

ISSN 2074-272X

2013/6

науково-практичний
журнал

Електротехніка і Електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Силова електроніка

Теоретична електротехніка

Ювілеї

За 2012 р. журнал отримав індекс 5,55

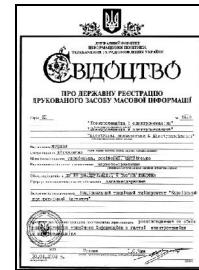
від міжнародної наукометричної бази

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., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків
Батигін Ю.В. д.т.н., професор, ХНАДУ, Харків
Біро Оскар професор, Технічний університет,
м. Грац, Австрія
Боєв В.М. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Болюх В.Ф. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Буткевич О.Ф. д.т.н., професор, гол.н.с. ІЕД НАНУ, Київ
Віницький Ю.Д. д.т.н., професор, GERUS
Москва, Росія
Гончаров Ю.П. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Гурін А.Г. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Дан'ко 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. НАНУ,
ректор КрНУ, Кременчук
Кириленко О.В. д.т.н., професор, академік НАНУ,
директор ІЕД НАНУ, Київ
Кравченко В.І. д.т.н., професор, директор НДПКІ
"Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

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
Batigin Yu.V. Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
Bíró O. Professor, Graz University of Technology, Graz, Austria
Boev V.M. Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
Bolyukh V.F. Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
Butkевич 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

Маслієв В.Г. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Михайлів 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
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
Резцов В.Ф. д.т.н., професор, член-кор. НАНУ,
заст. директора ІВЕ НАНУ, Київ
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 ХФІ, Харків

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

Tkachuk V.I. Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Shinkarenko V.F. Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 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
Rudakov V.V. 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
Технічне редактування / Technical editing: Ємельянов В.Л. / Emel'yanov V.L., тел. +38 057 7076976, e-mail: evl2008@ukr.net

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", 2013

Підписано до друку 10.12.2013 р. Формат 60 x 90 1/8. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,5.
Наклад 200 прим. Зам. № 0457/0357. Ціна договірна.

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

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 17: Изобретения в сварке материалов.....	3
---	---

Електричні машини та апарати

Байда Е.И. Расчет контактных давлений в механических системах с помощью программы Comsol Multiphysics.....	17
Гайденко Ю.А., Вишневский Т.С., Штогрин А.В. 3D-моделирование для определения осевых сил, действующих на элементы торцевой зоны мощного турбогенератора.....	21
Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Реверсивные тиристорные преобразователи бесконтактных синхронных компенсаторов.....	27
Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Гринь Г.М., Грициук В.Ю. Расчет теплового поля полифункционального электромеханического преобразователя с полым перфорированным ротором.....	31
Лущик В.Д., Полезин С.Ю., Антипко Г.С. Передчасний вихід з ладу обмоток двополюсних асинхронних двигунів середньої потужності	37
Мильх В.Й., Полякова Н.В. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки.....	40
Осташевский Н.А., Петренко А.Н., Шайда В.П. Разработка математической модели температурного поля ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя на основе дифференциальных уравнений теплопроводности	46

Силова електроніка

Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Крылов Д.С., Тугай Д.В., Титаренко И.Г., Бару А.Ю., Шинднес Ю.Л. Сопоставление преобразовательных систем высоковольтного частотно-регулируемого электропривода переменного тока	49
--	----

Теоретична електротехніка

Гетьман А.В. Метод экспериментального определения магнитного момента на основе пространственного гармонического анализа сигнатур магнитной индукции	59
Костюков В.В., Канов Л.Н. Визуальное построение характеристических уравнений линейных электрических цепей	64
Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Котляров Д.А. Активное экранирование магнитного поля вблизи генераторных токопроводов электростанций	66
Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Левина С.В. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях	72

Ювілеї

Беликов Виктор Трифонович (к 80-летию со дня рождения)	77
--	----

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 17: Inventions in material welding.....	3
--	---

Electrical machines and apparatus

Baida E.I. Comsol Multiphysics based calculation of contact pressure in mechanical systems.....	17
Gaydenko Y.A., Vishnevskiy T.S., Shtogrin A.V. 3D-modeling for determination of axial forces acting in elements of the end zone of power turbogenerators	21
Galynovskiy A.M., Dubchak E.M., Lenskaya E.A. Reversible thyristor converters of brushless synchronous compensators	27
Zablodskiy N.N., Pliugin V.E., Grin G.M., Gritsyuk V.Yu. Calculation of the thermal field of a polyfunctional electromechanical transducer with a hollow perforated rotor	31
Lushchyk V.D., Polezin S.Yu., Antipko G.S. Premature failure of medium-power two-pole induction motor windings	37

Milykh V.I., Polyakova N.V. Theoretical and harmonic analysis of magnetic fields in the active zone of a turbogenerator under load conditions	40
Ostashevskiy N.A., Petrenko A.N., Shayda V.P. Development of a mathematical model for a frequency-controlled asynchronous motor rotor temperature field on the basis of differential equations of heat conduction	46

Power Electronics

Zhemerov G.G., Krylov D.S., Ilyina O.V., Tugay D.V., Titarenko I.G., Baru A.U., Shindnes U.L. Comparison of converter systems for a high-voltage variable-frequency AC drive.....	49
---	----

Theoretical Electrical Engineering

Getman A.V. An experimental magnetic moment determination method based on spatial harmonic analysis of magnetic flux density signatures.....	59
Kostyukov V.V., Kanov L.N. Visual construction of characteristic equations of linear electric circuits.....	64
Kuznetsov B.I., Nikitina N.B., Bovdyj I.V., Voloshko A.V., Vinichenko T.V., Kotlyarov D.A. Active screening of magnetic field near power stations generator buses.....	66
Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., Levina S.V. Experimental research into indoor static geomagnetic field weakening phenomenon.	72

Anniversaries

Belikov Victor Trifonovich (on the 80th anniversary of his birth).....	77
--	----

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 перereєстровано 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 (ВІНІТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВІНІТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВІНІТИ.

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.mn.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 федераційний бібліотечний каталог OCLC WorldCat за № 851561709 (worldcat.org), індексується у наукометричних базах Index Copernicus (indexcopernicus.com), Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ (elibrary.ru), Google Scholar (scholar.google.com) та входить до баз даних DOAJ (www.doaj.org), BASE (base-search.net), 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.І. Баранов

АНТОЛОГІЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 17: ИЗОБРЕТЕНИЯ В СВАРКЕ МАТЕРИАЛОВ

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії винаходу людством основних технологій зварювання металів і інших матеріалів.

Приведен краткий очерк из всемирной истории изобретения человечеством основных технологий сварки металлов и иных материалов.

"Без научных школ не будет науки.
Без науки не будет и техники..."
(из речи выдающегося ученого современности, президента НАН Украины Б.Е. Патона, 2012 год)

ВВЕДЕНИЕ

С появлением металлургии [1] у землян стали за-рождаться и первые примитивные на начальном этапе способы (технологии) соединения частей изделий из выплавленных металлов и полученных сплавов. Со-гласно [2] история соединения металлов при помощи **сварки** насчитывает несколько тысячелетий и уходит своими глубокими "корнями" в период "железного" века. Отметим, что под термином "сварка" в настоя-щее время понимается "*технологический процесс получения неразъёмного соединения посредством устано-вления межатомных и межмолекулярных связей между свариваемыми частями изделия путем их местного (общего) нагрева или пластического де-формирования*" [3]. В Британском историческом му-зее (г. Лондон) хранятся образцы древнего холодного оружия, изготовленного в странах Средиземноморья еще примерно за 1000 лет до н. э. с применением сварки железа [4]. Другие артефакты раннего искус-ства сварных работ находятся в исторических музеях Северной Америки (г. Филадельфия и г. Торонто) [4]. Самым крупным швом от сварки в древней истории считается сварной шов, выполненный на железном индийском столбе весом 5,4 т (г. Дели), построенном около 310 года н. э. [1, 4]. За многие столетия видны-ми специалистами всего мира в области сварочного дела было сделано большое количество открытий и изобретений, относящихся к сварке различных мате-риалов. Сейчас сварка металлов стала в мире одним из основных видов металлообработки и заняла важнейшее место в таких современных наукоемких про-мышленных отраслях как машиностроение, судостро-ение, нефте- и газодобыча (с хранением и поставкой на дальние расстояния этих природных горючих про-дуктов), транспорт и энергетика. Огромный научно-технический вклад в создание прогрессивных про-мышленных технологий сварки технических изделий общегражданского и военного назначения внесли ученые из России и Украины. В этой связи опре-деленный интерес как для сформировавшихся специалистов технической сферы, так и студентов высших технических заведений наших стран представляет краткое рассмотрение всемирной истории становле-ния и развития технологий сварки основных металлов и ряда неметаллов.

1. ПЕРВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СВАРКЕ МАТЕЛЛОВ

Первым и долго применявшимся людьми видом сварки стала **кузнецкая сварка**. При этом виде сварки соединение материалов осуществляется за счёт воз-никновения межатомных связей при их нагреве и пла-стическом деформировании ковочным инструментом. В настоящее время она практически не используется.

В мае 1802 года выдающимся российским физи-ком, профессором Василием Владимировичем Петро-вым (рис. 1) в одном из лучших на то время в России физических кабинетов Санкт-Петербургской медико-хирургической академии в двухэлектродной системе вначале с металлическими и затем с угольными элек-тродами, подключенными к обоим полюсам созданной им мощной электрической батареи (рис. 2), состоящей из 2100 гальванических элементов с медными и цинко-выми кружками, было опытным путем открыто явле-ние **электрической (вольтовой) дуги** [5, 6].



Рис. 1. Выдающийся российский электрофизик В.В. Петров (1761–1834 гг.), открывший явление электрической дуги [8]



Рис. 2. Схема опытов В.В. Петрова, приведших к открытию им в 1802 году в России электрической вольтовой дуги [8]

При этом ставший позже (в 1807 году) академи-ком Петербургской Академии наук В.В. Петров в по-лученных им тогда оригинальных опытных результа-тах по данной дуге указывал, что появляющийся меж-ду угольными электродами "белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлитель-

не загораются и от которого тёмный покой довольно ясно освещён быть может" [7]. Первооткрыватель вольтовой дуги в своих научных трудах (1803 год) указывал на возможность ее практического применения для освещения помещений, плавки и соединения (сварки) металлов [8,9]. Однако великое открытие вольтовой дуги значительно опередило свое время. К моменту открытия дугового электрического разряда электротехника в мире только начинала создаваться. Электротехнической промышленности еще не было. Отсутствовали необходимые источники электропитания, коммутационная аппаратура, провода и кабели.

Эти пророческие предсказания В.В. Петрова были реально осуществлены лишь в 1881 году известным украинско-российским электротехником Николаем Николаевичем Бенардосом (рис. 3), изобретшим **электродуговую сварку** металлов с применением угольных электродов, названную им "электрогефестом" [10]. Это изобретение стало главным экспонатом Парижской международной электротехнической выставки в 1881 году и получило на ней золотую медаль. По возвращении с данной выставки в г. Санкт-Петербург Н.Н. Бенардос активно продолжил совершенствовать изобретенный им способ дуговой электросварки металлов. После доведения своего способа электрической сварки металлов до возможности его промышленного применения он 31 декабря 1886 года получил российскую десятилетнюю привилегию (патент) № 11982 на "*способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока*" [10]. После появления у Н.Н. Бенардоса необходимых денежных средств этот способ электросварки металлов был им запатентован в ведущих промышленно развитых странах мира. Финансовую помощь в этом вопросе оказывал ему купец С.А. Ольшевский, ставший совладельцем этих патентов [10].



Рис. 3. Известный украинско-российский электротехник Н.Н. Бенардос (1842-1905 гг.), изобретший в 1881 году в России дуговую электрическую сварку металлов [10]

На рис. 4 приведена графическая часть французского патента №363320 от 17 мая 1887 года Н.Н. Бенардоса и С.А. Ольшевского на способ дуговой электросварки металлов "Электрогефест" [10]. В данном патенте было указано, что заявленный способ основан на непосредственном образовании вольтовой дуги между местом обработки металла, составляющим один электрод, и подводимой к этому месту обработки рукояткою, содержащей другой электрод и соединенной с соответствующим полюсом источника элект-

трического тока (см. рис. 4). В описании изобретения было отмечено, что с помощью этого способа сварки могут быть выполнены следующие виды работ: соединение металлических частей между собой, разъединение или разрезка различных металлов на части, производство отверстий и полостей разных форм в металлических изделиях и наплавление металла отдельными слоями [10]. Укажем, что уже к 1888 году способ дуговой электросварки металлов получил большое распространение по всему миру, а имя изобретателя из России Н.Н. Бенардоса стало известным в научных и инженерно-технических кругах за границей. Всестороннее освещение нового технологического процесса сварки металлов в технической литературе и в научно-технических докладах видных учёных и инженеров на зарубежных конференциях также способствовало росту популярности выдающегося изобретения Н.Н. Бенардоса. К середине 1890-х годов электротехнологический процесс сварки металлов нашего соотечественника был внедрён более чем на 100 крупных заводах Западной Европы и США [10].

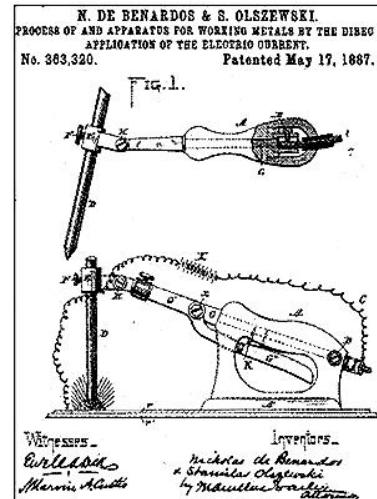


Рис. 4. Чертежи патента Франции № 363320 от 17 мая 1887 года на способ электрической сварки металлов "Электрогефест", выданного Н.Н. Бенардосу и С.А. Ольшевскому [10]

В этот период электросварку начали применять не только для вспомогательных ремонтных работ, но и как основной технологический процесс производства новых металлических изделий. В России дуговую электросварку Н.Н. Бенардоса впервые применили на Кубаевской мануфактуре и машиностроительном заводе в г. Иваново-Вознесенске [10]. В 1888 году способ дуговой электросварки Н.Н. Бенардоса был использован в Рославльских мастерских Орловско-Витебской железной дороги для ремонта паровозных и вагонных колёс, рам, решёток и др. К середине 1890-х годов эффективный способ сварки Н.Н. Бенардоса распространился по всей России. Уже к 1892 году Н.Н. Бенардос разработал электрическую сварку как с угольным, так и с металлическим электродами. Ему принадлежит техническая идея и разработка аппарата для электросварки металлическим электродом на переменном токе, разработка сварки электротоком в струе газа и электросварки наклонным электродом.

