магнитной цепи, поэтому представляет интерес определение этих параметров по результатам моделирования в среде Comsol Multiphysics.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА

Насыщение магнитной цепи делает индуктивные сопротивления слоев, на которые разбит паз ротора, зависящим от токов в них. Нами предлагается считать, что параметры ротора зависят от полного тока в стержне и мало зависят от распределения тока по слоям.

Для доказательства справедливости такого предположения был проведен эксперимент в среде Comsol Multiphysics.

На рис. 3 приведена геометрическая модель паза ротора двигателя ЭКВФ315М12/4 для моделирования процессов в стержне.

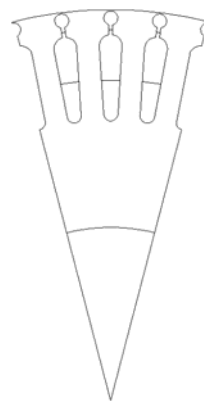


Рис. 3. Геометрическая модель для определения параметров слоев ротора

Она содержит три паза – исследуемый паз в центре и два соседних по краям необходимых для корректности граничных условий.

Моделировался разбитый на слои стержень, у которого в первых двух слоях генератором случайных

равномерно распределенных чисел задавалась плотность тока. Плотность тока в третьем слое рассчитывалась из условия постоянства полного тока в пазу. Было проведено по 150 экспериментов для различных значений полного тока в пазу.

Затем, методом наименьших квадратов, рассчитаны индуктивности $L_{1,1}$, $L_{2,2}$, $L_{3,3}$.

$$L_{1,1} = \sum_{i=1}^N \frac{\Psi_{1,i}(i_1 + i_2 + i_3)}{(i_1 + i_2 + i_3)^2};$$

$$L_{2,2} = \sum_{i=1}^N \frac{[(\Psi_{1,i} - L_{1,1} \cdot i_1)] \cdot (i_2 + i_3)}{(i_2 + i_3)^2};$$

$$L_{3,3} = \sum_{i=1}^N \frac{[(\Psi_{1,i} - L_{1,1} \cdot i_1 - L_{2,2} \cdot i_2)] \cdot i_3}{i_3^2},$$

где N – число экспериментов при одном значении полного тока в пазу ($N = 150$).

Среднеквадратическое отклонение потокоцепления рассчитанного по (2) от результатов моделирования составило не более 2 %.

Зная индуктивности слоев не сложно определить параметры схемы замещения

$$x_{1,2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1,1};$$

$$x_{2,2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_{2,2} - L_{1,1});$$

$$x_{3,2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_{3,3} - L_{2,2})$$

Анализ зависимости индуктивного сопротивления слоя от тока в пазу показал, что наиболее существенно от тока в пазу индуктивное сопротивление верхнего слоя x_{21} . Падение напряжения на этом сопротивлении равно

$$\frac{d\Psi_{21}}{dt} = \frac{d\Psi_{21}}{di_2} \cdot \frac{di_2}{dt}, \quad (3)$$

где $\Psi_{21} = x_{21} \cdot i_2$ – потокоцепление первого слоя; i_2 – полный ток в стержне обмотки ротора.

Входящее в (3) соотношение $d\Psi_{21}/di_2$ имеет размерность сопротивления, назовем динамическим сопротивлением первого слоя.

Зависимость

$$\frac{d\Psi_{21}}{di_2} = x_{21d} = f(i_2)$$

получаем из зависимости $x_{21} = f(i_2)$ путем численного дифференцирования зависимости.

На рис. 4, 5 показаны относительных отклонения параметров стержня ротора двигателя от тока в пазу при различных частотах, которые определялись непосредственным моделированием в Comsol Multiphysics и MATLAB Simulink.

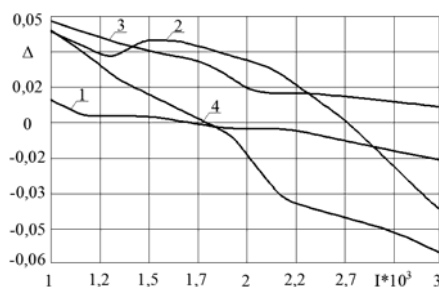


Рис. 4. Относительное отклонение значений индуктивных сопротивлений (1 – частота 50 Гц, 2 – 25 Гц, 3 – 10 Гц, 4 – 5 Гц)

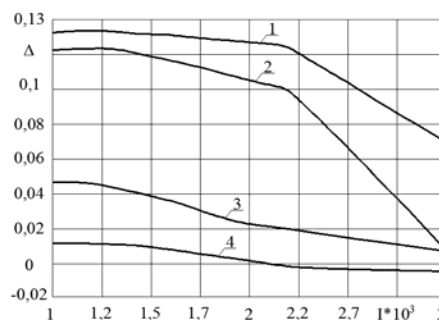


Рис. 5. Относительное отклонение значений активных сопротивлений (1 – частота 50 Гц, 2 – 25 Гц, 3 – 10 Гц, 4 – 5 Гц)

Относительное отклонение рассчитывалось как

$$\Delta = 1 - (Z_M/Z_K),$$

где Z_M – активное или индуктивное сопротивление, определенные в MATLAB, Z_K – активное или индуктивное сопротивление, определенные в Comsol Multiphysics.

Анализ показывает, что для большинства случаев ошибка не превышает 5 %. Наибольшее расхождение наблюдается при частоте 50 Гц для активного сопротивления. Это связано с тем что, разбив на три части паз и приняв плотность тока постоянной по всей высоте слоя мы недостаточно точно учитываем эффект вытеснения тока. Если разбивать паз на большее число слоев то точность повысится. Но вырастет и время расчета.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ СТАТОРА

Для определения параметров статора синтезируется двухмерная модель двигателя. Проводим опыт короткого замыкания, т.е. исключаем из расчетов области ротора. Результат моделирования показан на (рис. 6).

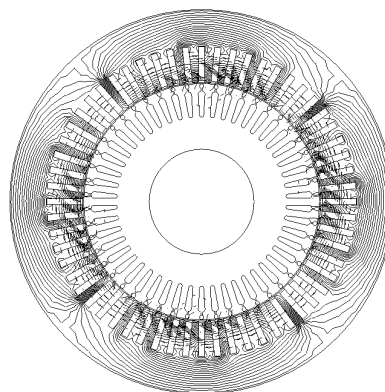


Рис. 6. Опыт короткого замыкания

Определяем пазовое рассеяние обмотки статора и его зависимость от тока в обмотке статора. По аналогии пазовой частью роторной обмотки вводим динамическое индуктивное сопротивление пазовой части $x_{1d} = d\Psi_{1\sigma\text{паз}}/di_1$. Здесь $\Psi_{1\sigma\text{паз}}$ – поток рассеяния пазовой части обмотки статора, i_1 – ток в обмотке статора. Тогда

$$x_{1\sigma} = x_{1d}(i_1) + x_{1\text{лоб}},$$

где $x_{1\text{лоб}}$ – индуктивное сопротивление лобовой части обмотки статора.

Определяется $x_{1\text{лоб}}$ по [2]. Проводим опыт холостого хода, т.е. считаем, что проводимость стержней ротора равна нулю. Результат моделирования приведен на (рис. 7).

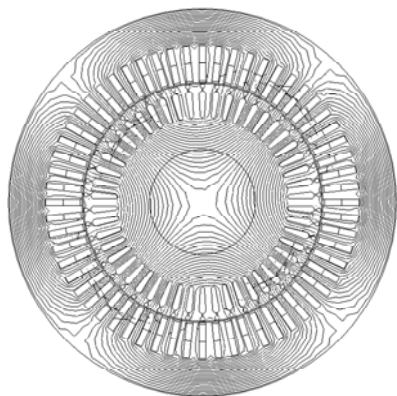


Рис. 7. Опыт холостого хода

Из опыта холостого хода определяем индуктивное сопротивление взаимоиндукции и его зависимость от намагничивающего тока. При определении потокоцепления взаимоиндукции необходимо из потокоцепления, полученного в опыте холостого хода, вычесть потокоцепление в опыте короткого замыкания при равных токах.

Определяем коэффициент трансформации как отношение ЭДС в обмотке статора от потока взаимоиндукции к ЭДС в стержне ротора. Он необходим для приведения параметров ротора к статору. Следует отметить, что коэффициент трансформации, определенный опытным путем несколько выше, чем рассчитанный по [2]. Это отличие можно объяснить наличием в кривой потока высших гармоник, которые в обычном расчете учитываются введением дифференциального рассеяния, поэтому в дальнейших расчетах дифференциальное сопротивление не учитываем $x_{2\sigma\phi} = 0$.

Так же как и в случае с параметрами рассеяния, вводим динамическое сопротивление взаимоиндукции $x_{md} = d\Psi_m/di_m$ и определяем его зависимость от намагничивающего тока $i_m = i_1 + i_2$.

Для определения индуктивного сопротивления нулевой последовательности задаем во всех фазах ток одного направления и определяем это сопротивление. Также переводим его в динамическое сопротивление и прибавляем индуктивное сопротивление рассеяния лобовой части.

Теперь имея параметры схемы замещения, можно синтезировать математическую модель асинхронного двигателя. Она имеет вид

$$\begin{aligned} U_q - \frac{d\psi}{dt} \Psi_{1d} &= i_{1q} \cdot r_1 + [x_{1\sigma\phi} + x_{1d}(i_{1q})] \cdot \frac{di_{1q}}{dt} - E_{mq}; \\ 0 &= i_{21d} \cdot r_{21} + i_{20d} \cdot r_{20} + [x_{2k} + x_{21d}(i_{20d})] - E_{md}; \\ 0 &= i_{21q} \cdot r_{21} + i_{20q} \cdot r_{20} + [x_{2k} + x_{21d}(i_{20q})] - E_{mq}; \\ 0 &= i_{22d} \cdot r_{22} - i_{21d} \cdot r_{21} + x_{22} \cdot \frac{d(i_{22d} + i_{23d})}{dt}; \\ 0 &= i_{22q} \cdot r_{22} - i_{21q} \cdot r_{21} + x_{22} \cdot \frac{d(i_{22q} + i_{23q})}{dt}; \\ 0 &= i_{23d} \cdot r_{23} - i_{22d} \cdot r_{22} + x_{23} \cdot \frac{di_{23d}}{dt}; \\ 0 &= i_{23q} \cdot r_{23} - i_{22q} \cdot r_{22} + x_{23} \cdot \frac{di_{23q}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{md} &= -x_{md}(i_{md}) \cdot \frac{di_{md}}{dt}; \quad E_{mq} = -x_{md}(i_{mq}) \cdot \frac{di_{mq}}{dt}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \frac{M_{эм} - M_c}{H}; \quad M_{эм} = \Psi_{1d} \cdot i_{1q} - \Psi_{1q} \cdot i_{1d}. \end{aligned}$$

Приведенная модель с параметрами двигателя ЭДКОФ315М4 была реализована в структурных блоках пакета Matlab/Simulink и для проверки ее адекватности определялись пусковые характеристики. В табл. 1 приведено сравнение результатов моделирования, расчета по [2] и паспортных данных двигателя при неподвижном роторе.