Он первым в мире начал применять в активной зоне сварки различные флюсы и закрытую электрическую дугу, а также был основоположником механизации и автоматизации электросварочного процесса [10]. За "удачное применение вольтовой дуги к спаиванию металлов и направлению одного металла на другой" Н.Н. Бенардос 11 мая 1892 года был удостоен высшей награды Русского Технического общества – золотой медали [10]. Н.Н. Бенардос вместе с такими прославившимися российскими изобретателями как А.С. Поповым и А.Н. Лодыгиным 7 декабря 1899 года Санкт-Петербургским электротехническим институтом за особо выдающиеся заслуги в области электротехники было присвоено звание почётного инженера – электрика [10]. При этом сделанная запись в журнале заседаний Ученого совета института гласила [10]: "А.С. Попов, Н.Н. Бенардос и А.Н. Лодыгин заслуживают возвведения в звание почётного инженера – электрика как выдающиеся русские изобретатели в области электротехники, первый – по телеграфированию без проводов, второй – по электрической сварке металлов и третий – по устройству лампы накаливания". В ознаменование 100-летия изобретения электросварки в России в бывшем СССР в 1981 году была выпущена юбилейная почтовая марка (рис. 5).



Рис. 5. Юбилейная почтовая марка СССР, выпущенная в 1981 году к 100-летию изобретения Н.Н. Бенардосом в России электрической дуговой сварки металлов [10]

Практически одновременно с Н.Н. Бенардосом работал другой крупный российский изобретатель – Николай Гаврилович Славянов, много сделавший для развития дуговой электросварки. В 1888 году инженер Н.Г. Славянов (рис. 6) впервые в мире применил на практике дуговую **электросварку** металлическим (плавящимся) электродом **под слоем флюса** [11].



Рис. 6. Известный российский инженер-изобретатель в области электрической дуговой сварки металлов под защитным слоем флюса Н.Г. Славянов (1854-1897 гг.) [11]

Своё изобретение Н.Г. Славянов назвал "Электрической отливкой металлов" (российский патент на него ему был выдан в 1891 году) [11]. Для демонстрации ре-

альных возможностей сварочного аппарата, созданного Н.Г. Славяновым, он прямо перед государственной комиссией, прибывшей из г. Санкт-Петербург в 1888 году на Пермский казенный пушечный завод, сварил восемь несплавлявшихся ранее металлов и сплавов [11]: колокольную бронзу, томпак, никель, сталь, чугун, медь, нейзильбер и оружейную бронзу.

Н.Г. Славянов при выполнении дуговой сварки отказался от громоздкой аккумуляторной электробатареи Н.Н. Бенардоса и впервые применил в качестве источника электропитания разработанную им динамомашину на ток до 1 кА. Он создал первый в мире сварочный электрогенератор [11]. На Всемирной электротехнической выставке в 1893 году в г. Чикаго (США) Н.Г. Славянов за изобретенную им технологию электросварки под слоем флюса (толченого стекла) получил золотую медаль с такой формулировкой [11]: "За произведённую техническую революцию".

В 1901 году выдающийся российский учёный-электротехник, профессор Петербургского политехнического института, будущий академик АН СССР (с 1929 года) Владимир Фёдорович Миткевич (рис. 7) для преобразования переменного электрического тока в постоянный разработал схемы однофазного двухполупериодного выпрямителя (двухполупериодный с двумя обмотками) и трёхфазного однополупериодного выпрямителя (однополупериодный с нулевым выводом) [12]. С учетом результатов этих исследований в 1905 году русский электрофизик В.Ф. Миткевич впервые в мире предложил применить трёхфазную электрическую дугу для сварки различных металлов.



Рис. 7. Выдающийся российский электрофизик, академик АН СССР, лауреат Государственной премии СССР (1943 год) В.Ф. Миткевич (1872-1951 гг.), изобретший в 1905 году в России трехфазную дуговую электросварку металлов [12]

Он показал, что при питании сварочной дуги переменным током новый потенциал между электродами должен подаваться раньше, чем распадается плазма в рабочей зоне. В связи с этим скорость нарастания напряжения источника питания должна была быть больше, чем скорость деионизации дугового промежутка. Предложенные им электрические схемы легли в основу дуговой **электросварки на переменном токе** [12]. Попытку создать удобный метод дуговой электросварки в конце 19-го века предприняли немецкий электротехник Г. Ценерер и будущий основатель в США фирмы "Дженерал электрик" Ч. Коффин. В их методе образовавшаяся дуга между угольными электродами с помощью магнита отклонялась в сторону места сварки металла. Предложенный ими процесс сварки, названный "Электрической паяльной трубкой", был сложен и

поэтому он не нашел применения на практике [13]. В 1927 году украинский изобретатель Д.С. Дульчевский, работавший в Одесских железнодорожных мастерских, используя технические идеи российского изобретателя Н.Г. Славянова, разработал первый автомат для сварки под флюсом [13]. Над проблемой дуговой электросварки оголенным электродом с отдельной подачей флюса к дуге работали как в нашей стране, так и за рубежом. В начале 1930-х годов в США был построен завод по производству сварных труб с помощью автоматической дуговой сварки с использованием флюса. В 1934 году американская фирма "Дженерал электрик" использовала для автоматической сварки оголенной проволокой флюс, предложенный В. Миллером и состоящий из полевого шпата и диоксида титана. Измельченные в порошок компоненты смачивали водой и в виде пасты наносили на изделие перед сваркой. В 1936 году ими был получен патент на способ автоматической дуговой электросварки под флюсом, названный "Юнионмелт". Этим способом сваривали стальные листы толщиной до нескольких десятков миллиметров со скоростью до 10 м/ч. Дуговая электросварка и резание металлов с помощью постоянного и переменного токов стали в наше время одними из самых важных современных технологических процессов. Н.Н. Бенардоса справедливо считают "отцом" или родоначальником дуговой электросварки металлов [3, 10].

Широкому распространению в конце 19-го и начале 20-го веков способа сварки металлов, имеющего в качестве источника их нагрева электрическую энергию, препятствовало ряд объективных причин. Электроэнергия тогда была еще дорогой, а используемое электрооборудование было достаточно громоздким и недостаточно мобильным. Удовлетворительное качество сварных металлоконструкций обеспечивалось высокой трудоемкостью сварочного процесса и необходимостью привлечения к нему кадров высокой квалификации. Поэтому не случайным в это время является поиск и разработка способов соединения и разъединения металлов, основанных на использовании теплоты химических реакций [13]. В 1850 году во Франции С.К. Девиль создал горелку для водородно-кислородного пламени, в которой эти газы смешивались в специальной камере до выхода наружу в зону сварки металлов. Пламя такой горелки имело температуру до 2600 °C и могло расплавить платину, золото и серебро [13]. К 1860 году учеными-химиками был изучен такой новый горючий газ как ацетилен, температура пламени которого в смеси с кислородом достигала до 3200 °C. В 1887 году впервые в мире было произведено прожигание разных отверстий в металле газовым пламенем. В 1895 году французский ученый А. Шателье установил, что ацетиленокислородное пламя (рис. 8) имеет не только высокую температуру, но и не окисляет расплавленное железо. Применение в сварочном деле указанных газов позволило, в конце концов, изобрести **газовую сварку** металлов и сплавов.

Заметим, что в последние годы при выполнении сварочных работ в качестве заменителя ацетилена стал применяться новый вид горючего газа – сжиженный газ МАФ (метилацетиленовая фракция) [13]. МАФ обеспечивает высокую скорость сварки и высокое качество сварочного шва, но требует применения присадочной проволоки типа СВ08ГС или СВ08Г2С с по-

вышенным содержанием марганца и кремния. Газ МАФ удобнее при транспортировке, более безопасный чем ацетилен и в два-три раза дешевле последнего.



а б

Рис. 8. Газовая пайка (сварка) металлов (а) при помощи ацетиленокислородного пламени (б), имеющего на расстоянии 3 мм от своего ядра температуру около 3150 °C [13]

Благодаря высокой температуре пламени сгорания в среде кислорода горючего газа МАФ (до 2930 °C) и высокому тепловыделению (до 20800 ккал/м³), газовая резка с использованием МАФ гораздо эффективнее резки с использованием других газов, в том числе и ацетилена [13]. В настоящее время огромный интерес представляет использование для газопламенной сварки (резки) металлов такого газа как дициан, имеющего очень высокую температуру сгорания в кислороде (до 4500 °C). Препятствием к расширенному применению дициана для сварки и резки металлов является его повышенная токсичность. Эффективность пламени дициана сравнима с вольтовой дугой. Потому, по мнению специалистов, дициан представляет большую перспективу для дальнейшего прогресса в развитии газопламенной обработки металлов [13]. Отметим, что определенную перспективу в развитии газопламенной обработки материалов имеет ацетилендинитрил и его смеси с углеводородами ввиду наиболее высокой температуры их сгорания (до 5000 °C). Сейчас производство газа ацетилендинитрил ограничено, стоимость его высока и поэтому этот газ редко применяется при сварке (резке) металлов [13].

В конце 19-го века при практическом использовании сварки выявилась серьезная проблема, связанная с соединением металлических элементов, имеющих большие площади поперечного сечения (например, рельсов и массивных балок). Электродуговым способом Н.Н. Бенардоса и ацетиленокислородной сваркой за один проход можно было выполнять сварные швы высотой до (3-5) мм. При многослойной сварке в ее швах накапливались металлоструктурные дефекты. Контактная сварка была тогда слабомощной. В 1850-е годы крупным российским ученым-химиком Николаем Николаевичем Бекетовым был открыт новый способ получения металлов путем восстановления их оксидов с помощью алюминия [14]. В своей докторской диссертации "*Исследования над явлениями вытеснения одних металлов другими*" он показал, что шихта из смеси порошков алюминия и оксида железа, засыпанная в тигель и подожженная, горит при температуре в несколько тысяч градусов Цельсия и превращается в железо и шлак. Здесь же он установил, что вместо алюминия можно было использовать магний, а из оксидов можно восстанавливать и такие другие металлы как хром, титан и бор. Дан-

ное физико-химическое явление и было использовано специалистами-сварщиками для создания нового способа соединения металлов, получившего название *термитной сварки* [14]. При этой сварке нагрев соединяемых частей изделия осуществляется энергией, выделяющейся при горении термитной смеси – смеси порошков алюминия (или магния) и оксидов металлов (главным образом железа). В изобретение термитной сварки большой вклад внес такой представитель немецкой научной школы химиков как Г. Гольдшмидт, впервые осуществивший с помощью алюмотермии в 1898 году качественное сварное соединение двух толстых железных брусков [13]. Им же позже за счет применения для холодной термитной шихты запала из пероксида бария был преодолен и основной недостаток алюмотермии – плохая управляемость процесса зажигания термитной смеси. Термитная сварка оказалась наиболее выгодной для соединения металлических деталей с площадью по-перечного сечения более 500 мм^2 [14]. Преимущества термитной сварки (портативность оборудования и технологических приспособлений, возможность соединения крупных металлоготовок на месте и использования полученного изделия сразу после его сварки) были быстро оценены на железнодорожном транспорте при соединении стальных рельсов, поломанных тяг и штоков паровозов [15]. Затем ее начали широко применять в судостроении (при ремонте массивных валов дизельных двигателей, гребных винтов и якорей), машиностроении (при изготовлении крупногабаритных рам, оснований и ступиц) и в других областях техники [16].

2. ДОСТИЖЕНИЯ СССР В СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ

Яркую страницу в советскую историю сварочного дела вписал выдающийся отечественный ученый, академик АН УССР Евгений Оскарович Патон (рис. 9) [17]. До работ в области сварки металлов он являлся известным специалистом по вопросам статики технических сооружений и конструирования железных мостов. К концу 1920-х годов им были сформулированы основные научно-технические принципы расчёта и построения клёпаных металлических мостов [17].

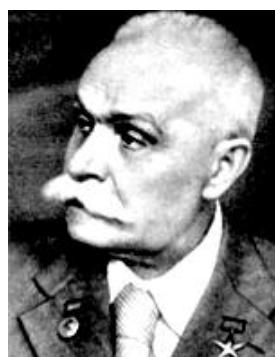


Рис. 9. Выдающийся украинский ученый, Герой Труда (высокое звание присвоено в 1943 году), академик АН УССР (с 1929 года) Е.О. Патон (1870-1953 гг.), стоявший у истоков создания основных технологий сварки металлов в СССР и их внедрение в промышленное производство страны [17]

В 1929 году исследования сварных соединений и металлоконструкций были активно развернуты в г. Москве под руководством профессора Г.А. Николаева и академика АН УССР Е.О. Патона в г. Киеве. Поэтому

этот год можно считать знаменательным в становлении сварочной науки в СССР. В это время в г. Москве организуется автогенно-сварочный техникум, который вскоре преобразуется в учебный комбинат, положивший начало многим кафедрам в Московском высшем техническом училище (ныне в Московском государственном техническом университете) им. Н.Э. Баумана. Тогда же в г. Киеве при АН Украины создается первая электросварочная лаборатория. Ее организатором и руководителем был крупный инженер и ученый в области мостостроения, академик АН УССР Е.О. Патон [17]. Именно с 1929 года Е.О. Патон начинает заниматься вопросами электросварки. В 1934 году указанная электросварочная лаборатория была преобразована в первый в мировой практике научно-исследовательский институт, занимающийся только вопросами сварки – Институт электросварки (ИЭС) АН УССР. Всю свою оставшуюся творческую жизнь он активно посвятил в стенах возглавляемого им ИЭС АН УССР разработке научно-технических основ сварки материалов и внедрению ее в промышленность СССР. В течение 1929-1938 гг. Е.О. Патоном был про-веден ряд исследований прочности и эксплуатационной надёжности сварных металлических конструкций. Именно в этот период он сформулировал основные положения по технологическим основам дуговой электросварки. В период 1941-1943 гг. Е.О. Патон разрабатывает технологию сварки специальных сталей, исследует физические основы горения электрической дуги под защитным флюсом, изучает свариваемость конструкционных металлов, руководит работами по созданию производства сварных труб, промышленных сосудов и машин различного назначения [17]. В тяжелые военные годы под его руководством в оборонную промышленность СССР были внедрены оборудование и технология *автоматической электросварки* специальных сталей, брони танков и корпусов авиационных бомб. Он внёс значительный вклад в наращивание выпуска для фронта танков Т-34 в годы Великой отечественной войны (1941-1945 гг.) за счёт внедрения на танковых заводах страны автоматической дуговой электросварки под флюсом [18]. В 1941 году за разработку нового метода и аппаратуры скоростной автоматической электросварки он был удостоен Государственной (Сталинской) премии. Созданные им автоматы скоростной сварки позволили снизить трудоёмкость изготовления бронированного корпуса и башни танка Т-34 в восемь раз! [17, 19]. Е.О. Патон является автором и руководителем проектов более 100 сварных мостов в СССР, включая и Украину. Среди них один из крупнейших мостов мира – цельносварной мост через реку Днепр в г. Киеве (рис. 10), получивший в народе название "моста Патона".



Рис. 10. Общий вид Киевского цельносварного моста через реку Днепр ("моста Патона"), построенного в 1953 году [17]

В 1932 году видным ученым в области металлургии и сварки металлов (сплавов), будущим академиком АН УССР (с 1945 года) и член-корреспондентом АН СССР (с 1953 года) Константином Константиновичем Хреновым (рис. 11) впервые в мире была осуществлена дуговая **электросварка под водой** [20]. Этот ученый-сварщик, долго проработавший в ИЭС АН УССР (с 1945-1948 гг. и после 1963 года), в историю мировой сварки вошел как создатель технологии электродуговой подводной сварки и резки металлов.