Таблица 1

Сравнение результатов экспериментов

Параметр	Модель	По [2]	Пасп. данные
Пусковой ток	7,5	7,2	7
Пусковой момент	2,52	2,3	2,5

По результатам испытаний можно сказать, что модель имеет приемлемую точность.

ВЫВОДЫ

Предложена последовательность синтеза математической модели асинхронного двигателя, которая заключается в совместном использовании пакетов AutoCAD, Comsol Multiphysics и Matlab. В AutoCAD создается геометрическая модель двигателя и его паза ротора. Эти модели импортируются в Comsol Multiphysics, где создаются двухмерные модели двигателя и паза ротора. Проводят эксперименты под управлением Matlab, определяя параметры необходимые для синтеза Simulink модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельник А.А. Численное моделирование процесса частотного пуска асинхронного двигателя с учетом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора в среде Matlab // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2008. – №4 (51), ч.2. – С. 78-82.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

Bibliography (transliterated): I. Mel'nik A.A. Numerical simulation of the frequency start induction motor with the effect of displacement current in the rotor bars in Matlab. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2008, no.4 (51), part 2, pp. 78-82. I.P. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin*. Moscow, Energija Publ., 1980. 496 p.

Поступила (received) 23.10.2013

Цодик Игорь Абрамович¹, к.т.н., доц.,
Худобин Константин Викторович¹, аспирант,
¹Донбасский государственный технический университет,
94204, Алчевск, пр. Ленина, 16,
тел/phone +38 095 8892463,
e-mail: tsodikua@rambler.ru, hudobin1987@mail.ru

I.A. Tsodik¹, K.V. Hudobin¹

¹Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine

Adding effect of current displacement and magnetic circuit saturation in an asynchronous motor mathematical model.

A methodology of an asynchronous motor mathematical model synthesis is described. Experiments are suggested to be conducted in the following sequence. Geometrical models are first built in AutoCAD, then imported to Comsol Multiphysics, and further processed in Matlab with computation of coefficients and dependences applied in the asynchronous motor mathematical model.

Key words – asynchronous motor, Matlab, magnetic field, current displacement, magnetic saturation.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Критична оцінка існуючих поглядів на перспективи розвитку світової енергетики є невід'ємною частиною вироблення самостійної позиції будь-якої держави з цього питання. Розгляд перспективних шляхів розвитку електроенергетики є визначальним чинником розвитку електромашинобудування, як галузі, що створює генеруючі системи.

Критическая оценка существующих взглядов на перспективы развития мировой энергетики является неотъемлемой частью выработки самостоятельной позиции любого государства по этому вопросу. Рассмотрение перспективных путей развития электроэнергетики является определяющим фактором развития электромашиностроения, как отрасли, создающей генерирующие системы.

ВВЕДЕНИЕ

Определяющую роль в развитии современной энергетики имеют два аспекта: наличие долгосрочных устойчивых источников энергии и их экологическая безопасность. Проблемы устойчивого и безопасного развития энергетики неразрывно связаны с общемировыми, глобальными проблемами, такими, как изменение климата, устойчивое развитие экономики, сокращение уровня бедности и обеспечение нормальной жизнедеятельности населения. Это определяет направления и приоритеты развития мировой экономики и промышленности, технологические, ресурсные и экологические возможности, энергетические, политические, демографические и социокультурные проблемы, а также необходимость учета взаимного влияния всех указанных факторов друг на друга. Для решения этих задач наиболее целесообразно применять комплексный подход, т.е. вести непрерывный учет и оценку возможного совместного развития вышеперечисленных направлений, использовать сценарный подход – взаимосвязь демографических, экономических, технологических, политических, экологических и энергетических трендов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время главная задача – предотвращение экологического кризиса. Поэтому основным направлением развития энергетики следует принять то направление, которое сможет опираться на технологии и источники, не добавляющие энергию в биосферу Земли. Целесообразно рассматривать и определять комплексный подход к глобальным путям устойчивого развития энергетики и направления, по которым должны идти исследования, [1].

СВЯЗЬ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ С РАЗВИТИЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

В рамках Киотского протокола и пост-Киотских соглашений, национального экологического законодательства создаются правовые и экономические механизмы, которые стимулируют процесс перехода к энергетике нового типа. В Украине износ электрооборудования тепловых электростанций и промышленных предприятий достигает 100 %, т.е. необходима немедленная модернизация или замена этого оборудования. Поэтому следует вести работы по рассмот-

рению перспективных направлений развития электроэнергетики, которое будет включать решение проблем энергосбережения с учетом перспектив развития и внедрения нового оборудования и современных технологий. Электроэнергетическая система Украины довольно мощная и составляет 52 млн. кВт, в т.ч. тепловых электрических станций (ТЭС) – 30,9 млн. кВт (39,4 %), атомных – 13,8 млн. кВт (52 %) и гидроэлектростанций – 4,7 млн. кВт (9 %).

Современная энергетика основана на сжигании ископаемого топлива, транспортируемого на большие расстояния, и на потреблении больших объемов энергии при сравнительно слабом управлении энергетическими потоками. А также в настоящее время растет значимость возобновляемой энергетики: мировая мощность ветроэлектростанций (ВЭС) возросла с 18 до 160 ГВт, солнечных, в том числе фотовольтаических электростанций, – от 1,8 до 22,9 ГВт. К концу 2000-х годов возобновляемые источники энергии вышли на первое место в приросте мощностей в мире (в 2009 году 40 %). Эта тенденция сохраняется.

Но проблемным остается выбор типа генератора для ветроэнергетических установок (ВЭУ): анализ конструкций ВЭУ и разработка технических решений, направленных на повышение их КПД и снижение порога минимальной скорости ветра для обеспечения номинального режима работы ВЭУ и расширение территории их возможного использования.

В первых ВЭУ всех типов и мощностей использовали, в качестве генерирующей единицы, асинхронную машину (АМ) – асинхронный генератор (АГ). Действительно, АМ – самые простые при расчете, проектировании, изготовлении и обслуживании, надежные, дешевые, легкие (кВт/кг) машины. Но при использовании их в автономном генераторном режиме, нуждаются в источнике реактивной энергии. Последнее значительно снижает надежность всей установки в целом, [1, 5].

Оценка мирового рынка позволяет говорить о том, что для удаленных потребителей энергии (поселки в горах, степях, отдельные фермерские хозяйства, кордоны лесников и т.д.) в среднем достаточно 1 кВт/чел. Поэтому для Украины, России, стран Ближнего Востока (Афганистан, Иран, Индия и др.) с рассредоточенным населением по большой территории

необходимы установки небольшой мощности (5÷10 кВт). Для европейских стран целесообразны ВЭУ мощностью до 100÷150 кВт. Преимущество ветроэнергетики – возможность размещения электроустановок в непосредственной близости к потребителю. На мировом рынке в настоящее время удельная стоимость ВЭУ составляет около 1100÷1200 долл. за установленный кВт мощности. Поэтому при создании новых типов ВЭУ стоит задача снижения стоимости до 900÷1000 долл./кВт. Малая ветроэнергетика не требует больших территорий. Локальные ВЭУ могут быть установлены практически везде, где среднегодовая скорость ветра не менее 4÷5 м/с, [5].

Правильная оценка существующих статистических данных по применению разного типа электрических генераторов переменного тока в ВЭУ разной мощности, с учетом знаний условий эксплуатации и рода нагрузки, позволит максимально использовать потенциал ветрового потока, повысить надежность и КПД ВЭУ, получить экономический эффект. После проведенного анализа литературы, что сравнительный анализ разных типов электрических генераторов с точки зрения влияния скорости ветра на энергетические параметры проведен не был.

Для рассмотрения зависимости работы АГ и его энергетических параметров от скорости ветра и возможности повышения КПД воспользуемся зависимостью выработанной мощности генератора от скорости ветра и других параметров:

$$P = C_p \cdot \frac{\rho v^3}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех}, \text{ Вт},$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность воздуха ($\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ при температуре $t = 15^\circ \text{C}$ и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.); v – скорость ветра, м/с; D – диаметр ветроколеса, м; $\eta_{эл}$ – КПД электрического генератора, о.е.; $\eta_{мех}$ – КПД механической части ВЭУ.

Скорость ветра в момент времени t носит случайный характер и определяется на основании наблюдений и/или, с определенной точностью, прогнозируется. Проанализируем изменение энергетических параметров для генераторов ВЭУ разных типов в зависимости от скорости ветра. При рассмотрении энергетических соотношений считаем, что можно пренебречь потерями в системах и что коэффициент мощности постоянный.

Уравнение баланса мощностей для автономной системы электроснабжения с АГ, который самовозбуждается от включенных в цепь обмотки статора конденсаторов, представим в виде:

$$m_1 U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi_1 = m_H U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H; \quad (1)$$

$$m_1 \left[\frac{I_k^2}{\omega_1 C} - I_H^2 \omega_1 L \right] = Q_{AG}; \quad m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 C} = Q_{AG}; \quad (2)$$

$$m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} + m_1 \cdot I_H^2 \cdot \left[\frac{1}{\omega_1 \cdot C_k} - \omega_1 \cdot L \right] = Q_{AG}; \quad (3)$$

$$\frac{m_1}{\omega_1} \cdot \left[\frac{I_k^2}{C} + \frac{I_k^2}{C_k} \right] = Q_{AG}, \quad (4)$$

где I_1 , I_H , I_k – токи статора АГ, нагрузки и запитывающих конденсаторов соответственно; ω_1 – угловая

частота напряжения генератора, 1/с; L – индуктивность нагрузки, Гн; C , C_k – емкость шунтирующих и компаундирующих конденсаторов, мкФ; φ_1 , φ – фазовые углы сдвига генератора и нагрузки; m_1 – количество фаз обмотки статора генератора.

Электромагнитная активная мощность генератора, кВт

$$P_{эм} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Реактивная мощность генератора, квар

$$Q_{AG} = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1.$$

Уравнение (1) является уравнением баланса активных мощностей. Оно справедливо для любой автономной системы с АГ с самовозбуждением. Уравнения (2÷4) выражают баланс реактивных мощностей при активно-индуктивной или активной нагрузке и при использовании в генераторной установке только шунтирующих или компаундирующих конденсаторов.