Рис. 11. Известный украинский ученый в области электросварки и резки металлов под водой, академик АН УССР, лауреат Госпремии СССР К.К. Хренов (1894-1984 гг.) [20]

Эта сварочная технология нашла широкое применение особенно в военный период (1939-1945 гг.) при восстановлении крупных железнодорожных мостов и ремонте речных (морских) судов гражданского и военного назначения. Им были разработаны также специальные источники электропитания для дуговой и контактной сварки металлов, эффективные керамические флюсы, электродные покрытия, новые способы холодной сварки металлов повышенным давлением, их газопрессовая сварка и плазменная резка [20]. Отметим, что керамические флюсы К.К. Хренова (их изготавливали из тонкоизмельченных компонент, замешанных на водном растворе жидкого стекла) обеспечивали дополнительное легирование металла сварочного шва марганцем и кремнием за счет вводимых в состав флюса ферросплавов. Широкое внедрение в СССР в дуговую электросварку этих флюсов позволило производственникам в 1950-е годы получать сварочные швы заданного химического состава.

Необходимо отметить, что чем шире в начале 20-го века в промышленность внедрялась дуговая электросварка, тем чаще возникали от нее отрицательные эффекты, настораживающие производственников и эксплуатационников, вызывая с их стороны запреты на применение нового технологического процесса. Трешины в сварочных швах и окколошовной зоне, повышенные напряжения и деформации целых конструкций, изменяющееся и труднопредсказуемое качество изделия при изменении сварочных материалов, ограниченность свариваемых материалов, их толщин и типов соединений, которые можно выполнять при помощи сварки – вот тот неполный перечень проблемных задач, которые требовали своих научных решений. Но сварочная наука тогда еще не сформировалась, а рекомендации и выводы отдельных ученых не всегда принимались во внимание. В большинстве исследовательских и заводских лабораторий мира изучались преимущественно механические

свойства сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, которые характеризовались удовлетворительными значениями предела прочности – от 320 до 400 МПа. Пластические свойства металла шва в сварных соединениях были невысокими (ударная вязкость металла сварных швов при низких и высоких температурах составляла не более 100 кДж/м²) [16]. Опытным путем было установлено отрицательное влияние на механические свойства сварных соединений проведения электросварки при отрицательных температурах окружающей среды. В период 1936-1940 гг. в Западной Европе рухнуло несколько крупных сварных мостов. Стало очевидным, что дальнейшее развитие сварки и полная победа новой технологии металлообработки целиком зависят от науки. Поэтому в СССР и за рубежом стали срочно создаваться сварочные научные центры, в которых начались всесторонние исследования по влиянию различных параметров сварочного процесса на состав и свойства металла сварного шва и окколошовной зоны, позволяющие найти способы управления качеством сварного соединения. Первой в СССР по времени возникновения сложилась научная школа сварки профессора В.П. Вологодина [16]. Диапазон интересов одного из основоположников отечественной сварочной науки был необычайно широк. В лаборатории сварки Дальневосточного университета В.П. Вологдиным и его учениками были разработаны вопросы, относящиеся к технологии дуговой сварки, деформациям и механическим напряжениям металла при этой сварке. Среди решенных задач учеными этой научной школы сварки можно указать [16]: расчетное определение коэффициентов прочности сварных соединений; оценку влияния при сварке пространственного положения деталей на прочность шва; разработку системы обозначений сварных швов на чертежах; разработку методов расчета сварочных деформаций и напряжений в зоне шва и в окколошовной зоне; введение показателей видов сварки плавлением – "коэффициента наплавки" и "коэффициента расплавления".

В военный период 1940-х годов в указанной выше российской лаборатории сварки профессором В.П. Вологдиным были начаты работы по сварке металлов токами высокой частоты (ТВЧ) применительно к стыковой сварке стальных труб (рис. 12) [16]. Использование ТВЧ для сварки подобных труб было основано на проявлении в них одновременно двух электрофизических эффектов – поверхностного и близости [21].

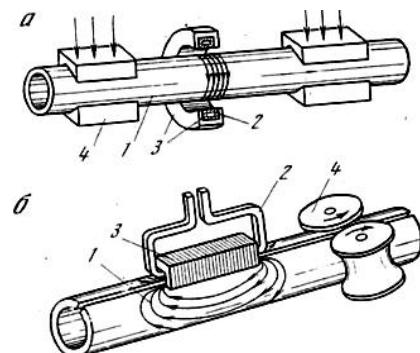


Рис. 12. Схемы поперечной (а) и продольной (б) стыковой сварки труб ТВЧ (1 – свариваемые трубы; 2 – индуктор; 3 – магнитопровод; 4 – устройство для создания давления в зоне сварки; стрелками обозначены направления протекания индукционных токов в свариваемых частях труб) [16]

При высокой частоте электрический ток благодаря поверхностному эффекту проходит лишь по тонкому приповерхностному слою обрабатываемого металла. В связи с чем данный эффект приводит к существенному увеличению активного сопротивления обрабатываемых металлоизделий и позволяет сконцентрировать выделение тепловой (джоулевой) энергии в тонких слоях нагреваемых ТВЧ деталей. Эффект близости при этом позволяет управлять распределением практически противоположно направленных возбуждающего и индукционного высокочастотных токов по металлическим поверхностям и локализовать их джоулев нагрев в строго ограниченной зоне. На основе этих работ в СССР были разработаны методы реализации **высокочастотной сварки** (при частотах тока в сотни кГц) при промышленном производстве электросварных стальных труб. К 1965 году в СССР практически все трубосварочные станы для производства стальных труб малого и среднего диаметров были оборудованы электроустройствами для их высокочастотной сварки [16]. Чуть позже были запущены в эксплуатацию советские станы для сварки ТВЧ алюминиевых и латунных труб и экранирующих оболочек силовых кабелей различной номенклатуры. Отметим, что в 1960-е годы аналогичные работы с применением ТВЧ проводились и в ряде зарубежных стран: США, Франции и ФРГ. В этих странах применительно к высокочастотной сварке были разработаны существующие и до настоящего времени два метода подвода переменного тока – контактный и индукционный [16]. При контактном методе ток подводится с помощью электродов (кондукторов), подключающих свариваемые детали к источнику ТВЧ. Этот метод подвода ТВЧ прост и эффективен, но имеет один серьезный недостаток – наличие подвижного электроконтакта между металлической заготовкой и электродами.

В СССР зародился и такой вид промышленной сварки как **стыковая сварка непрерывным оплавлением** (рис. 13), состоящая из двух стадий – оплавления и осадки [3]. На стадии оплавления заготовки из металла устанавливают в зажимах сварочной машины, медленно сближают их между собой и затем включают электрический ток. В результате электрического взрыва металлических перемычек (микронеровностей) на торцах заготовок (труб) возникает тонкий слой расплавленного металла. После достижения глубинного прогрева и устойчивого оплавления торцов заготовок наступает стадия их быстрой осевой осадки за счет резкого сближения свариваемых заготовок. Мгновенную осадку заготовок начинают при включённом токе и завершают при выключенном [3].



Рис. 13. Общий вид российского оборудования для стыковой сварки стальных труб большого диаметра непрерывным оплавлением, находящегося в цеху Псковского завода по производству труб Ø 1420 мм для нефти-и газопроводов [3]

Стыковая сварка непрерывным оплавлением обеспечивает равномерный прогрев металлоготовок по сечению. Причем, торцы заготовок перед сваркой не требуют тщательной подготовки. С помощью этого вида сварки можно сваривать заготовки с поперечным сечением сложной формы и большой площадью, а также разнородные металлы. Она позволяет получать стабильное качество свариваемых стыков. Существенным преимуществом подобной сварки является возможность сравнительно легко автоматизировать этот технологический процесс в промышленных условиях. Стыковую сварку оплавлением применяют для соединения металлических заготовок сечением до $0,1 \text{ м}^2$. Типичными изделиями для нее являются элементы трубчатых конструкций, колеса, рельсы, железобетонная арматура, листы и трубы большого диаметра.

В 1950-е годы советским токарем-изобретателем А.И. Чудиковым была практически реализована идея по сварке металлических деталей трением [3]. Суть этого процесса весьма проста (рис. 14): одна деталь жестко крепится в неподвижный суппорт, который имеет возможность осевого перемещения, а вторая деталь устанавливается в быстро вращающийся патрон установки. При сближении этих деталей в результате трения одного торца о другой происходит износ их торцевых поверхностей и слои металла разных деталей приближаются друг к другу на расстояния, соизмеримые с размером их атомов [3, 16]. В результате образования и разрушения атомных связей в контактной зоне деталей интенсивно выделяется тепловая энергия, которая нагревает в локальной зоне концы заготовок до температуры ковки. По достижении необходимых технологических параметров вращающийся патрон резко останавливается, а суппорт продолжает по оси давить на него ещё какое-то время. В результате такого технологического процесса образуется неразъёмное соединение. Сварка при этом аналогично кузнецкой сковке происходит в твёрдой фазе.



Рис. 14. Компактное российское оборудование для соосной сварки вращающихся металлических изделий трением [3]

Способ **сварки трением** оказался достаточно экономичным. Автоматизированные установки для сварки трением потребляют электроэнергии в девять раз меньше, чем установки для контактной электросварки. Соединяются детали за считанные секунды и при практическом отсутствии газовых выделений. При подобных условиях получается высокое качество сварки изделий, так как не возникает пористости, включений и раковин в зоне сварки. Данный способ позволяет сваривать разнородные материалы: медь и

алюминий, медь и сталь, алюминий и сталь, в том числе и те, которые невозможно сварить другими способами. При постоянстве технологического режима, обеспечиваемого автоматикой сварочной установки, при данном виде сварки достигается постоянство качества сварного соединения, что позволяет исключить дорогостоящий 100%-ный технический контроль качества сварки деталей. К недостаткам этого способа сварки следует отнести [3]: узкий спектр его применения (свариваются тела вращения встык); диаметры свариваемых деталей от 4 до 250 мм; невозможность применения в непроизводственных условиях.

При обычной электросварке дуга горит свободно в газовой среде между электродом и обрабатываемым изделием. Учеными-электрофизиками было установлено, что если при помощи каких-либо приемов не дать возможность электрической дуге занять свой естественный объем и сжать ее плазменный канал, то температура дуги значительно повышается. Напомним, что плазмой принято считать частично или полностью ионизированный газ [21]. Низкотемпературная плазма газового электрического разряда в зависимости от состава среды характеризуется температурами от 2000 до 50000 °C [16, 21]. Применение плазмы в сварочной технике началось в СССР с середины 1950-х годов после того как для соединения тонколистового металла получила широкое распространение аргонно-дуговая сварка неплавящимся электродом. Эти работы и положили начало **плазменной сварке** металлов. Основным инструментом при плазменной сварке и резке металлов является плазмотрон [16]. В плазмотроне рабочий газ подается в разрядную камеру, внутри которой горит мощная электрическая дуга. За счет теплообмена с этой дугой рабочий газ нагревается, ионизируется и истекает через выходное отверстие камеры (сопло) в виде плазменной струи. Именно подобная плазменная струя и используется в качестве источника интенсивного нагрева свариваемого металла. Небезинтересно, что первые сварочные плазмотроны были сконструированы на базе горелок для аргонно-дуговой сварки. В сварочных плазмотронах истекающая из сопла плазменная струя совмещена со столбом дуги. Поэтому при плазменной сварке и резке теплопередача в обрабатываемый металл осуществляется как путем конвективного нагрева его плазменной струей, так и за счет тепла дуги. Это обеспечивает высокий энергетический КПД данных теплофизических процессов. Применение плазменной сварки и резки в СССР базировалось на результатах исследований, проводимых в Институте металлов им. А.А. Байкова АН СССР под руководством известного ученого-сварщика Николая Николаевича Рыкалина (рис. 15). При плазменной сварке источником теплоты является плазменная струя, получаемая при ионизации рабочего газа в промежутке между электродами. При этом одним из электродов могло быть само свариваемое изделие, либо оба электрода могли находиться в плазменной горелке – плазмотроне, кратко описанном нами выше [3]. Струя плазмы в нем сжимается и ускоряется под действием электромагнитных сил, оказывая на свариваемое изделие как тепловое, так и газодинамическое воздействие. Помимо соб-

ственно резки и сварки, этот способ сейчас часто используется для технологических операций наплавки и напыления материалов [16].



Рис. 15. Известный российский ученый в области плазменной сварки и резки материалов, д.т.н., профессор Н.Н. Рыкалин (1903-1985 гг.) [16]

Процесс плазменной резки основан на использовании воздушно-плазменной дуги постоянного тока прямого действия (электрод – катод, а разрезаемый металл – анод). Сущность процесса заключается в местном плавлении и выдувании из зоны резки расплавленного металла с образованием полости разрезки при перемещении резака относительно разрезаемого металла. Н.Н. Рыкалиным в 1950-е годы были изучены физические и энергетические свойства сжатой дуги в аргоне и определены ее технологические возможности. Им, в частности, было показано, что плазменная струя, вышедшая из плазмотрона, проявляет для металла ярко выраженные режущие свойства. Это обусловило сравнительно высокие темпы развития промышленных разработок оборудования для плазменной резки и позже сварки металлов. На первой стадии развития плазменной резки в качестве плазмообразующего газа использовали аргон [13, 16]. Его применение обеспечивало высокую стойкость вольфрамовых электродов, легкость зажигания электрической дуги и ее низкое напряжение, что было особенно благоприятно для ручного способа плазменной резки. К середине 1960-х годов в СССР были разработаны ручные и механизированные установки, а также технологии для плазменной резки алюминия, меди, латуни и нержавеющей стали. Последующие работы привели к созданию технологического оборудования, в которых использовались более дешевые рабочие среды, а плазмотроны имели более высокую стойкость. Кроме того, были определены области рационального применения рабочих сред при плазменной резке металлов. В качестве рабочих сред плазмотронов наиболее широко стали использоваться такие технические газы как азот, водород, кислород и сжатый воздух [16]. Для применения плазменной струи плазмотронов при сварке металлов специалистам необходимо было решить сложную техническую задачу – при сохранении высокой тепловой мощности столба дуги предстояло уменьшить ее силовое воздействие, которое выдувало металл из сварочной ванны и вызывало неудовлетворительное формирование сварного шва. Научные исследования, активно проводившиеся в СССР и за рубежом, показали, что для решения вышеуказанной проблемной задачи необходимо было

найти рациональное соотношение для основных технологических характеристик процесса плазменной сварки: величины сварочного тока, длины дуги и расхода плазмообразующего газа в плазмотроне [13, 16]. В результате этих исследований было разработано несколько технологических схем процесса плазменной сварки металлов. Для сварки тонколистовых материалов были применены малоамперные дуги, горящие в импульсном режиме. Импульсное введение тепла в металл расширяло область регулирования теплового режима сварки и существенно уменьшало теплоотвод в кромки металла. Для расширения диапазона толщин металла, свариваемого сжатой электрической дугой, применили прием, снижающий эффективность обжатия дуги с одновременным увеличением диаметра плазменного канала в сопле плазмотрона. Это позволило сваривать нержавеющие стали и алюминиевые сплавы толщиной до 10 мм. Здесь следует заметить, что исследования специалистов швейцарских фирм "Сешерон" и "Мессер-Грисхайм" по применению для плазменной сварки металлов малоамперных электрических дуг привели к созданию в 1965 году **микроплазменной сварки** [3, 16]. Для микроплазменной сварки используют малогабаритные горелки с вольфрамовым электродом, рассчитанные на сварочный ток не более 40 А. Данным способом сваривают листы толщиной (0,025-0,8) мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, никелевых сплавов, титана, молибдена, tantalа, вольфрама и золота. Процесс ведется в непрерывном или импульсном режиме. В настоящее время микроплазменная сварка применяется в самолетостроении, атомной, газовой, электронной, медицинской и других отраслях промышленности для изготовления сильфонов, миниатюрных трубопроводов, полупроводниковых приборов и других изделий. Согласно [13] можно считать, что в течение ближайших десятилетий микроплазменная сварка останется одним из основных способов соединения различных деталей из тонких металлов и сплавов.