Уравнение баланса реактивной мощности является правильным для автономной системы лишь в том случае, если для выравнивания частоты у потребителей автономной системы не применяется вставка выпрямитель-инвертор. Если данная вставка есть, то балансы реактивной мощности составляем отдельно для АГ с цепью его возбуждения и для автономной электрической цепи с компенсаторами реактивной мощности для обеспечения высоких качеств электроэнергии. При совместной параллельной работе генераторов на активно-индуктивную нагрузку их активные мощности складываются, а реактивная мощность системы равняется суммарной реактивной мощности шунтирующих и компаундирующих конденсаторов. Из выражения баланса реактивной мощности для активно-индуктивной нагрузки, (2), можно найти значение угловой частоты напряжения:

$$\begin{aligned} \omega_{1,2} &= \frac{-Q_{AG} \cdot C + \sqrt{(Q_{AG} \cdot C)^2 + 4m_1 \cdot I^2 \cdot L \cdot C \cdot m_1 \cdot I_k^2}}{2m_1 \cdot I^2 \cdot L \cdot C} = \\ &= \frac{-Q_{AG}}{2m_1 \cdot I_H^2 \cdot L} + \sqrt{\frac{Q_{AG}^2}{4m_1^2 \cdot I_H^4 \cdot L^2} + \frac{4m_1^2 \cdot I_H^2 \cdot L \cdot C \cdot I_k^2}{4m_1^2 \cdot I_H^4 \cdot L^2 \cdot C^2}} = \\ &= \frac{-Q_{AG}}{2m_1 \cdot I_H^2 \cdot L} + \sqrt{\frac{Q_{AG}^2}{4m_1^2 \cdot I_H^4 \cdot L^2} + \frac{I_k^2}{I_H^2 \cdot L \cdot C}} = \\ &= \frac{-Q_{AG}}{2m_1 \cdot I_H^2 \cdot L} + \frac{1}{I_H} \sqrt{\frac{Q_{AG}^2}{4m_1^2 \cdot I_H^2 \cdot L^2} + \frac{I_k^2}{L \cdot C}}, \end{aligned}$$

где f – частота сети, Гц, $f = \omega_1 / 2\pi$.

Из уравнения электромагнитного момента $M_{эм}$ для АГ найдем зависимость напряжения на зажимах АГ от активной его мощности:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{2\pi \cdot f};$$

$$U_{1H} = \sqrt{\frac{P_{эм} \cdot S \cdot ((R_1 + \frac{R_2'}{S}) + (X_1 + X_2')^2)}{m_1 \cdot p R_2'}}.$$

где p – число пар полюсов; S – скольжение ($S_H = 0,05 \div 0,08$, о.е.); R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; R_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом; X_1 – реактивное сопротивление обмотки статора, Ом; X_2' – приведенное реактивное сопротивление обмотки ротора, Ом.

Как уже было указано выше, для работы АМ в генераторном режиме необходим источник реактивной мощности. Значение емкости, необходимой для возбуждения генератора при данной частоте:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot f_1)^2 (L_1 + L_m)},$$

где L_1 и L_m – соответственно индуктивность обмотки статора и намагничивающего контура генератора, Гн.

В общем случае, емкость, которая необходима для получения напряжения на генераторе при заданном значении реактивной нагрузки Q_c , определяется:

$$Q_c = m_1 \cdot U_c^2 / X_c = Q_g + Q_n = P_{AG} \cdot \operatorname{tg} \varphi_g + P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n, \text{ вар};$$

$$\text{Примем } P_{AG} = P_n = P_{ном}$$

$$X_c = 1/(\omega_1 \cdot C) = 1/(2\pi f_1 \cdot C), \text{ Ом.}$$

Тогда окончательное значение емкости, необходимой для работы АГ с переменной частотой вращения приводного двигателя:

$$C = P_{ном} \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{AG} + \operatorname{tg} \varphi_n) / (2\pi \cdot f_1 \cdot m_1 \cdot U_c^2), \text{ Ф},$$

где $P_{ном}$ – мощность, которая отдается генератором потребителю, Вт; U_c – напряжение конденсаторов, В; f_1 – частота вырабатываемого тока, Гц; φ_g и φ_n – углы сдвига фаз между напряжением генератора и нагрузкой; $U_g = U_c$ напряжения на генераторе и нагрузке, В.

Исследования показали, что автономные АГ целесообразно использовать при значениях

$$n_{AG} / n_{ном} \geq 0,9.$$

При меньших n_{AG} величина необходимой емкости быстро растёт и генератор почти полностью загружается реактивным током.

В наше время значительный интерес вызывает возможность использования синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами. Развитие технологий позволяет постоянным магнитам конкурировать с обычной электромагнитной системой возбуждения, а надежность и отсутствие потерь позволяют говорить об их преимуществе. Поэтому в диапазоне мощностей от 1 кВт до 50 кВт наибольшее распространение в настоящее время получили СГ с постоянными магнитами, которые имеют высокую степень автономности, надежности, просты в исполнении, достаточно с высоким КПД. Пока они достаточно дорогие в изготовлении, но преимущества в эксплуатации отвечают современной тенденции развития техники, [1].

Общемировой задачей в настоящее время является энергосбережение, поэтому одним из перспективных направлений можно считать использование сверхпроводников в электротехническом оборудовании, особенно, на базе высокотемпературных сверхпроводников, [2]. Это направление требует значительной НИР по созданию новых типов генераторов.

Вторым возможным направлением регулирования реактивной мощности в энергосистемах может быть пересмотр режимов работы ТГ на блоке, а именно пересмотр необходимости эксплуатации ТГ в режиме перевозбуждения для обеспечения устойчивой работы и перевод ТГ в режим недовозбуждения. Это позволит изменить характер режима работы ТГ относительно сети – он перестанет генерировать в сеть реактивную энергию, но забирает ее из сети, разгружая последнюю от емкостных токов. В настоящее время эксплуатация ТГ в режиме недовозбуждения запрещена. Но, по нашему мнению, это положение требует корректировки.

Режим работы ТГ в асинхронном режиме относится к аномальным режимам работы. Он может быть вызван значительными аварийными перегрузками, потерей возбуждения, работой с недовозбуждением, асинхронным ходом, работой при отказе системы охлаждения, а также при значительных величинах несинусоидальности и несимметрии напряжения в сети. Также асинхронный режим появляется при потере возбуждения, а также при выпадении машины из синхронизма, связанном с колебаниями нагрузки в энергосистеме. ТГ имеют крутую и "жесткую" асинхронную характеристику со значительным по величине максимальным моментом. Поэтому для них, по условиям нагрева статора, допускается относительно продолжительная (до 30 мин.) работа в асинхронном режиме со сниженной нагрузкой (до 50 %). Как положительный аспект при этом следует отметить, что в асинхронном режиме ТГ потребляют значительную реактивную мощность из сети, что важно при современном состоянии электрических сетей Украины, изменении характера электроприемников [2, 3]. Переход ТГ в индуктивный режим относительно сети позволит разгружать сеть от емкостных токов и стабилизировать ее параметры. Изменения величины и характера нагрузки, большие "провалы" и ярко выраженные "пики" энергопотребления, значительный вклад в энергосистему ТЭС с практически полностью изношенным оборудованием приводит к тому, что частота тока в электросети Украины последние годы находится на уровне 49,2÷49,5 Гц [2, 3]. Такое снижение частоты опасно для работы всей энергосистемы и электрооборудования. Например, при снижении частоты в сети до 49 Гц реакторы энергоблоков АЭС должны разгружаться до 10 % номинальной тепловой мощности, а это может повлечь дополнительное увеличение дефицита мощности и создать аварийную ситуацию в энергосистеме. В ЕЭС России ситуация более стабильная, частота поддерживается в более узких границах, и пределы наибольших отклонений частоты от 50 Гц меньше: ±0,15 Гц, – и наблюдаются лишь у часа утренних пиков нагрузки [2, 3]. К изменению частоты также приводит небаланс реактивной энергии в сети. Кроме проблемы поддержки уровня частоты, существует и задача поддержки величины напряжения в сети. Изменения нагрузки в энергосистемах с линиями 330÷750 кВ вызывают появление избытков реактивной мощности на уровне сотен Мвар и, соответственно, вызывают рост напряжения в линиях. Регулирование напряжения может осуществляться эффективно во всех режимах ТГ по активной и реактивной нагрузке (включая режим компенсатора при полном потреблении реактивной мощности) и не влияет на общую устойчивость генератора.

Чтобы нормализовать напряжение на станциях и в сети необходимо осуществлять регулировку с компенсацией избытков реактивной (емкостной) мощности. Для решения этой проблемы недостаточно наличие установленных реакторов, трансформаторов и автотрансформаторов с РПН. Существующие проблемы могут дополнительно осложняться при эксплуатации энергосистем без надлежащего взаимодействия компаний, которые генерируют и передают, [3].

Удельная стоимость сооружения нового узла компенсации реактивной мощности с установкой СК или статических преобразователей равна 40÷50 дол/квар. В то же время, использование в качестве компенсирующих систем СГ, установленных на электростанциях и отработавших свой срок функционирования, будет на порядок ниже.

ВЫВОДЫ

1. Совершенствование и развитие электроэнергетики требует непрерывного развития и совершенствования конструкций и принятие новых технических решений при изготовлении генераторов.

2. Необходим достаточный резерв генерирующих мощностей (в т.ч. маневренных) для увеличения пропускной способности электрических сетей, особенно межсистемных и магистральных, для поддержки надежности и безопасности энергоснабжения на надлежащем уровне.

3. Такое разнообразие требований и направлений соответственно определяет разнообразие номенклатуры генераторов для ТЭС, АЭС, ВЭС, генераторов с использованием сверхпроводников. Кроме того, в классической теории электромашиностроения наметились собственные значительные перемены, которые определили спектр работ по совершенствованию типов и конструкций ТГ энергосистемы:

- экономическое состояние в государстве определило приоритет проведения работ по реабилитации работающих на базе современных приемов диагностики, ремонтных работ над полной заменой установленного устаревшего электрооборудования. При проведении реабилитационных работ необходимо внедрение новых технологических приемов, материалов, что позволит повысить мощность ТГ без существенных изменений геометрии машины. Также целесообразна оценка возможности замены хладагентов генератора, например, замена водорода воздухом, что позволит упростить конструкцию ТГ, повысить его пожаро- и взрывобезопасность. Например, проведено успешное усовершенствование ТГ мощностью 200 МВт ГП завод "Электротяжмаш". Их мощность удалось увеличить на 15-20 %, а коэффициент готовности довести до 0,999, что соответствует уровню лучших мировых стандартов. На ТЭС Украины установлено 76 ТГ единичной мощностью 200 и 300 МВт. Проведение модернизации на этих ТГ может обеспечить суммарный прирост мощности приблизительно до 4000 МВт, что эквивалентно строительству новой крупной ТЭС;

- развитие и повышение мощности энергосетей Украины сделало возможным проведение работ по повышению установленной единичной мощности ТГ на электростанциях. Успешно ведутся работы по созданию ТГ мощностью 1500 МВт для АЭС [3]. Практическое внедрение в настоящее время ограничивают только сопутствующие отрасли: возможности турбин и ядерных реакторов (для АЭС);

- необходимость регулирования реактивной мощности в энергосистемах поставила вопрос о поиске новых компенсационных устройств. Возможными решениями может стать перевод в режим СК турбоге-

нераторов сравнительно небольшой мощности (до 200 МВт), отработавших срок эксплуатации;

- для ВЭУ всего диапазона мощностей в настоящее время используют асинхронные генераторы (АГ). Это требует дополнительных исследований поведения АГ при эксплуатации в единой энергосистеме, а также при автономной установке;

- (10÷15) % всей производимой в мире электроэнергии расходуется на потери, на нагрев медных и алюминиевых проводов, поэтому использование сверхпроводящих генераторов, а, что еще более перспективно, всего электроэнергетического цикла (генератор, шинопроводы, трансформаторы, передающие сети, коммутационная, защитная и измерительная аппаратура), требует непрерывных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины // Збірник наукових праць Донецького Інституту залізничного транспорту. – №29. – 2012. – С. 77-81.
2. Шевченко В.В., Минко А.Н. Сравнительная оценка массогабаритных параметров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ "ХПИ". – №3 – 2010. – С. 108–112.
3. Шевченко В.В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Харківський університет повітряних сил. – Харків. – 2012 – Вип. 7 (105). – С. 152-155.