Выдающимся украинско-российским изобретателем Н.Н. Бенардосом в конце 19-го столетия была высказана идея **сварки в защитном газе** [3, 13]. Первые сообщения о реализации дуговой электросварке металлов в инертном газе неплавящимся вольфрамовым электродом появились за рубежом в начале 1940-х годов. Соблюдая хронологию мирового развития сварочной индустрии, отметим, что 1949 году в ИЭС АН УССР был разработан способ электросварки металлов угольным электродом в углекислом газе [16]. Дуговая сварка в защитном газе основана на вытеснении воздуха из зоны сварки потоком газа. В качестве защитного газа при этом используют как инертные газы (аргон и гелий), так и активные газы (азот, водород и углекислый газ), а также смеси этих газов. В 1952 году советские специалисты К.В. Любавский и Н.М. Новожилов получили положительные результаты по электросварке металлов в углекислом газе плавящимся электродом. В этот период в ИЭС АН УССР при непосредственном участии будущего академика АН УССР (с 1958 года) Бориса Евгеньевича Патона (рис. 16) был разработан процесс электродуговой сварки в защитной атмосфере углекислого газа тон-

кой оголенной проволокой диаметром (0,5-1,2) мм [13]. Для реализации этого нового способа металлообработки в СССР была создана специальная аппаратура для автоматической и полуавтоматической дуговой сварки. В настоящее время имеется много разновидностей дуговой электросварки в защитных газах, которые получили широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Интенсивное развитие электросварки различных металлов в защитных газах объясняется ее рядом преимуществ по сравнению с дуговой сваркой покрытыми электродами [13, 16]: высокая степень концентрации нагрева изделия, позволяющая значительно уменьшить зону термического влияния и коробление изделия после сварки; возможность получения высококачественных соединений из металлов различных наименований и толщин при различной конфигурации сварных швов и разнообразном расположении их в пространстве; высокая производительность и широкая возможность механизации и автоматизации сварочного процесса.



Рис. 16. Выдающийся украинский ученый и общественный деятель современности, дважды Герой Труда, первый Герой Украины, академик и президент НАН Украины в течение последних 50-ти лет Б.Е. Патон (1918 года рождения) [16]

В 1961 году в СССР была разработана **импульсно-дуговая сварка** металлов [13]. Стабильность процесса и равномерное формирование сварочного шва в тонком металле для этого вида сварки обеспечиваются специально разработанной системой поддержания горения электрической дуги. Основная особенность данной сварки заключается в том, что в промежутках между импульсами рабочей дуги в зоне сварного шва поддерживается дежурная маломощная дуга. Ток дуги пульсирует от минимума во время паузы до максимума во время прохождения рабочего импульса. При импульсно-дуговой сварке шов получается путем расплавления отдельных точек металла с заданным перекрытием. За счет регулирования соотношения между уровнями токов рабочего импульса и дежурной электрической дуги можно изменять усадочные явления и улучшать качество формирования сварочного шва.

В начале 1950-х годов в ИЭС АН УССР был разработан прогрессивный метод **электрошлилаковой сварки** металлов [3, 13]. У истоков этого простого и надежного способа соединения толстостенных деталей стоял выдающийся украинский ученый-сварщик, будущий академик АН СССР (с 1962 года) и РАН (с 1992 года) Б.Е. Патон [16]. Этот вид эффективной сварки металлов является одной из разновидностью их соединения плавлением. Он основан на интенсивном выделении тепла при прохождении электротока через жидкий шлак вблизи

металла. За счет этого тепла расплавляются кромки свариваемых деталей и присадочный металл, а также поддерживается высокая температура образующегося в рабочей зоне расплава. Отметим, что впервые электрошлаковую сварку осуществил в конце 1949 года Г.З. Волошкевич, которому в 1956 году было выдано авторское свидетельство СССР на изобретение данного способа соединения металлов [16]. На международной выставке в г. Брюсселе в 1958 году этот вид сварки был отмечен большой золотой медалью "Гран-при" и получил неофициальное название "Русская сварка". Наибольшее применение этот способ сварки металлов получил при изготовлении изделий из austenитных, жаропрочных и других марок стали, титана, алюминиевых сплавов и меди при высоте свариваемого стыка до 100 см [13, 16]. Он широко используется сейчас в мире при изготовлении мощных гидротурбин, прессов, химических реакторов и других уникальных изделий.

Электронно-лучевая сварка материалов основана на использовании тепла, которое выделяется при торможении остросфокусированного потока свободных электронов, ускоренных до высоких энергий [16]. Явление термического воздействия электронных пучков на твердые материалы было известно давно. Однако только благодаря развитию вакуумной техники и электронной оптики этот источник нагрева материала получил широкое применение сначала в сварочной, а затем и в металлургической технике. Изначальным толчком в 1960-е годы к поиску подобного нового вида сварки послужили возникшие трудности при соединении таких широко используемых в атомной и ракетно-космической технике трудносвариваемых металлов как молибден, tantal, ниобий, вольфрам и цирконий, обладающих высокой температурой плавления и химической активностью. Неразъемное соединение указанных металлов требовало высококонцентрированных источников тепла и серьезной защиты рабочей зоны сварки. В конце 1950-х годов в СССР в Московском энергетическом институте под руководством профессора Н.А. Ольшанского и в ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР под руководством известного украинского ученого Б.А. Мовчана независимо от поисковых работ иностранных специалистов (французских и американских инженеров Д.А. Стора, Д. Бриолы, В.Л. Вимена) были проведены отечественные исследования по применению новой технологии электронно-лучевой сварки металлов [3, 13]. При создании сварочных электронных "пушек" были решены многие сложные физико-технические вопросы, которые не возникали ранее в электронном приборостроении. Для сварки металлов потребовались пучки электронов с малыми поперечными сечениями на значительном расстоянии от "пушки" и в условиях их рассеяния на остаточных газах и парах свариваемых металлов. В процессе электронно-лучевой сварки в вакууме порядка 10^{-4} мм рт.ст. обеспечивается практически полное отсутствие примеси вредных газов. Высокая концентрация тепловой мощности и плотности теплового потока в электронном пучке (до $110 \text{ Вт}/\text{см}^2$) при минимальной площади пятна нагрева (до 10^{-7} см^2) способствуют уменьшению термических деформаций металла при его сварке, незначительным структурным превращениям в зоне нагрева и обеспечивают формирование сварочного шва с ярко выраженной "кинжалкой"

формой проплавления металла [16]. Комплексное изучение в ИЭС АН УССР под руководством его директора (с 1953 года), преемника академика УССР Е.О. Патона, академика АН УССР, лауреата Сталинской (1950 год) и Ленинской (1957 год) премий Б.Е. Патона физических основ электротермических процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке, позволило определить рациональные области ее применения в промышленности и создать современное сварочное электрооборудование.

3. СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ СВАРКИ МАТЕРИАЛОВ

Классификация сварки металлов по основным физическим, техническим и технологическим признакам устанавливается требованиями действующего ГОСТ 19521-74 [3]. Что касается физических признаков, то они в зависимости от формы энергии, используемой для образования сварного соединения, подразделяются на три класса [3]: 1) **термический класс** (виды сварки, осуществляемые плавлением с использованием тепловой энергии); 2) **термомеханический класс** (виды сварки, осуществляемые с использованием тепловой энергии и давления); 3) **механический класс** (виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления). К техническим признакам относятся [3]: а) способы защиты металла в зоне сварки; б) непрерывность процесса сварки; в) степень механизации сварки. Технологические признаки устанавливаются по ГОСТ 19521-74 для каждого способа сварки отдельно. Для **термического класса** характерны такие виды сварки материалов [3,16]:

- **Электродуговая сварка.** Источником теплоты здесь является электрическая дуга, возникающая между торцом металлического электрода и свариваемым изделием при протекании сварочного тока в результате замыкания внешней цепи электросварочного аппарата. Для ясности укажем, что сварочной дугой называется длительный мощный электрический разряд в ионизированной среде. Начальная фаза этой среды может быть любой: твердой (например, сварочный флюс); жидкой (например, вода); газообразной (например, аргон); плазменной. При этом выделяющееся тепло нагревает торец электрода и оплавляет свариваемые поверхности, что приводит к образованию сварочной ванны – малого объема жидкого металла. В процессе остывания и кристаллизации сварочной ванны и образуется неразъемное сварное соединение. Основными разновидностями электродуговой сварки являются: ручная дуговая сварка (рис. 17); сварка неплавящимся электродом; сварка плавящимся электродом; сварка под флюсом; сварка в защитном газе.



Рис. 17. Электродуговая ручная сварка покрытым электродом, ставшая широко распространенным видом сварки [22]

- **Газопламенная сварка.** Источником теплоты в этом случае является мощный газовый факел, образующийся при сгорании смеси кислорода и горючего газа (рис. 18). В качестве горючего газа могут быть использованы: ацетилен, МАФ, пропан, бутан, блаугаз, водород, керосин, бензин, бензол и их смеси [3].



Рис. 18. Газовая сварка при помощи факела, образуемого сгоранием ацетилена в среде кислорода (фото 1942 года) [3]

Тепло, выделяющееся при сгорании горючего газа в смеси кислорода, при этом виде сварки металла расплавляет свариваемые поверхности и присадочный материал с образованием сварочной ванны. Пламя может быть окислительным, "нейтральным" или восстановительным (науглероживающим). Все это регулируется соотношением кислорода и горючего газа.

- **Электрошлаковая сварка.** Источником теплоты при этом служит шлак, находящийся между свариваемыми изделиями и разогревающийся проходящим через него электрическим током. Этот вид сварки нашел свое практическое применение особенно при выполнении больших вертикальных сварочных швов для толстостенных металлических изделий [16].

- **Плазменная сварка.** Источником теплоты является сжимаемая и ускоряемая плазменная струя, получаемая при ионизации рабочего газа в промежутке между металлическими электродами плазмотрона.

- **Электронно-лучевая сварка.** Источником теплоты здесь является электронный луч, получаемый за счет термоэлектронной эмиссии с катода электронной "пушки" [3]. Сварка металла ведется в вакуумных камерах при низком давлении порядка ($10^{-3} - 10^{-4}$) Па. Фокусировкой электронного луча можно получать пятно нагрева диаметром от 0,2 мкм до 5 мм, что позволяет за один технологический проход сваривать тугоплавкие металлы толщиной от 0,1 до 200 мм.

- **Лазерная сварка.** Источником теплоты служит лазерный луч, генерируемый оптическим квантовым генератором – лазером [3, 24]. Лазерная сварка производится на воздухе или в среде защитных газов – аргона или углекислого газа. При диаметре луча в 0,1 мм и менее в процессе лазерной сварки объем сварочной ванны оказывается небольшим. Это обеспечивает малую ширину зоны термического влияния, высокую скорость нагрева и охлаждения металла. Характеризуется высокой прочностью сварных соединений и небольшой деформацией сварных конструкций.

- **Стыковая сварка пластмасс оплавлением.** Источником теплоты служит плоский нагревательный элемент [3]. Эта сварка делится на несколько этапов: нагрев под давлением и прогрев массы, вывод нагревательного элемента, сварка и затвердевание массы. Применяется для сварки полиэтиленовых труб [16].

- **Термитная сварка.** Источником теплоты являются химические реакции восстановления оксидов металлов (обычно железа) алюминием или магнием [13]. Применяется при получении сварных соединений для металлических деталей большого сечения [3].

Для *термомеханического класса* характерны следующие виды сварки материалов [3, 16]:

- **Контактная сварка.** Источником теплоты является электрический ток, проходящий через контактное соединение электрода и свариваемого изделия. При контактной сварке происходят два последовательных процесса: вначале нагрев частей свариваемого изделия до пластического состояния и затем совместное пластическое деформирование этих частей. Основными разновидностями этого вида сварки являются: точечная контактная сварка,стыковая сварка, рельефная сварка, диффузионная сварка и шовная (кузнецкая) сварка [3]. Отметим, что такой редкий способ соединения изделий как диффузионная сварка материалов осуществляется путем взаимного проникновения атомов свариваемых частей изделия при их повышенной температуре (около 800 °C). Методом диффузной сварки пользуются при создании соединений из разнородных металлов, отличающихся по своим физико-химическим свойствам, и изготовлении изделий из многослойных композиционных материалов. Этот способ сварки был разработан в 1950-х годах российским изобретателем Н.Ф. Казаковым [16].

- **Сварка высокочастотными токами.** Источником теплоты при данной сварке служит высокочастотный электрический ток, проходящий между свариваемыми частями металлического изделия [3]. При последующем пластическом деформировании частей изделия и остывании образуется сварное соединение.

- **Сварка трением.** История этого простого вида сварки металла в твердой фазе берет свое начало с 1950-х годов, когда российскому изобретателю А.И. Чудикову на обычном токарном станке впервые удалось прочно соединить два стержня из низкоуглеродистой стали (один вращающийся в патроне и другой неподвижно закрепленный в суппорте станка) [3].

Для *механического класса* характерными являются следующие виды сварки металлов [3, 16]:

- **Сварка взрывом.** Этот вид сварки осуществляется сближением атомов свариваемых частей металлического изделия на расстояние действия межатомных сил за счет энергии, выделяемой при взрыве над свариваемым изделием химического взрывчатого вещества [3, 23]. Разработан и практически реализован данный вид сварки металлов был украинскими учеными и изобретателями из ИЭС АН УССР им. Е.О. Патона совместно с российскими учеными из СО АН СССР, руководимыми академиком АН СССР М.А. Лаврентьевым [23]. С помощью данного способа сварки в настоящее время получают биметаллы и уникальные многослойные металлические композиции для объектов ракетно-космической техники [23, 24].

- **Ультразвуковая сварка металлов.** Эта сварка осуществляется сближением атомов свариваемых частей металлического изделия на расстояние действия межатомных сил за счет энергии ультразвуковых колебаний, вводимых в материалы свариваемых частей

[3]. Ультразвуковая сварка, несмотря на высокую стоимость ее оборудования, нашла применение в производстве микросхем, прецизионных изделий, сварке разнородных металлов и металлов с неметаллами [3].

• **Холодная сварка.** Холодная сварка представляет собою соединение однородных или неоднородных металлов при температуре ниже минимальной температуры рекристаллизации [3]. Данная сварка происходит благодаря пластической деформации свариваемых металлов в зоне их стыка под воздействием больших механических усилий. Она может быть стыковой, точечной и шовной. Прочность соединения существенно зависит от усилия сжатия и степени деформации свариваемых металлических деталей [16].

4. УПРОЩЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

При сварке материалов могут использоваться различные внешние мощные источники энергии: электрическая дуга, газовое пламя, высокочастотные токи, трение, ультразвук, механическое сжатие, плазменная струя, электронный луч и лазерное излучение. Указанные источники энергии при сварке материалов предназначаются для создания физических условий, обеспечивающих установление межатомных (межмолекулярных) связей между соединяемыми частями свариваемого технического изделия или биологического объекта. Более подробно возможный механизм установления таких связей на микроскопических расстояниях в соединяемых материалах рассмотрим на примере электродуговой сварки металлов (рис. 19).



Рис. 19. Внешний вид ослепительно яркой рабочей зоны при электродуговой сварке металлов, сопровождающейся радиальным разбрызгиванием мелких капель металла [3]

К электроду и свариваемому изделию для образования и поддержания электрической дуги от сварочного трансформатора подводится электроэнергия. Под действием теплоты электрической дуги, имеющей температуру до 5000 °C [3], кромки свариваемых деталей и электродный металл расплавляются, образуя сварочную ванну, которая некоторое время находится в расплавленном состоянии. В сварочной ванне жидкий металл электрода на атомарном уровне смешивается с расплавленным металлом изделия (основным металлом), а расплавленный шлак всплывает на поверхность ванны, образуя защитную пленку. При затвердевании и кристаллизации металла образуется сварное соединение. Энергия, необходимая для образования и поддержания при этом электрической дуги,

подается от специального источника питания постоянного или переменного тока. В процессе дуговой электросварки могут быть использованы как плавящиеся, так и неплавящиеся электроды. В первом случае формирование сварочного шва происходит при расплавлении самого электрода, а во втором случае – при расплавлении присадочной проволоки или прутков, которые вводят непосредственно в сварочную ванну. Сварка плавящимся электродом является самым распространенным способом сварки. В этом случае дуга горит между основным металлом и металлическим стержнем, подаваемым в зону сварки по мере плавления. При дуговой электросварке плавящимся электродом последний может выполняться оголенным (без защиты зоны сварки от окружающего воздуха), с тонким стабилизирующим покрытием и с толстым защитным покрытием [3]. Стабилизирующие покрытия на сварочных электродах содержат материалы с химическими элементами, легко ионизирующими сварочную дугу. Они наносятся тонким слоем на металлические стержни электролов (тонкопокрытые электроды), предназначенных для ручной дуговой сварки. Толстые защитные покрытия на электродах (толстопокрытые электроды) представляют собой механическую смесь различных материалов, предназначенных для ограждения (защиты) расплавленного металла от воздействия воздуха, стабилизации горения дуги, легирования и рафинирования (очистки) металла сварочного шва. Для повышенной защиты от окисления металла сварочного шва применяются защитные газы (аргон, гелий, углекислый газ и их смеси), подающиеся из сварочной головки в процессе электросварки. Для электродуговой сварки используют как постоянный, так и переменный ток. При электродуговой сварке постоянным током сварочный шов получается с меньшим количеством брызг металла, поскольку нет перехода рабочего тока через нуль и смены его полярности (направления протекания электрических зарядов в дуге). Электрическую дугу, питаемую постоянным током, различают прямой (минус на электроде) и обратной (плюс на электроде) полярности. При электродуговой сварке металлов плавлением КПД создания дуги достигает от 70 до 90 % [3].

5. СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СВАРКЕ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время сварка применяется для взаимного соединения большинства металлов и их сплавов и термопластов во всех областях производства, а также используется в медицине при соединении биологических тканей человека. Открытие в 19-ом столетии и промышленное освоение в 20-ом веке электродугового нагрева металлов, высокотемпературного газо-кислородного горения и плазмотронов с мощными ионными струями наряду с возросшими технологическими требованиями к качеству сварного соединения совершили технологический прорыв в области сварки материалов, в результате которого создались многие технологии бесконтактной сварки. Остановимся вкратце на ряде современных достижений в области сварки материалов, относящихся к концу 20-го века и началу 21-го столетия. К ним можно отнести [3, 16]:

• **Лазерную сварку металлов.** При высокой концентрации световых квантов (порций) энергии на малой поверхности материала можно получать большие значения ее температуры. На этом физическом принципе и основана сварка материалов световым лучом оптического квантового генератора – лазера, впервые созданного в США во второй половине 20-го века [23, 25]. Основными энергетическими характеристиками процесса лазерной сварки являются плотность мощности E_L лазерного излучения и длительность t_L его действия. При непрерывном световом излучении величина t_L определяется продолжительностью времени экспонирования, а при импульсном – длительностью светового импульса. На практике лазерную сварку металла ведут при плотностях мощности E_L излучения лазера, численно составляющих от 10^6 до 10^7 Вт/см² [25]. При $E_L < 10^5$ Вт/см² лазерное излучение теряет свое основное достоинство – высокую концентрацию тепловой энергии. При $E_L > 10^7$ Вт/см² лазерный луч вызывает интенсивное объемное кипение и испарение (сублимацию) металла, приводящее к выбросам металла из зоны сварки и дефектам сварочно-го шва [25]. Варьирование значений E_L и t_L позволяет сваривать лазерным лучом различные конструкционные материалы с толщиной от нескольких микрометров до десятков миллиметров. На рис. 20 приведен общий вид современной установки для лазерной сварки металлических дверей автомобиля [3].

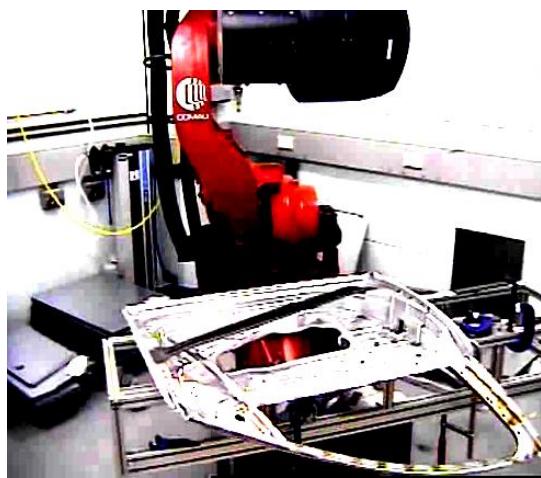


Рис. 20. Российская установка для лазерной сварки стальной металлоконструкции дверей легкового автомобиля [3]

Отметим, что первые установки в СССР для лазерной сварки металлов (типа УЛ-2 и УЛ-20) появились в 1963 году на твердотельном рубиновом лазере с максимальной энергией излучения соответственно 2 и 20 Дж [25]. Эти лазерные установки предназначались для сварки металлов толщиной от 0,1 до 1 мм. В современных технологических лазерах применяются как твердотельные, так и газовые излучатели. В твердотельных лазерах в качестве рабочего тела сейчас используются активные элементы из рубина, стекла с присадками ионов неодима и алюмоиттриевого граната с неодимом. В настоящее время лазерная сварка широко применяется для создания металлоконструкций из сталей различных марок, алюминиевых, маг-

ниевых и титановых сплавов. Ей отдаётся предпочтение при необходимости получения прецизионных конструкций из металла, форма и размеры которых не должны практически изменяться в результате сварки.

• **Сварку в космосе.** Советские эксперименты по сварке в космосе открыли новую страницу в освоении нашей Вселенной. В СССР головной организацией по созданию универсальной переносной установки для выполнения сварочных работ в условиях открытого космоса в конце 1960-х годов был определен ИЭС АН УССР, а научным руководителем всего комплекса данных исследований стал академик АН СССР Б.Е. Патон [13, 26]. После многочисленных исследований в барокамере (рис. 21) и летающей лаборатории на базе самолета Ту-104 в СССР был разработан универсальный ручной инструмент для сварки металлов в космосе. Специалисты остановились на компактном, ранцевом варианте космического сварочного инструмента с автономным источником питания, который мог бы позволить космонавту проводить работы в космосе, связанные с ремонтом или монтажом, на любом участке наружной поверхности космического аппарата.

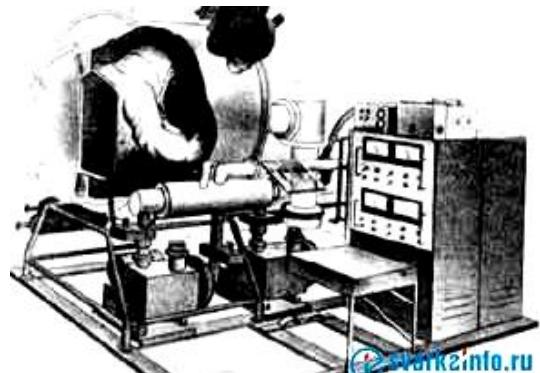


Рис. 21. Фрагмент стенда-тренажера для исследования ручной сварки в условиях, имитирующих космические [13]

В соответствии с программой космических исследований СССР первый в мире эксперимент по сварке в открытом космосе был выполнен 16 октября 1969 года на советском космическом корабле "Союз-6" летчиками-космонавтами Г.С. Шониным и В.Н. Кубасовым [3, 16]. Ими были выполнены сварка и резка тонколистовой нержавеющей стали и титанового сплава электронным лучом, сжатой дугой низкого давления и плавящимся электродом. Кроме того, было показано, что процессы плавления, сварки и резки электронным лучом на орбите протекают стablyнно, обеспечивая необходимые условия для нормального формирования сварных соединений и поверхностей резов. Укажем, что в последнее время дальнейшее развитие получила **плазменная сварка**, где электрическая дуга между неплавящимися электродами плазмотрона используется для высокотемпературного нагрева промежуточного носителя тепла (например, водяного пара) [3, 16]. Проводятся работы по **дуговой электросварке** атомарным водородом, получаемым в дуге между неплавящимися вольфрамовыми электродами, и выделяющим тепло при рекомбинации (соединении) в молекулы на свариваемых деталях [3, 16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Антологія видаючихся досягнений в науці та техніці. Часть 16: Открытия и изобретения в металлургии // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 5. – С. 3-13.
2. <http://www.weldguru.com/welding-history.html>.
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сварка>.
4. <http://www.keytometals.com/page.aspx>.
5. Шнейберг Я.А. Василий Владимирович Петров (1761-1834). – М.: Наука, 1985. – 224 с.
6. Намитоков К.К., Клименко Б.В. Электрическая дуга: 200-летний юбилей великого открытия // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 2. – С. 46-49.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПІ", 2008. – 252 с.
8. http://ru.wikipedia.org/wiki/Петров_Василий_Владимирович.
9. Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель / Научн. ред. Б.Г. Кузнецов. – М.: Типография Б-ки им. В.И. Ленина, 1958. – 436 с.
10. http://ru.wikipedia.org/wiki/Бенардос_Николай_Николаевич.
11. http://ru.wikipedia.org/wiki/Славянов_Николай_Гавrilovich.
12. http://ru.wikipedia.org/wiki/Миткевич_Владимир_Фёдорович.
13. <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/history>.
14. Фролов В.А., Пешков В.В., Коломенский А.Б., Казаков В.А. Сварка. Введение в специальность. – М.: Высшая школа, 2004. – 320 с.
15. Баранов М.И. Антологія видаючихся досягнений в науці та техніці. Часть 15: Изобретение транспорта // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 4. – С. 3-15.
16. Шалимов М.П., Панов В.И. Сварка вчера, сегодня, завтра. – Екатеринбург: Изд-во "UPI", 2006. – 296 с.
17. http://ru.wikipedia.org/wiki/Патон_Евгений_Оскарович.
18. Васильева Л.Н., Желтов И., Чикова Г.Ф. Правда о танке Т-34. – М.: "Атлантида – XXI век", 2005. – 480 с.
19. Патон Е.О. Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса. – М.: Изд-во "Машгиз", 1941. – 112 с.
20. http://ru.wikipedia.org/wiki/Хренов_Константин_Константинович.
21. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
22. http://ru.wikipedia.org/wiki/Дуговая_сварка.
23. Баранов М.И. Антологія видаючихся досягнений в науці та техніці: Монографія в 2-х томах. Том 1.– Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.
24. Резниченко В.И., Пахомов С.Н., Мостипан С.Е. Экспериментально-промышленный комплекс сварки взрывом государственного предприятия "Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля" // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №11 (47). – С. 102-108.
25. <http://www.migatronic.ru/content/view/43/46/>
26. Патон Б.Е., Лапчинский В.Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. – Киев: Наукова думка, 1998. – 184 с.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 16: Otkrytija i izobretenija v metal-lurgii // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – № 5. – S. 3-13. 2. www.weldguru.com/welding-history.html. 3. ru.wikipedia.org/wiki/Svarka. 4. www.keytometals.com/page.aspx. 5. Shnejberg Ja.A. Vasilij Vladimirovich Petrov (1761-1834). – M.: Nauka, 1985. – 224 p. 6. Namitokov K.K., Klimenko B.V. Jelektricheskaja duga: 200-letnij jubilej velikogo otkrytija // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2003. – № 2. – P. 46-49. 7. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Jelektrofizika i vydajushhiesja fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 p. 8. ru.wikipedia.org/wiki/Petrov_Vasilij_Vladimirovich. 9. Vydajushhiesja fiziki mira. Rekomendatel'nyj ukazatel' / Nauchn. red. B.G. Kuznecov. – M.: Tipografija B-ki im. V.I. Lenina, 1958. – 436 p. 10. ru.wikipedia.org/wiki/Benardos_Nikolaj_Nikolaevich. 11. ru.wikipedia.org/wiki/Slavyanov_Nikolaj_Gavrilovich. 12. ru.wikipedia.org/wiki/Mitkevich_Vladimir_Fjodorovich. 13. www.svarkainfo.ru/rus/lib/history. 14. Frolov V.A., Peskov V.V., Kolomenskij A.B., Kazakov V.A. Svarka. Vvedenie v special'nost'. – M.: Vysshaja shkola, 2004. – 320 p. 15. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 15: Izobretenie transporta // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – № 4. – P. 3-15. 16. Shalimov M.P., Panov V.I. Svarka vchera, segodnya, zavtra. – Ekaterinburg: Izd-vo "UPI", 2006. – 296 p. 17. ru.wikipedia.org/wiki/Paton_Evgenij_Oskarovich. 18. Vasil'eva L.N., Zhelтов I., Chikova G.F. Pravda o tanke T-34. – M.: "Atlantida – XXI vek", 2005. – 480 p. 19. Paton E.O. Skorostnaja avtomaticheskaja svarka pod slojem fljusa. – M.: Izd-vo "Mashgiz", 1941. – 112 p. 20. ru.wikipedia.org/wiki/Hrenov_Konstantin_Konstantinovich. 21. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 p. 22. ru.wikipedia.org/wiki/Dugovaja_svarka. 23. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnike: Monoografija v 2-h tomah. Tom 1.– Har'kov: Izd-vo "NTMT", 2011. – 311 p. 24. Reznichenko V.I., Pahomov S.N., Mostipan S.E. Jeksperimental'no-promyshlennyy kompleks svarki vzryvom gosudarstvennogo predpriyatija "Konstruktorskoe bjuro "Juzhnoe" im. M.K. Jangela" // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2007. – №11 (47). – P. 102-108. 25. www.migatronic.ru/content/view/43/46/ 26. Paton B.E., Lapchinskij V.F. Svarka i rodstvennye tehnologii v kosmose. – Kiev: Naukova dumka, 1998. – 184 p.