Bibliography (transliterated): 1. Shevchenko V.V. The ways overcome possible energy crisis in the power system of Ukraine. *The Collection of proceedings of Donetsk Institute of railway transport*, 2012, no.29, pp. 77-81. 2. Shevchenko V.V., Minko A.N. The comparative evaluation of turbogenerators mass and size parameters with air and hydrogen cooling systems. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no.3, pp. 108-112. 3. Shevchenko V.V. The ways to increase turbogenerators power in the execution works during the rehabilitation. *The systems of information processing. The collection of scientific works Kharkov Air Forces University*, 2012, no.7 (105), pp. 152-155.

Поступила (received) 02.10.2013

Шевченко Валентина Владимировна¹, к.т.н., доц.,
Милых Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Потоцкий Дмитрий Васильевич¹,

¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076514,
e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua, zurbagan_@mail.ru

V.V. Shevchenko¹, V.I. Milykh¹, D.V. Pototskiy¹
¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Technical and economic aspects of electric machine industry development with account of electric power development directions.

A critical assessment of the existing views on the world energy development prospects is an integral part of independent policy elaboration in this field for any state. Consideration of prospective power industry development options is a determinative factor in electric machine-building progress as a generation system production industry.

Key words – power engineering, environmental safety, electrical machinery, turbogenerator, comprehensive approach, economy.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТРИФАЗНО-ОДНОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРИ СТОХАСТИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Розроблено та досліджено систему керування трифазно-однофазного асинхронного електроприводу з регульованим фазозміщуючим модулем, що дозволяє отримати симетричний режим при випадковому характері зміни навантаження.

Разработана и исследована система управления трехфазно-однофазного асинхронного электропривода с регулируемым фазосмещающим модулем, которая позволяет получить симметричный режим при случайном характере изменения нагрузки.

ВСТУП

Режими роботи багатьох електроприводів, що використовуються в механізмах будівельного, сільськогосподарського виробництва та комунального господарства, характеризуються випадковою зміною моменту навантаження в широкому діапазоні [1]. Це стосується і електроприводів на базі трифазного асинхронного двигуна (АД), що живляться від однофазної мережі – трифазно-однофазних електроприводів з регульованими фазозміщуючими модулями. Системи керування такими електроприводами спрямовані на мінімізацію струмів зворотної послідовності, але в динамічних стохастичних режимах з інтенсивною зміною навантаження (дробарки, будівельно-оздоблювальні машини) через наявність механічної та електромагнітної інерційностей в контурі зворотного зв'язку регульованого фазозміщуючого модуля не вдається отримати оптимальний режим роботи.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В [2] запропонована схема трифазно-однофазного електроприводу з триелементним фазозміщуючим модулем з дискретним триступеневим регулюванням ємностей конденсаторів (рис.1).

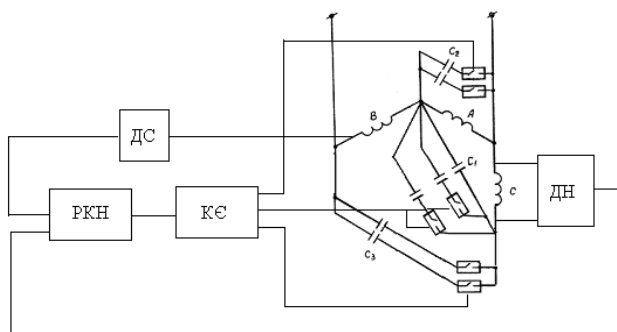


Рис. 1. Функціональна схема трифазно-однофазного електроприводу з триелементним фазозсуваючим модулем

Регульованим параметром в даній схемі є коефіцієнт несиметрії, який визначається непрямо через момент навантаження, що в свою чергу контролюється за допомогою датчиків електричних величин – фазних напруг та струмів. Перемикання ступенів відбувається за допомогою керуючого пристрою, що включає в себе датчики тих фазних напруг і струмів (ДН та ДС), що є найбільш чутливими до зміни навантаження, мікропроцесорний регулятор коефіцієнту несиметрії (РКН), що визначає за показами датчиків необхідний ступінь фазозміщуючого модуля, та напівпро-

відникові комутатори ємностей (КЄ). Залежність ККД двигуна 4А71А2 в трифазно-однофазному електроприводі за схемою рис.1 від навантаження приведена на рис. 2.

Кожний ступінь регулювання даного фазозміщуючого модуля відповідає визначеному діапазону зміни навантаження, які на рис.2 позначені цифрами I, II і III. Визначення оптимальних значень ємностей фазозсуваючих конденсаторів для кожного із ступенів в статичному режимі роботи та методика визначення алгоритму перемикання ступенів викладені в [2].

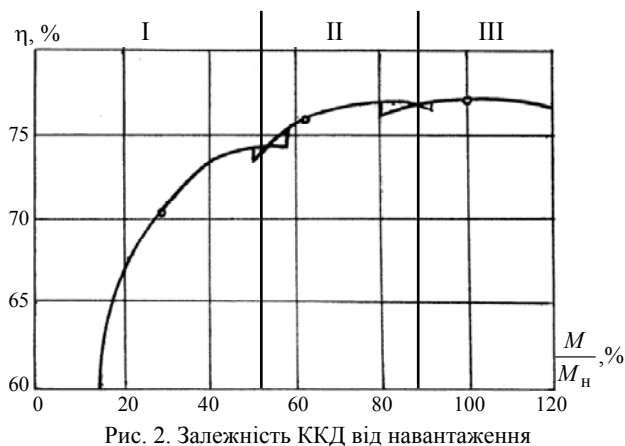


Рис. 2. Залежність ККД від навантаження

Запропонована замкнута система керування може забезпечити симетричний режим роботи асинхронного двигуна в широкому діапазоні зміни навантаження і відповідно знизити його енергоспоживання та підвищити надійність його роботи. Але оскільки розглядаються режими навантаження електроприводів, що мають різко змінний випадковий характер, система керування через наявність електромагнітної та механічної інерційностей в замкнутому контурі не дозволяє отримати оптимальний режим без відповідної фільтрації випадкової складової навантаження. Отже, керуючий мікропроцесорний пристрій для врахування стохастичного характеру зміни навантаження повинен бути доповнений фільтром випадкової величини, який може бути поданий як статистично оптимальний регулятор [3], синтез якого відбувається за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки регульованого параметру – в даному випадку, коефіцієнта несиметрії.

Розрахунки показали, що при навантаженні, що має експоненціальну кореляційну функцію, передато-

чною функцією оптимального регулятора буде інерційна ланка, а при навантаженні з експоненціально-косінусною кореляційною функцією – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та формуючої ланки.

За методикою [3] проведено синтез статистично оптимального регулятора електроприводу прямої дробарки зерна, виконаного за запропонованою схемою. Кореляційна функція і спектральна густина випадкової складової процесу зміни навантаження добре апроксимуються виразами виду

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau, \quad (1)$$

$$S(\omega) = \frac{\sigma^2}{\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \beta)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \beta)^2} \right], \quad (2)$$

де α – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність згасання кореляційної функції; β – коефіцієнт, що визначає кутову частоту коливаль.

Часові діаграми зміни електромагнітного моменту трифазно-однофазного електроприводу за схемою рис.1 при випадковому моменті навантаження з експоненціально-косінусною кореляційною функцією (1) при застосуванні статистично оптимального регулятора та без такого регулятора показані на рис.3. Дані діаграми отримані шляхом математичного моделювання. Цифрами I, II, III показані зони, в яких відбувається робота з одним із трьох ступенів фазозміщуючого модуля. Суцільними лініями між цими зонами показані лінії перемикання ступенів. Відзначимо, що з рис. 3 видно, що при застосуванні оптимального фільтру перемикання між ступенями відбувається значно рідше, ніж при відсутності фільтру.

$M, H \cdot m$

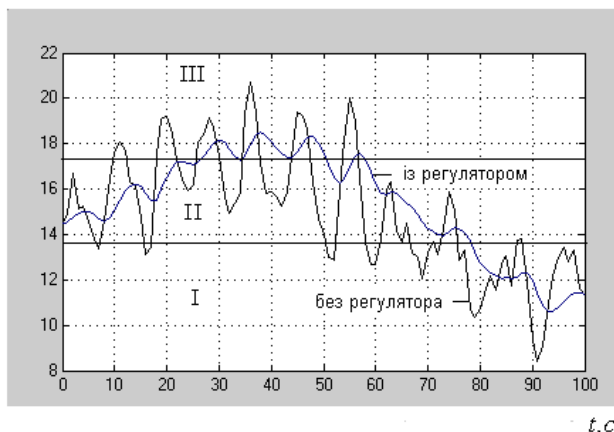


Рис. 3. Часові діаграми зміни електромагнітного моменту трифазно-однофазного асинхронного електроприводу

Проведені дослідження показали ефективність фільтрації статистично оптимальними регуляторами високочастотних складових моменту навантаження з відповідним зниженням дисперсії електромагнітного моменту в 4-5 разів. Завдяки цьому є можливим суттєве зниження амплітуди пульсацій електромагнітного моменту та відповідних навантажень на механічні вузли, зменшення кількості перемикань комутатора ємностей та збільшення енергетичних показників електроприводу.

ВИСНОВКИ

Запропонована система керування трифазно-однофазним електроприводом з триелементним дискретно регульованим фазозміщуючим модулем. Для забезпечення мінімальної дисперсії струму зворотної послідовності при стохастичній зміні навантаження в системі керування застосовано алгоритм оптимальної фільтрації, що дозволяє отримати в однофазному режимі ККД АД близький до ККД того ж АД при симетричному живленні при роботі в динамічному режимі зміни навантаження за випадковими законами. Застосування оптимального фільтру дозволяє не тільки знизити дисперсію електромагнітного моменту (або дисперсію струму зворотної послідовності) трифазно-однофазного асинхронного електроприводу, тим самим збільшивши його ККД, але й зменшити кількість перемикань комутатора ємностей, що збільшує в цілому надійність запропонованої системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ільчов І.П., Хандола Ю.М., Серета А.І., Хандола О.Ю., Федюшко Ю.М. Методи вибору приводних електродвигунів для машин та механізмів, які працюють при випадковому навантаженні // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – 2011. – Вип.116. – С. 69-72.
2. Шуруб Ю.В. Трифазно-однофазний асинхронний електропривод з багатоеlementним ємнісним фазозміщуючим модулем // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №3. – С. 49-50.
3. Шуруб Ю.В. Розробка системи керування трифазно-однофазних асинхронних електроприводів при випадкових навантаженнях // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип.1. – С. 12-15.