Поступила (received) 29.06.2012

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

Baranov M.I.
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 17: Inventions in material welding.
A brief scientific essay on the history of invention of the main welding technologies for metals and other materials is presented.
Key words – **history, invention, welding of materials.**

РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ COMSOL MULTIPHYSICS

У статті розглянута методика розрахунку контактного тиску в осіах механічних систем за допомогою пакета програм Comsol Multiphysics.

В статті розглянуто методику розрахунку контактних давлень в осіах механіческих систем при допомозі пакета програм Comsol Multiphysics.

Во многих электромеханических устройствах механические усилия от актуатора к контактам передаются при помощи системы рычагов (рубильники, высоковольтные выключатели, выключатели средних напряжений и т.п.). В этой связи актуальной является задача по расчету и определению характера распределения механических напряжений, как в самих рычагах, так и в областях механического контакта рычагов с осями вращения. Данная задача являются классической задачей теории упругости, которая для неспециалиста достаточно сложна в понимании и расчетах так как оперирует такими понятиями как "тензор" и даже в простых случаях требует решения системы дифференциальных уравнений в частных производных. Решение данного вопроса может быть получено с использованием специализированных прикладных пакетов программ, существенно облегчающих процесс расчета и избавляющие пользователей от необходимости написания и отладки программ.

Одним из таких пакетов программ является расчетный модуль "Structural Mechanics Module", входящий в пакет "Comsol Multiphysics".

Цель данной статьи – показать методику расчета механических напряжений, в том числе и контактных, в указанном пакете программ.

Задача – рассчитать напряжения в простейшем рычажном механизме, показанном на рис. 1.

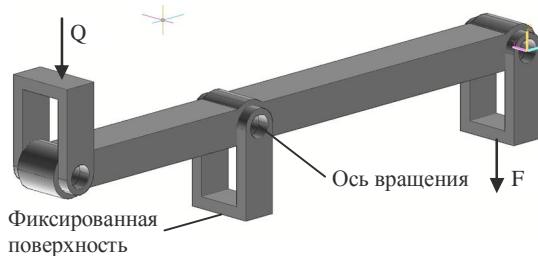


Рис. 1. Рычажный механизм, где F – сила привода; Q – реакция механизма

В статье рассматривается расчет статических напряжений в рычаге в двухмерном плоском варианте, находящемся в равновесии (сумма проекций сил и моменты относительно осей вращения равны нулю).

Решение задачи.

В открытом начальном окне программы необходимо выбрать указанные параметры (рис. 2). После чего откроется окно размещения модели в режиме рисования, который можно установить или отменить при помощи контекстного меню или кнопки быстрого доступа. Данный режим позволяет создавать расчет-

ные модели при помощи инструментов меню Draw, но проще воспользоваться заранее нарисованным объектом и сохраненным в формате dxf.

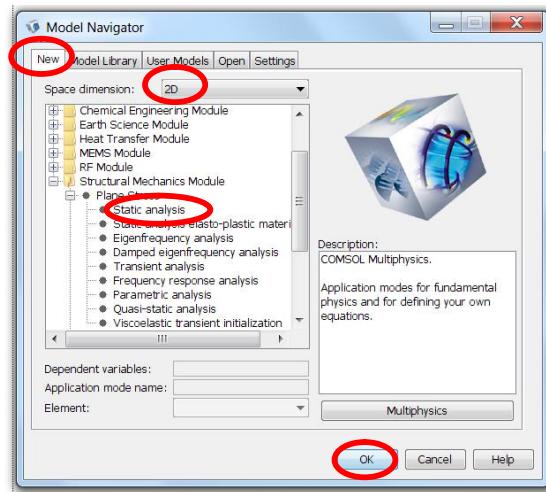


Рис. 2. Окно выбора метода решения задачи

Для вставки объекта выберем команды File/Import/Cad Data From File. Указать место расположения файла и активизировать кнопку Import. Как правило, параметры установленные в окне по умолчанию являются вполне приемлемыми. Результат приведен на рис. 3.

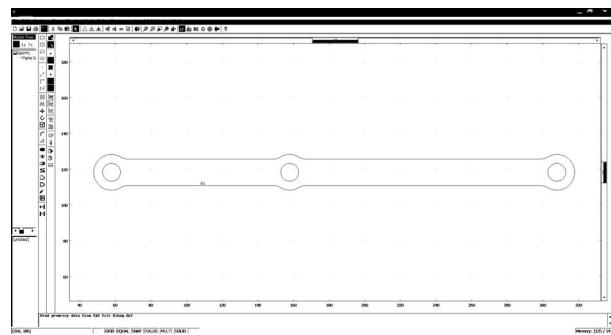


Рис. 3. Окно с расчетным объектом



Рис. 4. Трансформация объекта

Полученный объект является контуром и не может быть использован для расчетов. Превратить объект в области необходимо командой "Coerce to Solid", а затем командой "Split Object" рис. 4. Результатом применения данной команды будет

создание четырех областей – самого рычага и трех осей.

Следующей проблемой является то, что для работы с объектами программы Comsol Multiphysics использует систему СИ, а объект нарисованный в AutoCAD имеет безразмерные параметры. Пусть диаметр осей равен 10 мм, а расстояние между осями 100 мм и 150 мм. В этом случае необходимо привести размеры рычага в соответствие с системой Си, умножив выделенные объекты (Ctrl+A) на масштабный множитель – 1e-3 (рис. 5) и увеличив его размеры до размеров экрана.



Рис. 5. Масштабирование и зуммирование объекта

На этом манипуляции с объектом закончены и можно приступить к заданию постоянных величин и свойств объекта.

Зададимся постоянными величинами: сила $Q=2500$ Н; диаметр осей $Diam=10$ мм; толщина рычага $d=10$ мм. Задание констант происходит в окне Options/Const (переход от столбца к столбцу осуществляется при помощи клавиши Tab). Вид окна с заданными постоянными показан на рис. 6.

Constants		
Name	Expression	Value
Q	$2.5[\text{kN}]$	$2500[\text{N}]$
$Diam$	$10[\text{mm}]$	$0.01[\text{m}]$
d	$10[\text{mm}]$	$0.01[\text{m}]$

Рис. 6. Окно задания констант

Далее программе необходимо "объяснить" характер решаемой задачи (условия контакта рычага и осей). Для этого необходимо следующее.

Первое: выбрать опцию Draw/Create Composite Object и выделить при нажатой клавише Ctr все три оси (рис. 7). Необходимые параметры указаны на рис. 7.

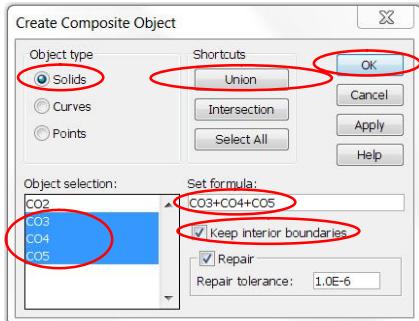


Рис. 7. Объединение областей в одно целое

В результате будут образованы две области – область рычага и область осей, но разграничение областей осталось.

Второе: выберем опцию Draw / Create Pairs и выбрав созданные области и создадим контактные пары (рис. 8). Необходимые параметры указаны на рисунке. Результатом применения этой команды будет появление двойных границ в областях контакта.

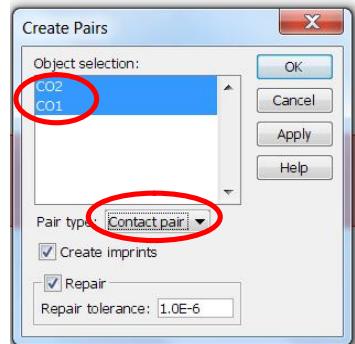


Рис. 8. Создание контактной пары

Далее необходимо задать физические параметры рычага и осей с помощью команд Physics / Sub domain Setting (рис. 9), выбрав материал, загрузив его из библиотеки, а так же установив толщину рычага.

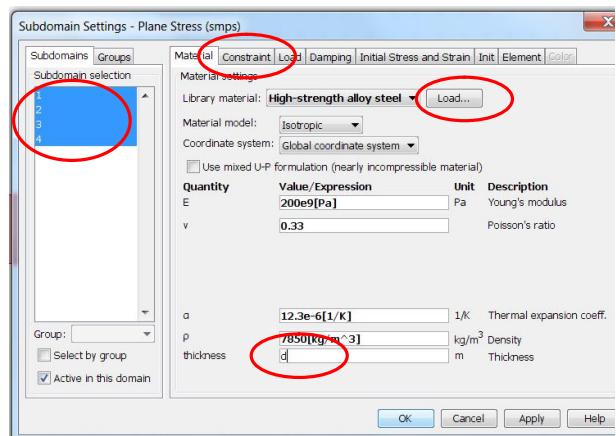


Рис. 9. Задание свойств областей

Для средней оси (ось вращения) на вкладке Constraint установить значение Fixed.

Следующий этап заключается в задании граничных условий на вкладке Physics / Boundary Setting. В окне выделить при помощи клавиши Ctr границы 33,35 левой оси и на вкладке Load задать значение линейной нагрузки (рис. 10).

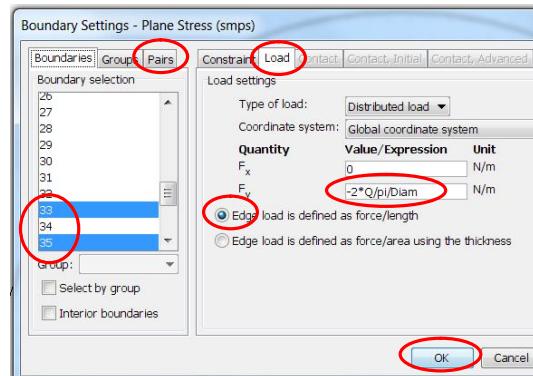


Рис. 10. Задание свойств левой оси

Для центральной оси оставить (границы 37-40) условия заданные по умолчанию – Constraint-Free; Load-0. Для левой оси на вкладке Load для границ 41,43 задать значение $F_y = -2 \cdot Q/\pi/Diam/1.5$ [N/m]. На последнем этапе на этой же вкладке открыть опцию

Pairs, активизировав щелчком мыши параметр Pairs 1. Закрыть окно Boundary. Силы трения в осях не учитываются.

Далее на расчетную область необходимо нанести сетку, открыв вкладку Mesh / Free Mesh Parameters. Для этого на вкладке Subdomain, выделив все области, установить размер сетки $1e-3[m]$. Открыв вкладку Boundary выделить границы 33-44, задав размер сетки $0.1e-3[m]$. Закрыть вкладку Mesh / Free Mesh Parameters (рис. 11).

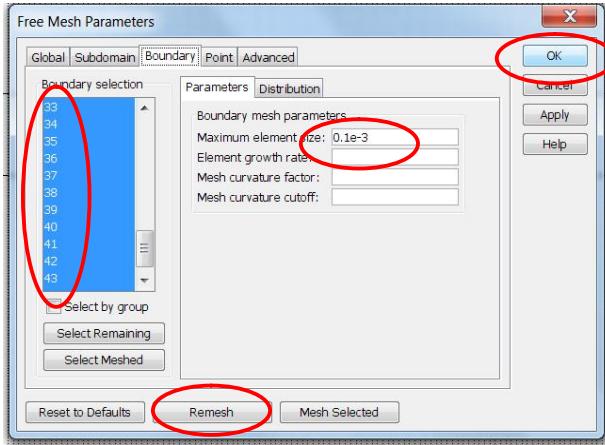


Рис. 11. Расчетная сетка

Размер сетки в значительной мере влияет на точность расчета, объем требуемой оперативной памяти и время счета. При указанных параметрах требуемый объем оперативной памяти порядка 2 ГБ.

Запускаем программу на счет из меню Solve / Solve Problems или кнопкой быстрого доступа. Время счета зависит от густоты сетки и "мощности" ЭВМ и для i5 процессора продолжается порядка минуты.

Результаты расчета будут более наглядней, если после окончания счета выполнить на вкладке Postprocessing / Plot Parameters следующие действия (рис. 12), предварительно убедившись что на вкладке Surface установлены напряжения по Мизесу, а на вкладке Deform масштаб равен единице.

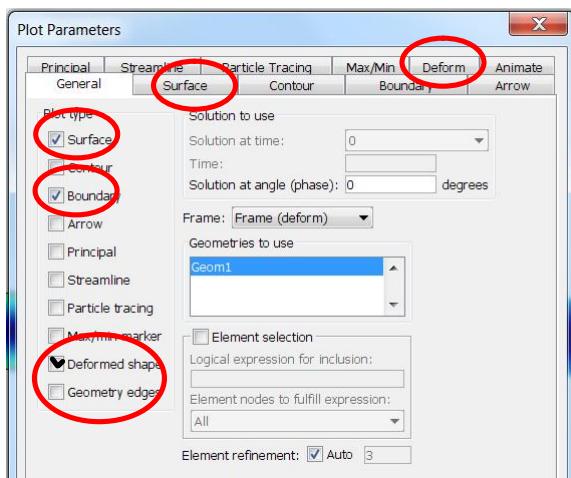


Рис. 12. Окно вывода результатов

Такая установка параметров позволяет оценить реальные значения деформаций рычага.

Результат расчетов приведен на рис. 13, где показаны перемещения рыча и внутренние напряжения. По центру рычага можно заметить нейтральный слой.

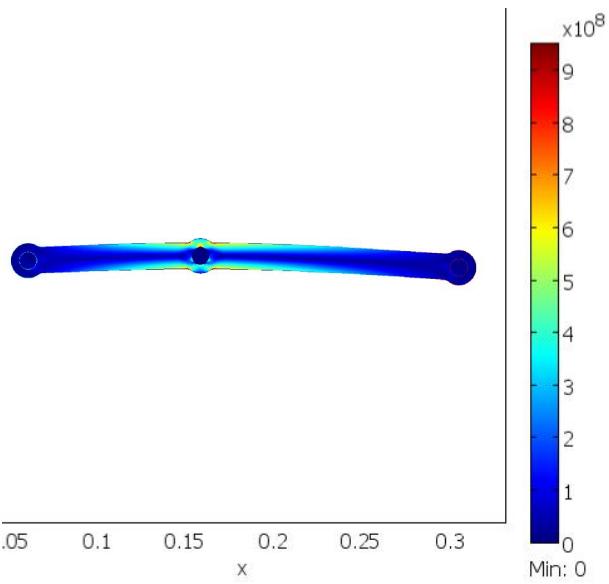


Рис. 13. Напряжения и деформация рычага

Интерес вызывает распределение и значения сил в области контакта рычага с осями. Очевидно, что максимальными эти силы будут в центральной оси. Для отображения графика сил необходимо в меню Postprocessing / Domain Plot Parameters выполнить операции, показанные на рис. 14. Результатом выполнения такой операции будет контактное давление по длине окружности соответствующих осей.

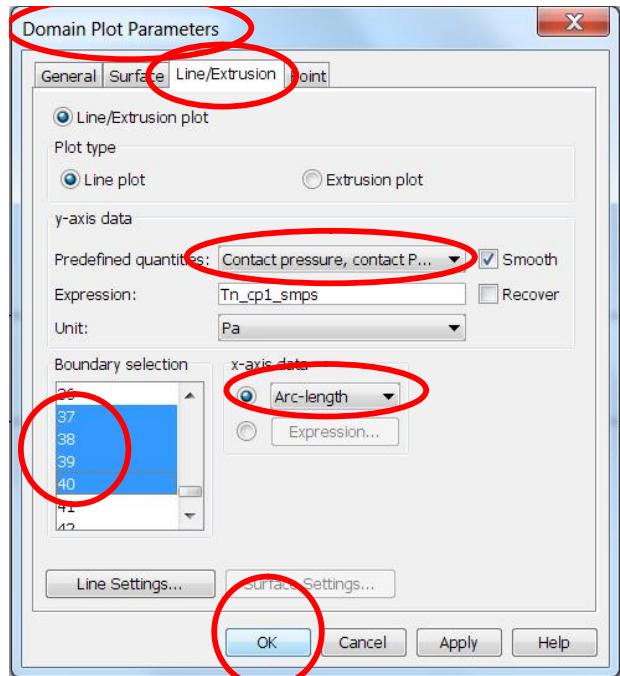


Рис. 14. График контактных сил

Результат такой операции показан на рис. 15.

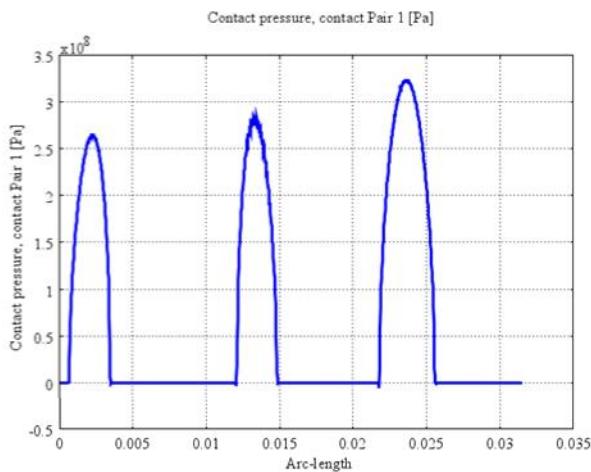


Рис. 15. Распределение контактных давлений в средней оси

Давления на левой и правой оси получаются аналогично (рис. 16).

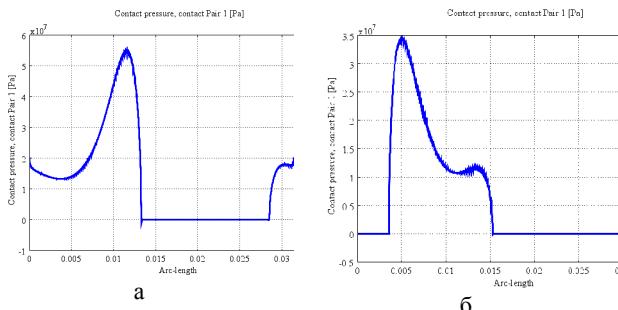


Рис. 16. Распределение усилий по левой а) и правой б) осям

Не гладкость кривых на рис. 15, 16 связана с размером и качеством сетки (не всегда более мелкая сетка даёт более гладкую кривую).

Для того чтобы посмотреть, как распределяются усилия по окружности необходимо выбрать меню Postprocessing / Plot Parameters и выбрать Arrow (рис. 17).

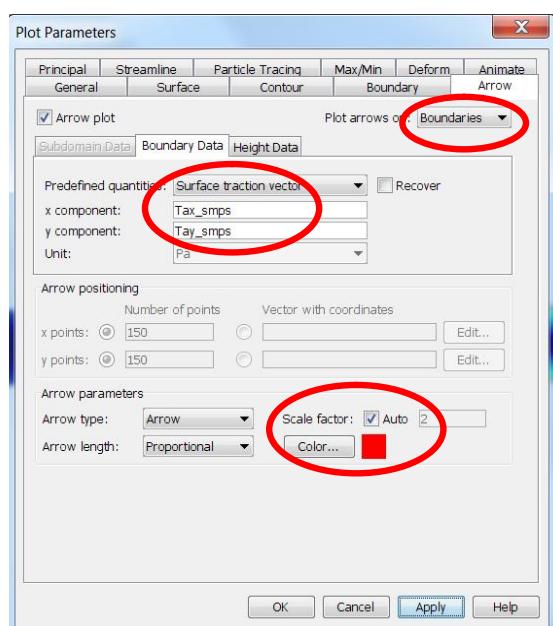


Рис. 17. Распределение усилий по дуге

Результат распределения усилий по длине окружности для центральной оси показан на рис. 18 (поверхностный вектор тяги).

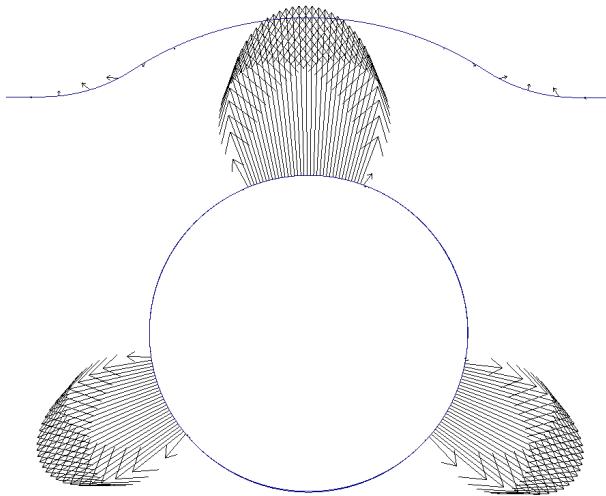


Рис. 18. Картина сил по периметру центральной оси

Аналогичные картины могут быть построены для левой и правой осей (рис. 19), где видно и действие рычага на оси.

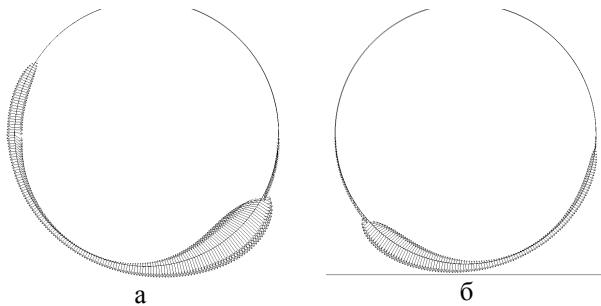


Рис. 19. Картина сил по левой (а) и правой (б) осям

В заключении хотелось бы отметить, что в статье описана малая часть тех функций, которые может реализовать программа, о чем можно судить хотя бы по количеству вкладок окна Postprocessing / Plot Parameters, не говоря уже об окне Postprocessing.

Поступила (received) 12.07.2013

Байды Евгений Иванович, к.т.н., доц.

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт",

кафедра "Электрические аппараты",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone: +38 057 7076976, e-mail: baida_kpi@i.ua

Baida E.I.

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Comsol multiphysics based calculation of contact pressure in mechanical systems.

In the article, a calculation technique for contact pressure in the axes of mechanical systems based on Comsol Multiphysics package is considered.

Key words – mechanical system, contact pressure, calculation technique, Comsol Multiphysics.

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭЛЕМЕНТЫ ТОРЦЕВОЙ ЗОНЫ МОЩНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Разработана полевая математическая модель торцевой зоны мощного турбогенератора типа ТВВ-1000-2УЗ в трехмерной постановке. Выполнено моделирование номинального режима работы турбогенератора. Проведен анализ распределения электромагнитного поля, вихревых токов, а также силы Ампера, возникающей в таких элементах торцевой зоны турбогенератора, как нажимная плита, нажимные пальцы и электропроводящий экран.

Розроблена польова математична модель торцевої зони потужного турбогенератора типу ТВВ-1000-2УЗ у тривимірній постановці. Виконано моделювання номінального режиму роботи турбогенератора. Проведений аналіз розподілу електромагнітного поля, вихрових струмів, а також сили Ампера, що виникає в таких елементах торцевої зони турбогенератора, як натискна плита, натискні пальці і електропровідний екран.

Введение. В статье [1] авторы подняли важную проблему надежности эксплуатации мощных турбогенераторов (ТГ), которые выработали или приблизились к выработке своего рабочего ресурса. В частности, была рассмотрена проблема повреждения, вплоть до разрыва, таких элементов конструкции ТГ, как **стяжные призмы**, обеспечивающие монолитность сердечника статора.

На примере турбогенератора типа ТВВ-1000-2УЗ, эксплуатирующегося на ряде отечественных атомных станций, авторы работы [1] провели достаточно глубокий анализ причин указанных повреждений, а также выдвинули гипотезу о том, что наиболее вероятным и физически обоснованным объяснением этого явления есть усталость материалов при их многоцикловом нагружении осевыми вибровозмущающими силами. Причем, под усталостью материалов понимается – процесс медленного накопления повреждений, образования усталостных трещин, их развития и разрушения [2].

Следует сказать, что данная гипотеза выглядит более убедительной, чем другая, заключающаяся в том, что поломки призм происходят из-за превышения реально действующими на призмы вибровозмущающими силами некоторых допустимых, исходя из свойств материала, значений [3]. При этом вторая гипотеза предполагает, что призма должна выдерживать теоретически неограниченное количество циклических деформирующих воздействий.

Вторая гипотеза, по нашему мнению, является менее убедительной, исходя из следующих соображений. Как известно, ТГ на атомных электростанциях за многие годы своей эксплуатации работают с нагрузкой, близкой к номинальной. При этом и сама нагрузка, и условия эксплуатации ТГ остаются практически неизменными, как и в начале срока эксплуатации, так и по прошествии 10-20 лет работы. Из этого следует, что и величины, и характер распределения вибровозмущающих сил также не должны претерпевать существенных изменений на любом временном этапе эксплуатации ТГ. Очевидно, что если бы была верна вторая гипотеза, то поломки стяжных шпилек произошли бы в самом начале эксплуатации из-за превышения допустимых механических напряжений вследствие, например, неравномерного затягивания шпилек или в любой другой момент времени по иным причи-

нам. В то же время, известен экспериментально установленный факт, что разрушение шпилек статора ТГ начинается после 10 ... 20 лет его эксплуатации [1]. То есть, на лицо некий, достаточно медленный процесс накопления изменений, приводящий к таким результатам.

В работе [1] также выполнены два расчета, имеющих целью определить величину суммарной амплитуды осевых вибровозмущающих сил, действующих на статор ТВВ-1000-2УЗ. Эти два расчета, по сути, представляют собой два различных подхода к определению указанных сил.

Первый подход основан на теории усталостных разрушений и, образно говоря, призван ответить на вопрос: *"Какую величину осевых вибровозмущающих сил с заданной цикличностью нужно приложить к стяжным призмам, чтобы произошел их разрыв?"*. Данный подход широко использует методы статистического анализа и теорию сопротивления материалов. Используя указанный подход, для ТГ типа ТВВ-1000-2УЗ, по которым за более чем 20-ти летний срок их эксплуатации накоплена достаточная статистика подобных поломок, авторами работы [1] была определена величина суммарной амплитуды осевых вибровозмущающих сил, действующих на статор, которая составила **514 кН (52,41 тонны)**. При этом, цикличность воздействий была принята равной $3,153 \cdot 10^{10}$ циклов, что соответствовало частоте воздействия 100 Гц за период времени 10 лет. Физические свойства материала стяжных призм были приняты близкими к свойствам стали марки 45.

Второй подход основан на использовании методов теории электромагнитного поля для математического моделирования вибровозмущающих осевых сил. При этом величина осевых электромагнитных сил, приложенных к элементам торцевой зоны сердечника статора, представляется как взаимодействие магнитных потоков рассеяния от лобовых частей обмоток статора и ротора с индуцированными вихревыми токами в элементах торцевой зоны и крайних пакетов сердечника статора. По сути, речь идет о силе Ампера.

Для реализации этого подхода авторами работы [1] была построена конечноэлементная модель в двухмерной (2D) постановке, позволяющая опреде-

лить указанные осевые силы лишь в крайних пакетах сердечника статора и, частично, в нажимной плите (без учета других элементов торцевой зоны). Полученная в результате такого расчета величина суммарной (на обе стороны) амплитуды осевых вибровозмущающих сил составила **427,7 кН (43,61 тонны)**.

Оба эти подхода имеют свои преимущества и недостатки. При этом оба метода недостаточно точны. Так, как отмечают сами авторы, первый метод не учитывает изменения физических свойств материала призм вследствие их нагрева. Кроме того, призмы изготовлены из нестандартного материала марки ИЗ-1, который по своим характеристикам отличается от стали марки 45, что была принята для расчета по первому методу [1]. Но главным недостатком этого подхода является невозможность однозначного определения величины вибровозмущающих осевых сил. Ведь величина сил в 514 кН получена, исходя из предположения, что разрыв призмы произошел через 10 лет эксплуатации. Однако опыт показывает, что первый разрыв призмы может произойти и на 15-й и на 20-й год эксплуатации. Следовательно и величина амплитуды вибровозмущающих осевых сил, найденная по первому методу, также будет существенно отличаться. При этом, как уже было сказано выше, ТГ работают примерно в одинаковых условиях почти весь эксплуатационный период, то есть, и величина указанных сил должна оставаться практически неизменной.

Этого недостатка лишен второй подход, позволяющий чётко установить величину амплитуды вибровозмущающих осевых сил, действующую на стяжные призмы в номинальном режиме работы ТГ. Однако реализация конечноэлементной математической модели в 2D постановке, как это было сделано в работе [1], в принципе не позволяет получить точный и достоверный результат. Ведь, как известно, распределение электромагнитного поля в торцевой зоне ТГ очень сложное и неоднородное. Это вызвано, прежде всего, её сложной геометрией и наличием множества конструктивных элементов из проводящего материала, в которых протекают индуцированные токи, влияющие свой вклад в искажение поля в этой части ТГ. Очевидно, что в рамках 2D-моделирования учесть всю сложность распределения электромагнитного поля, вычленить осевую составляющую магнитной индукции, вызывающую протекание соответствующих вихревых токов и появление осевой силы Ампера в элементах торцевой зоны ТГ, практически невозможно. Кроме того, авторы работы [1] производили расчет осевых сил главным образом в сердечнике статора, а, точнее, в его крайних пакетах. Однако в торцевой части есть и другие элементы, в которых возникают существенные осевые вибровозмущающие силы. А именно: нажимная плита, нажимные пальцы и электропроводящий экран. Неучёт этих элементов, среди прочего, и привел к тому, что амплитуда осевых вибровозмущающих сил, определенная по второму методу, оказалась на 17 % меньше, чем по первому.

Очевидно, что преодолеть указанную сложность можно только при помощи 3D-моделирования торцевой зоны ТГ.

Таким образом, **целью** статьи является определение амплитуды осевых вибровозмущающих сил в таких элементах торцевой зоны ТГ, как нажимная плита, нажимные пальцы и экран на основе 3D-моделирования методами теории электромагнитного поля.