Bibliography (transliterated): 1. Illichov I.P., Handola Yu.M., Sereta A.I., Handola O.Yu., Fediushko Yu.M. Methods of choice of electric motors of drives for machines and mechanisms which work with casual loadings. *Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (KhNTUA)*, 2011, no.116, pp. 69-72. 2. Shurub Yu.V. A three-one phase induction electric drive with a multiple-unit capacitor phase-shifting modules. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.3, pp. 49-50. 3. Shurub Yu.V. Working out of system of control of three-one phase induction electric drives at random loads. *Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.1 (17), pp. 12-15.

Надійшла (received) 20.09.2013

Шуруб Юрій Вікторович, к.т.н., с.н.с.,
Інститут електродинаміки НАН України,
03680, Київ, пр. Перемоги, 56,
тел/phone +38 044 4542637, e-mail: shurub@bigmir.net

Yu. V. Shurub

Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine
56, Peremogy Avenue, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Investigation of a three-phase-single-phase induction electric drive under stochastic loads.

A control system for a three-phase-single-phase induction electric drive with a controlled phase-shifting module is developed and studied to result in a symmetric regime under stochastic load variations.

Key words – induction electric drive, phase-shifting module, stochastic load.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КЕРНА В ПРОЦЕССЕ ГРАФИТАЦИИ

Запропоновано методику ідентифікації температурних залежностей питомих електричних опорів ядра печі графітації із застосуванням спеціального об'єктно-орієнтованого функціонального базису і температурних залежностей питомих електричних опорів його компонентів. Забезпечується висока точність обробки даних 3D моделювання електромагнітних полів у процесі графітації електродів.

Предложена методика идентификации температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений ядра печи графитации с использованием специального объектно-ориентированного функционального базиса и температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений его компонентов. Обеспечивается высокая точность обработки данных 3D моделирования электромагнитных полей в процессе графитации электродов.

Значительная энерговооруженность электротехнических комплексов графитации (ЭТКГ), большая энергоемкость технологических процессов графитации и устойчивая тенденция увеличения стоимости электроэнергии обуславливают рост себестоимости электродной продукции, так как затраты на электроэнергию могут быть сопоставимыми или даже превосходить затраты на сырье [1].

Решение сложных производственных задач по снижению энергозатрат при графитации заготовок электродов, обеспечению заданных технологических режимов и, как следствие, снижению брака и повышению качества электродной продукции реализуется путем создания новых или модернизации действующих систем автоматизированного управления ЭТКГ. Действующие системы обеспечивают контроль входных параметров по стороне высокого напряжения питающих и компенсирующих трансформаторов, что не достаточно для получения достоверной информации об электрических параметрах ядра печей графитации (ПГ), особенно при высоких температурах, которые могут достигать 3000 °C [2].

Внедрение новых перспективных сенсорных систем на стороне отводов главного шинопакета и токоподводах ПГ требует разработки соответствующего обеспечения для идентификации температурных зависимостей электрических параметров ядра и, прежде всего, его удельного электрического сопротивления (УЭС). Данные инструментального контроля электрических параметров ядра ПГ должны дополняться данными математического моделирования пространственной системы печной петли (ПП) и ядра ПГ, в которых учитываются механизмы электромагнитного и электротеплого преобразования энергии переменного тока, температурные зависимости электрофизических свойств материалов, особенности конструкции вторичных токопроводов и ядра ПГ. Эта задача является актуальной как в научном, так и в практическом плане.

Известные плоскопараллельные постановки при моделировании электромагнитных и электротепловых процессов [3, 4] не удовлетворяют требованиям высокой точности при идентификации электрических параметров ядра ПГ, который представляет собой сложную пространственную многокомпонентную систему, состоящую из цилиндрических заготовок электродов, электропроводящей пересыпки, заполняющей пространство

между графитируемыми заготовками, электропроводящей шихты шунтирующих слоев (рис. 1). Для обеспечения достоверности результатов 3D моделирования и точности идентификации УЭС ядра ПГ при различных температурных режимах графитации требуется разработка новых подходов для аппроксимации данных полевых расчетов на основе специального объектно-ориентированного функционального базиса для температурных зависимостей УЭС компонентов ядра.

Целью работы является идентификация температурных зависимостей УЭС ядра ПГ посредством применения специального объектно-ориентированного функционального базиса на основе температурных зависимостей УЭС его компонентов, обеспечивающего высокую точность аппроксимации данных 3D моделирования электромагнитных процессов при графитации заготовок электродов.

Преобразование электрической энергии переменного тока в ядре ПГ определяется взаимосвязанными электромагнитными процессами, которые описываются электромагнитной моделью в частотной формулировке для амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов (рис. 1):

$$\begin{cases} j\omega \frac{\mathbf{A}_i}{\rho(\theta)_i} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_i} \mathbf{B}_i \right) = 0, & \mathbf{B}_i = \nabla \times \mathbf{A}_i, \\ \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \cdot \mathbf{V}_i + j\omega \mathbf{A}_i}{\rho(\theta)_i} \right) = 0, & \forall i \in [1, \dots, 6] \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{A}$ – векторный магнитный потенциал (ВМП); $\mathbf{B}$ – магнитная индукция; V – электрический потенциал; $\rho(\theta)$ – УЭС компонентов ядра и вторичных токопроводов; θ – температура; ω – угловая частота; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_i – эквивалентная относительная магнитная проницаемость, индексы $i = 1, 2, 3$ соответствуют областям ядра (заготовки электродов, пересыпка, шунтирующий слой), $i = 4, 5, 6$ – токопроводам, графитовой плите, проводниковым материалам шинных пакетов печной петли.

Амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей связаны с амплитудами электрического и векторного магнитного потенциалов выражениями:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_i = -\nabla \cdot \mathbf{V}_i - j\omega \mathbf{A}_i, \\ \mathbf{H}_i = (\mu_0 \mu_i)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_i, \end{cases} \quad \forall i \in [1, \dots, 6] \quad (2)$$

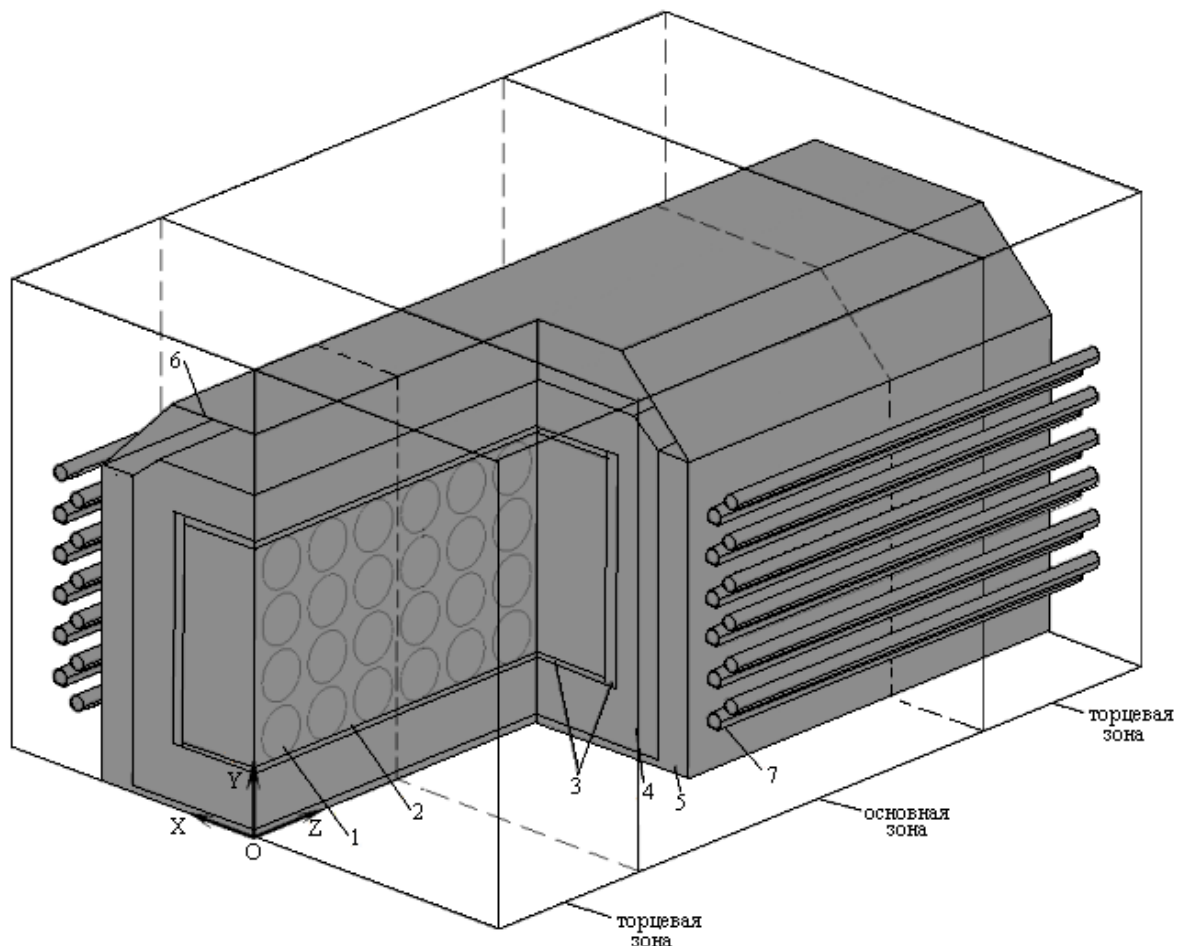


Рис. 1. Структура расчетной области ПГ: 1 – графитируемые заготовки электродов; 2 – пересыпка зерна; 3 – электропроводящая засыпка (шунт); 4 – теплоизоляционная шихта; 5 – шамотная футеровка; 6 – кожух; 7 – боковой шинный пакет

Система уравнений электромагнитной модели (1) замыкается условиями Кулона [5] $\nabla \cdot \mathbf{A}_i = 0$, $\forall i \in [1, \dots, 6]$ и граничными условиями вида:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,j} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_j) = 0 \big|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k} \\ \mathbf{n}_{i,j} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_j) = 0 \big|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k}, \mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho(\theta)}, \end{cases} \quad (3)$$

– на границах сопряжения электропроводящих сред, $\mathbf{A} = 0$ – на границах магнитной изоляции и внешних границах,

$$\left\{ \mathbf{A}_j = 0 \big|_{\forall j \in (1,6)}, V_j = \varphi_j \big|_{\forall j \in (1,6)}, \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{J}_j = 0 \big|_{\forall j \in (4,6)}, \right. \quad (4)$$

– на внешних границах расчетной области.

Распределение температур в расчетной области зерна задавалось по данным [1, 6] в соответствии с принятым температурным режимом графитации.

Для идентификации температурных зависимостей УЭС для компонентов зерна ПГ (заготовки электродов, электропроводная пересыпка и шихта шунтирующего слоя) применялись нелинейные функции:

$$\begin{cases} \rho_i(\theta) = \rho_{0,i} + \sum_{k=1}^2 a_{k,i} \cdot \operatorname{erfc}[b_{k,i} \cdot (\theta - c_{k,i})] + \\ + \sum_{m=1}^2 d_{m,i} \cdot \exp[-g_{m,i} \cdot (\theta - \gamma_{m,i})^2] \end{cases} \quad \forall i \in 1,2,3. \quad (5)$$

Значения параметров регрессии в соотношениях (5) определяются на множествах экспериментальных данных $\{\tilde{\theta}_{\text{эксп}}\}_i, i \in (1,3)$ и $\{\tilde{\rho}_{\text{эксп}}\}_i, i \in (1,3)$ [7] в структуре средств MathCAD с использованием функции **genfit** и вектора частных производных:

$$\begin{pmatrix} \partial \rho_i / \partial \rho_{0,i} \\ \partial \rho_i / \partial a_{k,i} \\ \partial \rho_i / \partial b_{k,i} \\ \partial \rho_i / \partial c_{k,i} \\ \partial \rho_i / \partial d_{m,i} \\ \partial \rho_i / \partial g_{m,i} \\ \partial \rho_i / \partial \gamma_{m,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\operatorname{erfc}(b_{k,i}(\theta - c_{k,i}))}{2 \cdot a_{k,i} \cdot e^{-b_{k,i}^2(\theta - c_{k,i})^2} \cdot (\theta - c_{k,i})} \\ \frac{2 \cdot a_{k,i} \cdot b_{k,i} \cdot e^{-b_{k,i}^2(\theta - c_{k,i})^2}}{\sqrt{\pi}} \\ e^{-g_{m,i}(\theta - \gamma_{m,i})^2} \\ -d_{m,i} \cdot e^{-g_{m,i}(\theta - \gamma_{m,i})^2} \cdot (\theta - \gamma_{m,i})^2 \\ d_{m,i} \cdot g_{m,i} \cdot e^{-g_{m,i}(\theta - \gamma_{m,i})^2} \cdot (2\theta - 2\gamma_{m,i}) \end{pmatrix}, \quad \forall i \in (1,3), k = (1,2), m = (1,2)$$

приводятся в табл. 1.

Сравнение УЭС, рассчитанных по уравнениям регрессии (5), с экспериментальными данными [7, 8] показало, что адекватный выбор функционального вида уравнений регрессии (5) при идентификации

температурных зависимостей УЭС компонентов керна ПГ, метода и программного обеспечения для определения коэффициентов нелинейной регрессии обеспечивает высокую точность (рис. 2). Погрешность идентификации не превышает 1,43% – для заготовок электродов, 0,95% – для пересыпки керна и 0,9% –

для шихты шунтирующих слоев керна (рис. 2). Это также обеспечивает точность реализации математической модели электромагнитных процессов в печной петле и керна (1) с условиями (2) – (5) в структуре средств Comsol Multiphysics.

Таблица 1

Коэффициенты нелинейной регрессии для идентификации температурных зависимостей УЭС электродов ($i = 1$), пересыпки ($i = 2$) и шунтирующих слоев керна ($i = 3$)

Номер компонент керна	$\rho_{0,i}$	$a_{1,i}$	$b_{1,i}$	$c_{1,i}$	$d_{1,i}$	$g_{1,i}$	$\gamma_{1,i}$
		$a_{2,i}$	$b_{2,i}$	$c_{2,i}$	$d_{2,i}$	$g_{2,i}$	$\gamma_{2,i}$
$(i = 1)$	16,5028	21,488	4,016	$1,037 \cdot 10^3$	20,9106	$1,7853 \cdot 10^{-6}$	—
		8,4323	5,6387	$2,0797 \cdot 10^3$	-9,9033	$2,1678 \cdot 10^{-6}$	$2,9423 \cdot 10^3$
$(i = 2)$	695,3645	$1,105 \cdot 10^3$	$3,683 \cdot 10^{-3}$	164,5072	203,0551	$2,8354 \cdot 10^{-5}$	$2,8823 \cdot 10^3$
		$2,9027 \cdot 10^3$	$1,3736 \cdot 10^{-3}$	1562,05	—	—	—
$(i = 3)$	860,475	$1,62 \cdot 10^3$	$3,838 \cdot 10^{-3}$	169,394	497,707	$6,399 \cdot 10^{-6}$	413,488
		—	—	—	—	—	—

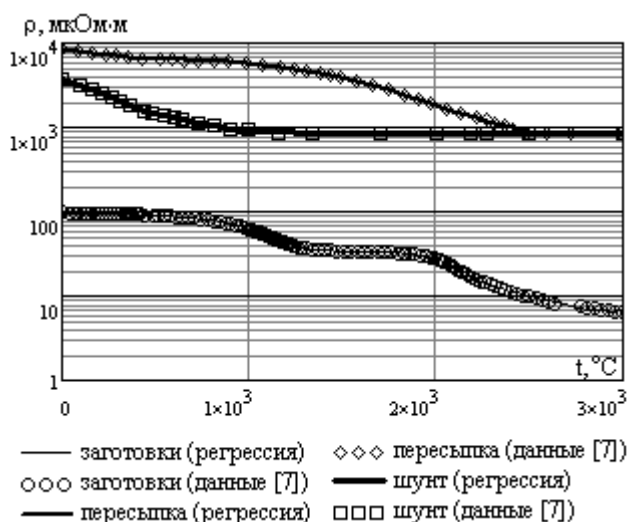


Рис. 2. Температурные зависимости УЭС заготовок электродов ($i = 1$), пересыпки ($i = 2$) и шунтирующих слоев керна ($i = 3$)

Численный эксперимент проводился для заданного массива температурных режимов графитации [20 °C, 500 °C, 1000 °C, 1500 °C, 2000 °C, 2500 °C, 3000 °C]. Для каждого значения температуры керна итерационный вычислительный процесс соответствовал принятым значениям токовой и угловой погрешностей для токов керна и шинных пакетов $\varepsilon_{\text{туп}} \leq [\varepsilon_{\text{туп}}]$, $\varepsilon_{\text{угл}} \leq [\varepsilon_{\text{угл}}]$.

Сравнение расчетных токов в кернах с экспериментальными данными регистрации токовых нагрузок в токоподводах ПГ (класс точности регистратора – 0,2 [8]) позволило оценить токовую погрешность, значения которой не превышают 3,8%.

Анализ данных моделирования полей векторного магнитного и электрического потенциалов в кернах ПГ позволил выделить в нем торцевые ($m = 1$) и основные зоны ($m = 2$). Длина торцевых зон соответствовала длине укладки трех вертикальных рядов заготовок электродов. Для каждой зоны керна рассчитывались комплексные амплитуды токов

$$\left\{ \begin{aligned} I_{\text{кern}}|_m &= \sqrt{\dot{I}_x \cdot \dot{I}_x^* + \dot{I}_y \cdot \dot{I}_y^* + \dot{I}_z \cdot \dot{I}_z^*}|_m, \\ \dot{I}_x|_m &= \iint_{S_{\text{кern}_{yz}}} \dot{J}_x dydz|_m, \quad \dot{I}_y|_m = \iint_{S_{\text{кern}_{xz}}} \dot{J}_y dx dz|_m, \\ \dot{I}_z|_m &= \iint_{S_{\text{кern}_{xy}}} \dot{J}_z dx dy|_m, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

значения энергии магнитного поля

$$W|_m = \frac{1}{2} \iiint_{V_m} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, \quad (8)$$

активные потери

$$P|_m = \iiint_{V_m} \sigma_m^{-1} \dot{\mathbf{J}} \cdot (\dot{\mathbf{J}})^* dx dy dz, \quad m = 1, 2. \quad (9)$$

С использованием соотношений (7) – (9) определялись активные, реактивные и полные электрические сопротивления для торцевых и основных зон керна

$$R|_m = \frac{P|_m}{\dot{\mathbf{I}} \cdot \dot{\mathbf{I}}^*|_m}, \quad X|_m = \omega L|_m, \quad L|_m = \frac{2 \cdot W|_m}{\dot{\mathbf{I}} \cdot \dot{\mathbf{I}}^*|_m},$$

$$Z|_m = \sqrt{R^2 + X^2}|_m, \quad m = 1, 2.$$

и средние значения УЭС для этих зон

$$\rho|_m = \frac{R|_m \cdot (S|_m)^2}{V|_m}, \quad m = 1, 2. \quad (10)$$

Температурные зависимости УЭС торцевых и основных зон керна идентифицировались на функциональном базисе

$$\rho_{\text{кern}}(\theta)|_m = \rho_{\text{кern}_{m,0}} + \sum_{i=1}^3 \alpha_{m,i} \cdot \rho_i(\theta), \quad m = 1, 2, \quad (11)$$

что позволило определить коэффициенты линейной регрессии (табл. 2) с помощью функцию **linfit** математического пакета MathCAD.

Нормирование температурных зависимостей УЭС основных и торцевых зон керна показало, что они практически идентичны друг другу (рис. 3). Это позволило применить при расчетах УЭС торцевых зон

$$\rho_{\text{кern}}(\theta)_1 = k_T \cdot \rho_{\text{кern}}(\theta)_2$$

коэффициент добавочных потерь в этих зонах k_T , который для заготовок электродов диаметром 500 мм достигает значения равного 1,068.

Таблица 2

Коэффициенты линейной регрессии для идентификации температурных зависимостей УЭС зон керна.

Зоны керна	$\rho_{\text{кern},0}$	$\alpha_{1,i}$	$\alpha_{2,i}$	$\alpha_{3,i}$
торцевые	$4,534 \cdot 10^{-5}$	$2,526 \cdot 10^{-6}$	$5,521 \cdot 10^{-7}$	$3,175 \cdot 10^{-8}$
основные	$3,773 \cdot 10^{-5}$	$2,587 \cdot 10^{-6}$	$5,534 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-8}$



Рис. 3. Температурные зависимости УЭС торцевых и основных зон керна ПГ

При изменении температуры керна его индуктивное сопротивление остается практически постоянным, поэтому изменение полного сопротивления керна определяется только изменением его активного сопротивления и, следовательно, УЭС его основной зоны.

Для оценки значений добавочных потерь в кернах определялись температурные зависимости УЭС керна на постоянном токе. Расчеты выполнялись по данным моделирования электромагнитных полей в формулировках скалярных магнитных и электрических потенциалов и соотношениям (7) – (11). Коэффициент добавочных потерь определялся отношением УЭС керна на переменном токе промышленной частоты к УЭС керна на постоянном токе, что позволило идентифицировать его температурные зависимости для заданного вида уравнения нелинейной регрессии:

$$k_D(\theta)_i = \eta_i + \beta_i \cdot \exp(-\zeta_i \cdot (\theta_{\text{max}} - \theta)^9), i = 1, 2. \quad (12)$$

Определение коэффициентов регрессии в уравнении (12) выполнялось аналогично как для (11). Значения коэффициентов регрессии составили $\eta = 0,159$, $\beta = 0,808$, $\zeta = 0,66 \cdot 10^{-12}$ для торцевых зон ($i = 1$) и $\eta = 0,163$, $\beta = 0,874$, $\zeta = 0,657 \cdot 10^{-11}$ – для основных зон ($i = 2$) при $\nu = 3,80$, $\theta_{\text{max}} = 3000$ °С. Относительная погрешность уравнений (12) по данным моделирования не превышает 0,8 %.

Так как при температурах керна превышающих 2000 °С его УЭС существенно уменьшается (рис. 3),

то влияние поверхностного и внешнего поверхностного эффектов будет выражено сильнее. Это обуславливает увеличение добавочных потерь и, следовательно, коэффициента добавочных потерь, который возрастает от значений 1,0159 – 1,0163 при температурах ниже 2000 °С до значений 1,088 – 1,093 при температуре 2500 °С и 1,097 – 1,104 – при температуре 3000 °С (рис. 4). Причем при высоких температурах графитации воздействие этих эффектов более интенсивное, хотя разброс значений коэффициентов добавочных потерь не превышает 1%.

Таким образом, обладающие высокой точностью идентификации температурных зависимостей УЭС керна соотношения (11), (12), позволяют обеспечить технологический контроль температуры графитации. Для этого на токоподводах печи графитации с помощью регистратора [8] получают осциллограммы напряжения и тока, определяют их амплитуды и сдвиги по фазе, рассчитывают активную и полную мощность графитации, УЭС керна и УЭС его торцевой и основных зон, а далее из соотношения (11) определяют их температуры. При измерениях на постоянном токе (при технологических отключениях ПГ) данные УЭС для керна, его торцевых и основных зон корректируют с использованием температурных зависимостей для коэффициентов добавочных потерь (12) и из соотношения (11) определяют соответствующие температурные режимы.

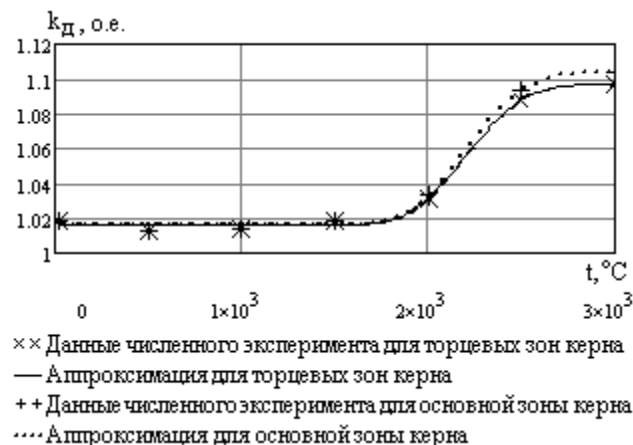


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента добавочных потерь для торцевых и основных зон керна ПГ

ВЫВОДЫ

Высокие температуры графитации заготовок электродов, низкая точность прямых методов их измерения, большие затраты при проведении экспериментальных исследований на действующем оборудовании обосновали необходимость численного эксперимента на базе 3-D моделей электромагнитных полей.

Высокая точность идентификации температурных зависимостей УЭС керна обеспечивается выбором объектно-ориентированного базиса функций, который образуется путем высокоточной аппроксимации температурных зависимостей УЭС заготовок электродов, пересыпки и шихты шунтирующих слоев.

Разработаны базовые подходы для технологического контроля температурного уровня графитации по данным измерений токов, напряжений и расчетов

УЭС для торцевых и основных зон керна (11) с учетом коэффициента добавочных потерь (12) для ПГ переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Д.М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона. – Ростов н/Д: РГАСХМ ГОУ. – 2003. – 168 с.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
3. Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. "Силовая електроніка і енергоефективність". – 2011. – С. 229-233.
4. Ярымбаш Д.С., Килимник И.М., Ярымбаш С.Т. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С. 36-43.
5. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – №1. – С. 49-54.
6. Панов Е.Н., Лелека С.В., Коржик М.В. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов // ПИКАД. – 2005. – №2. – С. 28-30.
7. Кузнецов Д.М., Фокин В.П. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 132 с.
8. Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник А.В. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. – Вип. 3/2006(38). С. 91-95.

Bibliography (transliterated): 1. Kuznecov D.M. *Graphitization of the large electrodes. Acheson process*. Rostov-on-Don: RGASHM GOU, 2003. 168 p. 2. Chalyh E.F. *Equipment of the Electrode Plants*. Moscow, Metallurgija Publ., 1990. 238 p. 3. Yarymbash D.S., Yarymbash S.T. Increasing energy efficiency of side bus package of graphitization furnaces AC. *Technical electrodynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2011, pp. 229-233. 4. Yarymbash D.S.,

Kilimnik I.M., Yarymbash S.T. The features of determining the electrical equivalent circuit furnace hinges parameters of the AC graphitization furnace. *Electrical engineering and power industry*, 2010, no.2, pp. 36-43. 5. Yarymbash D.S. The identification of the circuit furnace electrical parameters of the power graphitization furnaces. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 49-54. 6. Panov E.N., Leleka S.V., Korzhik M.V. The complex data collection for high-temperature industrial aggregates. *PiKAD*, 2005, no.2, pp. 28-30. 7. Kuznecov D.M., Fokin V.P. *The process of graphitization of carbon materials. Modern methods of investigation*. Novocherkassk, JuRGU Publ., 2001. 132 p. 8. Yarymbash D.S., Yarymbash S.T., Tjutjunnik A.V. The features of the control of electrical parameters, power and energy consumption during the campaign graphitization furnaces AC. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2006, no.3(38), pp. 91-95.

Поступила (received) 20.02.2014

Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доц.,
Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел/phone +38 066 965 86 73, e-mail: yarymbash@gmail.com

D.S. Yarymbash

Zaporizhzhya National Technical University
64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine

Identification of temperature dependences of center-punch specific electrical resistance during graphitization.

A temperature dependence identification technique is worked out for graphitization furnace center-punch specific electrical resistance through applying a special object-oriented functional basis and temperature dependences of its components specific electric resistance. High accuracy of 3D electromagnetic field simulation data processing during electrode graphitization is maintained.

Key words – identification, temperature dependence, center-punch specific electrical resistance, object-oriented functional basis, electrode graphitization, 3D electromagnetic fields.

ДАНЬКО ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ

(До 80-річчя з дня народження)

Володимир Григорович народився 15 квітня 1934 року у місті Челябінську. У 1957 році закінчив Харківський авіаційний інститут. Тривалий час працював у науково-дослідному інституті заводу «Електроважмаш» на різних посадах (1957-1983 р.р.), в тому числі директором (1978-1982 р.р.). З 1983 року – завідувач кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Перший етап наукової діяльності Володимира Григоровича пов'язаний із дослідженням нагріву і охолодження великих електричних машин. За результатами цієї роботи, зокрема вдалося на 10 % підвищити ефективність головного приводу блюмінгу заводу «Азовсталь». Проведені дослідження лягли в основу його кандидатської дисертації (1964 р.).

Як провідний спеціаліст приймав участь у розробці турбогенераторів потужністю 200, 300 і 500 МВт. За його безпосередньої участі створені гідрогенератори, у тому числі капсульного типу, для Київської ГЕС, а також унікальні машин постійного струму для прокатних станів й вугільної промисловості. Він розробив перспективні методи розрахунку температурних полів в електричних машинах різноманітного призначення. На базі виконаних досліджень у 1971 році захистив докторську дисертацію на тему «Теоретичні і експериментальні дослідження нагріву великих електричних машин».

Другий етап наукової діяльності Володимира Григоровича пов'язаний з технічним використанням надпровідності. Професор Д.В.Г. одним з перших у світі почав займатися проблемами використання надпровідності в електричних машинах. Йому належить теоретичне обґрунтування вибору оптимальної конструкції кріотурбогенераторів з надпровідниковими обмотками збудження, оцінка ефективності їх електромагнітного екранування. Під його керівництвом та за його безпосередньої участі створено макети і дослідні зразки кріогенних електричних машин з використанням надпровідності.

Він був одним з авторів конструкції створеного у НДІ «Електроважмаш» дослідного кріотурбогенератора потужністю 200 кВт, працездатність якого була підтверджена у ході іспитів, проведених спільно з фізико-технічним інститутом низьких температур АН УРСР. Принципи, які були закладені в цю конструкцію широко використовуються у наступних розробках в Україні і за її межами.

На базі теоретичного і практичного обґрунтування проф. Д.В.Г. розробив рекомендації по створенню дослідно-промислового зразка прокатного кріодвигуна потужністю 10 МВт і кріотурбогенератора потужністю 300 МВт, яким притаманні високі техніко-економічні показники. У 1990 році обґрунтував концепцію повністю надпровідникової синхронної машини без феромагнітного осердя із зовнішнім надпровідни-

ковим екраном й отримав експериментальне підтвердження її працездатності.

За цикл праць з дослідження електромагнітних полів у потужних турбогенераторах і електричних машинах з використанням надпровідності був удостоєний премії імені Г.Ф. Проскури АН УРСР в співавторстві з академіком НАНУ Г.Г. Счастливим та проф. О.І. Титко (1979 р.).

Третій етап наукової діяльності Володимира Григоровича пов'язаний з розробкою нетрадиційних лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії. За його безпосередньої участі був створений повномасштабний дослідно-промисловий макет лінійного синхронно-вентильного двигуна, призначеного для розгону літальних апаратів корабельного базування. Під його керівництвом було теоретично обґрунтовано новий клас кріогенних машин – лінійних імпульсних електродвигунів індукційного типу з кріорезистивними обмотками, які забезпечують високі швидкості на короткій активній ділянці і значні ударні навантаження при малих переміщеннях. Крім того під його керівництвом проводяться роботи з теоретичного обґрунтування концепції надпровідникового швидкодіючого обмежувача струму короткого замикання.

Професор В.Г. Д.В.Г. опублікував 190 наукових праць і методичних розробок, в тому числі 4 монографії і 3 начальних посібники. Він є автором 62 авторських свідоцтв і патентів України і Росії на винаходи, одним із засновників і першим головним редактором науково-практичного журналу «Електротехніка і електромеханіка», який набув визнання не тільки в Україні, але й в інших країнах.

Проф. В.Г. Д.В.Г. є багаторічним головою докторської спеціалізованої вченої ради при НТУ «ХПІ» за спеціальностями «Електричні машини і апарати» та «Техніка сильних електричних і магнітних полів», а також одним із засновників Міжнародного симпозіуму «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA)», який щорічно проходить у Харкові, починаючи з 2000 року. Член IEEE з 1991 року.

В.Г. Д.В.Г. прикладає багато зусиль до розширення зв'язків кафедри загальної електротехніки, яку він очолює вже понад 30 років, з найвідомішими навчальними закладами України і Росії. Він приймає активну участь у проведенні Всеукраїнської олімпіади з електротехніки, яка останні п'ятнадцять років за дорученням Міністерства освіти і науки України проводиться на його кафедрі, а сам він був відзначений почесним знаком «Відмінник вищої школи».

Ректорат НТУ «ХПІ», співробітники кафедри загальної електротехніки, численні учні, друзі й колеги щиро вітають Володимира Григоровича з ювілеєм, зичать йому міцного здоров'я, подальших творчих успіхів.

Редакційна колегія журналу «Електротехніка і електромеханіка» приєднується до цих побажань.



СОСКОВ АНАТОЛИЙ ГЕОРГИЕВИЧ

(к 75-летию со дня рождения)

8 марта 2014 года исполняется 75 лет со дня рождения известного ученого и специалиста в области электроаппаратостроения, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой теоретической и общей электротехники Харьковской национальной академии городского хозяйства (ХНАГХ) Анатолия Георгиевича Соскова.

После окончания средней школы в г. Константиновке Донецкой обл. в 1956 году Анатолий Георгиевич поступил на электромашиностроительный факультет Харьковского политехнического института, который успешно закончил в 1961 году по специальности «Электрические машины и аппараты». По распределению был направлен во Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт электроаппаратостроения (ВНИИЭлектроаппарат), где проработал 20 лет, из них зав. лабораторией с 1966 г. по 1976 г. и зав. отделом с 1976 г. по 1981 г. В 1981 году как высококвалифицированный специалист был приглашен на должность заведующего кафедрой теоретической и общей электротехники ХНАГХ, которую успешно возглавляет уже 28-й год. В 1975 г. защитил кандидатскую, а в 1994 г. – докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты». В 1995 г. ему присвоено звание профессора, а в 2004 г. – почётное звание заслуженного профессора ХНАГХ. Он имеет более 200 печатных работ, из них 2 монографии, порядка 50 авторских свидетельств и патентов, 2 учебника и 4 учебных пособия с грифом МОН.

Анатолий Георгиевич – ведущий специалист Украины в области разработки полупроводниковых и гибридных аппаратов. Он является одним из создателей этого нового направления, базирующегося на применении новейших достижений силовой электроники и микросхемотехники в электроаппаратостроении.

Под его руководством и при непосредственном участии было разработано ряд серий полупроводниковых аппаратов, а также автоматизированных низковольтных (до 1000 В) комплектных устройств (НКУ) на их основе. Ниже приводятся важнейшие из них:

- полупроводниковые расцепители серии РП для автоматических выключателей АЗ700 (выпуск освоен в 1969 г. на Калининском заводе электроаппаратуры);
- гибридные контакторы переменного тока серий КТ64 и КТП64, КТ65 и КТП65 на напряжения до 660 В и постоянного тока серии КП81 на напряжения до 440 В и токи 100 – 630 А («Электроконтактор» – г. Владикавказ, НПО ХЭМЗ – г. Харьков, ЧЭАЗ – г. Чебоксары) в 1974 – 1977 гг.;
- полупроводниковые блоки для бездуговой коммутации серии БПК21 для контакторов переменного тока и серии БПК51 для контакторов постоянного тока («Электроавтоматика» – г. Ставрополь) в 1974 – 1976 гг.;
- комплекс специального автоматизированного технологического оборудования (более 40 типопол-

нений), обеспечивающего настройку и испытания низковольтных автоматических выключателей на токи от 10 до 1600 А (Донецкий электромеханический завод) в 1978 – 1981 гг.;

- бесконтактные полупроводниковые выключатели переменного и постоянного напряжения на токи 63 – 400 А для систем гарантийного электроснабжения (НПО ХЭМЗ) в 1985 – 1989 гг.;
- автоматизированные НКУ для систем низковольтного электроснабжения, в том числе быстродействующие устройства ввода резерва переменного и постоянного напряжения, устройства регулируемых асинхронных приводов и т.п. (НПО ХЭМЗ) в 1986 – 1994 гг.;
- электронные бытовые (класс 1,5) и промышленные (класс 1,0) счётчики активной энергии (завод «Коммунар» – г. Харьков, «Электрон» – г. Жёлтые воды и Мытищинский электротехнический завод) в 1992 – 1998 гг..

Он внёс большой вклад в создание основ теории полупроводниковых и гибридных аппаратов, им предложены методы расчёта нестационарных теплофизических и электромагнитных процессов в указанных аппаратах, что позволяет успешно их проектировать.

Анатолий Георгиевич также проявил себя умелым организатором учебно-методической и научной работы на кафедре. Под его руководством были созданы и оснащены современным оборудованием следующие учебные лаборатории: ТОЭ, общей электротехники, промышленной электроники, микропроцессорной техники, электрических машин, основ метрологии и электрических измерений. За период, начиная с 1991 г., по результатам научных исследований, выполняемых на кафедре, были защищены 3 докторские и 8 кандидатских диссертаций. По учебникам «Електроніка і мікросхемотехніка» и «Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита» и учебному пособию «Промислова електроніка і мікросхемотехніка», выпущенных под его редакцией многотысячным тиражом, обучаются студенты большинства вузов Украины по направлениям «Электромеханика» и «Электротехника», им изданы две монографии, посвящённые гибридной коммутационной аппаратуре. За трудовые заслуги он награждён медалью «За трудовую доблесть» и грамотой Харьковского областного совета за добросовестный труд в области образования.

Среди коллег Анатолий Георгиевич пользуется заслуженным уважением за доброту, тактичность и скромность.

Ректорат ХНАГХ, деканат факультета электроснабжения и освещения городов, сотрудники кафедры, друзья и коллеги поздравляют Анатолия Георгиевича с юбилеем и желают крепкого здоровья, хорошего настроения и творческих успехов.

Редакционная коллегия журнала «Электротехника и электромеханика» присоединяется к этим искренним пожеланиям.



РОЗАНОВ ЮРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

(к 75-летию со дня рождения)

Юрий Константинович Розанов родился 31 марта 1939 года. После окончания средней школы он поступил в Московский энергетический институт, обучение в котором успешно завершил в 1962 г., получив квалификацию специальности инженера электромеханика. В этом же году начал работать на Московском прожекторном заводе, где проработал до 1989 года, занимая должности от инженера до заместителя главного конструктора. Во время работы на заводе он принимал непосредственное участие в разработке новой техники, за создание которой был награжден орденами Трудового Красного Знамени и Знак Почета, а также рядом медалей.

Еще в студенческие годы Юрий Константинович проявил интерес к научной работе и в 1965 году он поступил без отрыва производства в заочное отделение аспирантуры Энергетического института им. Г.М. Кржижановского, в котором в то время работали крупнейшие специалисты в области электроэнергетики, в частности проф. Ю.Г. Толстов, особенностью научной школы которого было соединение глубоких теоретических исследований с практическим внедрением результатов диссертационных работ. Результатом кандидатской диссертационной работы Ю.К. Розанова, которую он успешно защитил в 1969 г., было создание первого в России тиристорного преобразователя частоты 50/400 Гц мощностью 30 кВА. Продолжая дело своих научных учителей, Ю.К. Розанов и сам подготовил 14 кандидатов технических наук.

С 1972 года Юрий Константинович начинает свою педагогическую деятельность, сначала на заочном отделении в МИРЭА, а с 1984 года – в МЭИ.

Работая на заводе, Юрий Константинович не оставляет серьезную исследовательскую деятельность в области теории электрической мощности, силовой электроника и регуляторов мощности. В это время он руководит разработкой ряда преобразователей переменного/постоянного тока мощностью от 1 до 3 кВА с высоким качеством выходных параметров и ряда статических преобразователей для систем автономного гарантированного электроснабжения. В 1987 году Юрий Константинович защищает докторскую диссертацию в ученом совете МЭИ.

В 1989 году проф. Розанов Ю.К. был избран по конкурсу на должность заведующего кафедрой «Электрические аппараты» МЭИ, в этой должности он проработал 15 лет. В эти годы он был одним из организаторов новой специальности «Электрические и электронные аппараты», руководя разработкой программ одноименной учебной дисциплины для обучения студентов вузов по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»

с учетом достижений силовой электроники. Соответствующее название – «Электрические и электронные аппараты» получила и возглавляемая им кафедра. С 2004 года по настоящее время Юрий Константинович работает профессором этой кафедры.

Юрий Константинович активно и успешно занимается методической работой. Он является автором



трех учебников, один из которых (Основы преобразовательной техники. – М: Энергия, 1979) был переиздан в 1985 году в Чехословакии. За создание других учебников проф. Розанову Ю.К. были присуждены почетные звания: «Лауреат премии Правительства РФ в области науки» и «Лауреат премии Правительства РФ в области образования».

Юрий Константинович является автором более 150 опубликованных работ, а также 26 авторских свидетельств и патентов на изобретения. За вклад в развитие науки проф. Розанову Ю.К. присуждено звание «Заслуженный деятель науки». Он является действительным членом АЭН РФ.

Юрий Константинович ведет большую общественную работу, являясь членом двух специализированных советов по присуждению ученых степеней.

Проф. Розанов Ю.К. является организатором и председателем отделения Российской секции международного института инженеров электротехники и электроники (IEEE), является главным редактором журнала «Электротехника», членом редколлегии журнала «Электричество», а также журнала «Электротехника и электромеханика». Он постоянно следит за научнотехнической периодикой и прекрасно знает все мировые достижения по тематике, входящей в сферу его научных интересов.

Юрий Константинович – очень разносторонний человек. Всегда много читал художественной литературы и продолжает читать. Хорошо знает и продолжает интересоваться историей и философией. У него прекрасные человеческие качества и хороший характер. Он пунктуален, обязателен, очень доступен, уважительно относится к коллегам, всегда идет навстречу и поможет.

Раньше он серьезно увлекался охотой, сейчас любит ходить по грибы. Как настоящий мужчина, понимает толк в оружии (ружья, пистолеты, ножи и т.п.). Любит плавать и постоянно ходит в бассейн. Автомобилист. Очень хорош в компании, при этом ведет себя очень просто, ценит юмор и шутку.

Друзья, коллеги и многочисленные ученики желают Юрию Константиновичу хорошего здоровья и долгих лет плодотворной деятельности.

Редакция журнала «Электротехника и Электромеханика» искренне присоединяется к этим теплым пожеланиям.