Объектом исследования был принят тот же тип ТГ, что и в работе [1], а именно ТВВ-1000-2У3 имеющего следующие номинальные данные: мощность $P_{2N} = 1000$ МВт, фазное напряжение питания $U_{1N} = 24$ кВ, число пар полюсов $p = 1$, частота вращения ротора $n_{1N} = 3000$ об/мин.

Программное обеспечение. Для создания 3D-модели торцевой зоны ТГ и проведения соответствующих вычислений использовались сертифицированные программные пакеты SolidWorks 2013 и COMSOL Multiphysics 4.3b.

Математическая модель.

Процесс создания 3D-модели состоит из нескольких этапов.

На первом этапе, с помощью программного пакета автоматизированного проектирования SolidWorks была создана пространственная конструкция объекта исследования – ТГВ-1000-2У3. При этом, для уменьшения сетки конечных элементов и необходимых вычислительных ресурсов компьютера, расчетная область ТГ была уменьшена до размеров торцевой зоны (рис. 1). Также из конструкции были удалены вспомогательные элементы, такие как крепежные детали, элементы системы охлаждения, внешний корпус и др., которые, впрочем, практически не влияют на точность моделирования.

Второй этап начинается с импортирования трехмерной модели в COMSOL Multiphysics, где задаются начальные и граничные условия, свойства материалов и выбирается тип решаемой задачи и соответствующие уравнения.

При этом, для правильного задания граничных условий, импортированная модель торцевой части ТГ была помещена внутри цилиндра, который, впервые, ограничивал расчетную область по трем координатам, а во-вторых – имитировал бесконечное воздушное пространство вокруг расчетной модели с соответствующими граничными условиями (рис. 2).

Модель решалась для статического и квазистатического режима. Для расчета магнитного поля использовалось нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение относительно векторного магнитного потенциала (\vec{A}), которое для квазистатического режима имеет следующий вид:

$$j\omega\sigma \cdot \vec{A} + \nabla \times \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu_0\mu_r} = \vec{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота; σ – электропроводность; ∇ – дифференциальный набла-оператор; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; \vec{A} – векторный магнитный потенциал; $\vec{J}_{\text{стор}}$ – вектор сторонней плотности тока.

На третьем этапе были заданы источники поля – плотности токов в фазах обмотки статора и плотность тока возбуждения в обмотке ротора. Для квазистатиче-

ского режима выражения для фазных значений плотностей тока задавались следующими выражениями:

$$\begin{cases} J_A = J_m \cdot e^{j(\omega t)} \\ J_B = J_m \cdot e^{j\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}, \\ J_C = J_m \cdot e^{j\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)} \end{cases}, \quad (2)$$

где J_m – амплитуда плотности тока фазы обмотки статора.

Поскольку практический смысл имеет моделирование номинального режима работы ТГ, то ротор был повернут так, чтобы ось его магнитного поля образовывала с осью поля якоря угол нагрузки, равный $\Theta = 30^\circ$ эл (реакция якоря – продольно размагничивающая). При этом коэффициент мощности принимался равным $\cos\varphi = 1$.

На четвертом этапе расчетная область разбивается на совокупность объемных конечных элементов, образующих сетку конечных элементов. На рис. 3 представлена сетка объемных конечных элементов модели исследования, которая состоит из 2 млн тетраэдрических конечных элементов. Численное решение модели с таким количеством элементов требует колоссальных вычислительных мощностей компьютера. В нашем случае время вычисления составило 5 суток. Это послужило причиной того, что из моделирования был исключен сердечник статора (учитывался только его крайний пакет).

Результаты расчета. На рис. 4 с помощью изолиний представлено распределение магнитной индукции в торцевой части объекта исследования в статическом режиме. Как видно, распределение магнитного поля имеет весьма сложный характер. В частности, магнитное поле тех участков лобовых частей обмотки, которые находятся ближе к крайнему пакету статора (примерно половина длины вылета лобовой части), ответвляется в крайний пакет, то есть в зону с меньшим магнитным сопротивлением.

Моделирование вихревых токов и вибровозмущающих сил в элементах торцевой зоны проводилось в квазистатическом режиме, имитирующем врачающееся магнитное поле.

Поскольку разные элементы торцевой части имеют разную конструкцию и разные свойства, то они по-разному будут реагировать на разные пространственные составляющие индукции магнитного поля. Так, нажимная плита, экран и нажимные пальцы имеют цельную конструкцию и занимают неподвижное положение в пространстве. Следовательно, все три составляющие (B_x , B_y , B_z) вращающегося относительно них поля лобовых частей статора и ротора со скоростью 3000 об/мин будут создавать свои составляющие вихревого тока. В тоже время пакеты сердечника статора, в том числе и крайние пакеты, имеют шихтованную конструкцию. Следовательно, вихревой ток, приводящий к перегреву этих частей и появлению вибровозмущающих сил, будет создаваться лишь аксиальной (B_z) составляющей индукции поля лобовых частей.

На рис. 6-8 представлено распределение осевой составляющей магнитной индукции (B_x) в отдельных элементах торцевой части (нажимной плите, экране, нажимных пальцах). Как видно, как в нажимной плите, так и в экране, под воздействием вихревых токов, магнитное поле вытесняется ближе к внутренней поверхности элементов. Максимальная величина индукции B_x в нажимной плите составляет 0,4 Тл, в экране – 0,45 Тл, в нажимных пальцах – 0,48 Тл.

На рис. 9-11 представлено распределение модуля вектора плотности тока (цветом) и направления силы Ампера (зелеными стрелками) в элементах торцевой зоны объекта исследования.

Как ожидалось, наибольшие (светлый цвет) значения плотности тока сосредоточены в зоне с наибольшей индукцией, которая, в свою очередь, расположена ближе к проводникам лобовых частей обмотки статора. При этом каждый из элементов торцевой зоны оказывает свое экранирующее действие на магнитное поле в зависимости от его пространственного расположения, физических свойств (магнитная проницаемость и электропроводность) и объема.

Максимальное значение плотности тока, естественно, находится в медном экране, который имеет наивысшую электропроводность, а минимальное – в нажимной плите, которая, напротив, имеет наименьшую электропроводность.

На рис. 9-11 в области ярем четко видны пять темных областей, свидетельствующих о низкой плотности токов в них. Это является результатом экранирующего действия опор нажимной плиты. Причем это действие проявляется не только в экране, примыкающем к плите, но и распространяется вглубь крайнего пакета сердечника статора.

Что же касается сил Ампера, распределение и пространственное положение которых показано на тех же рисунках, то, как уже говорилось выше, направление этих сил меняется циклически с частотой 100 Гц.

Программный пакет COMSOL Multiphysics позволяет найти все составляющие силы Ампера, приложенной к любому элементу путем интегрирования этой силы по объему. Поскольку за разрушение стяжных шпилек в большей степени ответственна осевая составляющая силы, то она представляет наибольший интерес. В табл. 1 приведены значение осевой составляющей (F_x) силы Ампера, приложенной к трем рассматриваемым элементам торцевой зоны.

Таблица 1

Элемент торцевой зоны	F_x , Н	F_x , тонн
Нажимная плита	38514	3,927
Экран	16193	1,651
Нажимные пальцы	2225	0,227
Сумма (на одну сторону)	56932	5,805
Сумма (на обе стороны)	113864	11,61

Таким образом, суммарная величина осевой силы Ампера, действующей на элементы торцевых частей ТГ по обе стороны сердечника статора, составляет 11,61 тонн. Если сложить эту цифру с приближен-

ным значением осевой силы в сердечнике статора, найденной в работе [1] (43,61тонны), то величина суммарной амплитуды осевых вибровозмущающих сил будет составлять **541,6 кН (55,22 тонны)**. Полученное значение близко к найденному по методу, основанному на теории усталостных разрушений (52,41 тонны).

Выводы. Разработанный подход к созданию полевых метаматематических моделей в трехмерной постановке позволяет рассчитывать и анализировать сложные пространственные распределения электромагнитных и тепловых полей, а также электрических токов и потерь, механических сил и других физических величин. Данный подход открывает новые возможности и значительно увеличивает точность математического моделирования и исследования процессов в таких сложных объектах, как торцевые зоны турбогенераторов.

Представленная полевая 3D-модель торцевой зоны ТГ позволила развить и углубить результаты, полученные в работе [1], в частности определить с высокой степенью достоверности величины осевых вибровозмущающих сил в таких элементах торцевой зоны, как нажимная плита, экран и нажимные пальцы. Это, в свою очередь, позволило уточнить значение амплитуды суммарной осевой вибровозмущающей силы, действующей на стяжные призмы. Данную информацию можно применить при расчете вероятности поломок стяжных призм на ТГ типа ТВВ-1000-2У3, а также при разработке новых типов турбогенераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьковский Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – №2. – С. 25-30.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов.– М.: Металлургия, 1965. – 456 с.
3. Демидюк Б.М., Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. О разработке физически содержательного подхода к анализу силовых и энергетических процессов в элементах магнитопроводов электрических машин // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – № 3/2007 (44) Частина 1. – С. 51-55.

Bibliography (transliterated): 1. Vaskosky Y.M., Shumilov Y.A., Shtogrin A.V. Analysis axial forces disturbing vibration in the stator core of a powerful turbogenerator // Electrotechnica i electroenergetika – 2009. – №2. – P. 25-30. 2. Ivanova V.S. The nature of fatigue metals. - Moscow, Metallurgy, 1965. - 456 p. 3. Demidyuk B.M., Vladimir Kuzmin, Shpatenko V.S. About the development of physically meaningful approach to the analysis of power and energy processes in the elements of the magnetic cores of electrical machines // News of Kremenchuk Sovereign polytechnic University Mykhailo Ostrogradsky name - Vipusk 3/2007 (44) Part 1. - P. 51 - 55.

Поступила (received) 23.10.2013

Гайденко Юрий Антонович¹, к.т.н., доц.,
Вишневский Тарас Станиславович¹,
Штогрин Александр Валерьевич²

¹ Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт",
кафедра электромеханики,
03056, Киев, пр. Победы, 37, корп. 20,
тел/phone: +38 044 4068238, e-mail: gaidenko@ukr.net,
taras.vishnevsky@gmail.com

² ОП "Хмельницкая АЭС",
30100, Хмельницкая обл., Нетешин,
тел/phone: +38 03848 623447

Haydenko Y.A.¹, Vishnevskiy T.S.¹, Shtogrin A.V.²

¹ National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine

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

3d-modeling for determination of axial forces acting in elements of the end zone of power turbogenerators.

A field mathematical model of the end zone of a powerful generator type TVV-1000-2U3 in the three-dimensional setting is developed. The modeling of the nominal mode of operation of the turbogenerator is done. The distribution of the electromagnetic field, eddy currents, and the Ampere force appearing in such elements of the end zone of turbogenerator as the pressure plate, push pins and electrically conductive screen.

Key words – end zone of power turbogenerator,
3D-mathematical model of electromagnetic field.

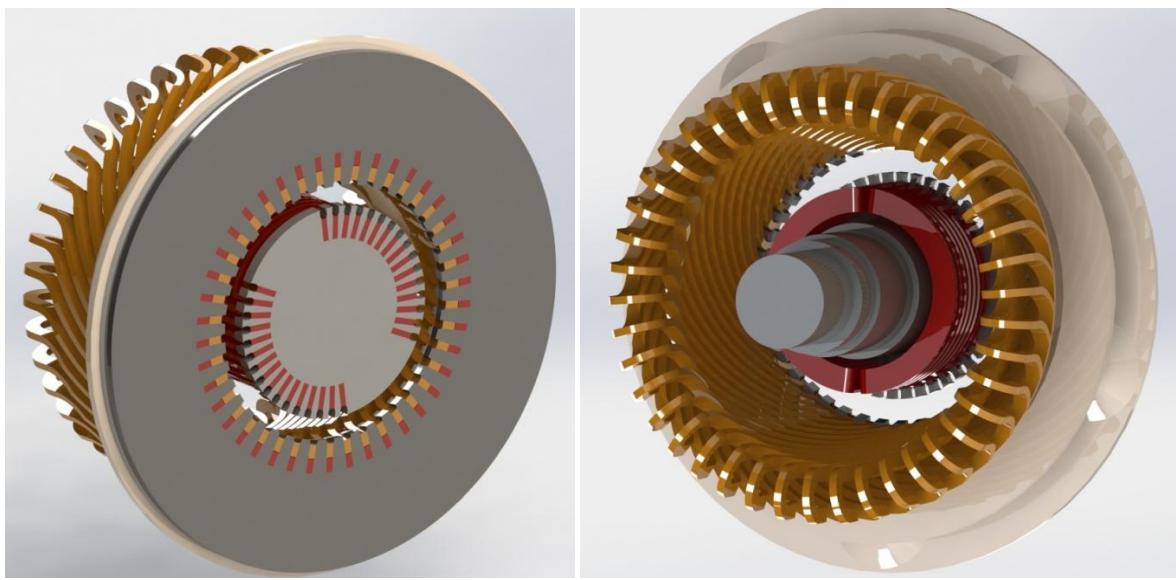


Рис. 1. Конструкция торцевой зоны ТГВ-1000-2УЗ созданная в системе SolidWorks
(а – вид со стороны крайнего пакета; б – вид со стороны выступающего конца вала)

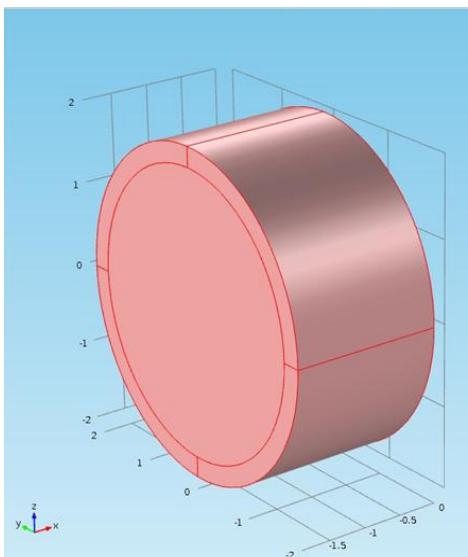


Рис. 2. Расчетная область, ограниченная внешним цилиндром

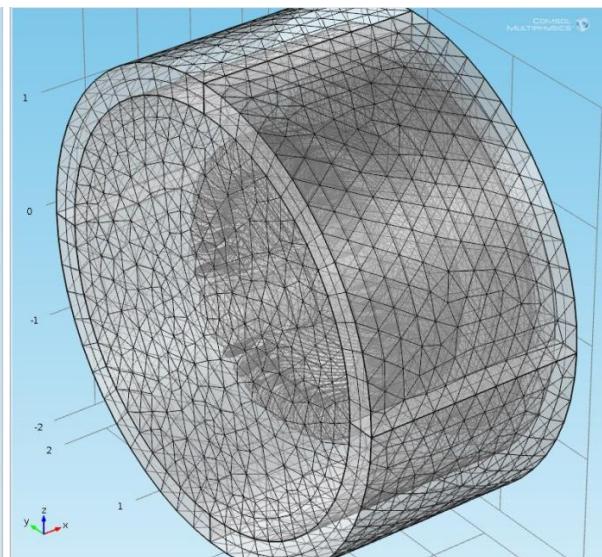


Рис. 3. Сетка тетраэдальных конечных элементов

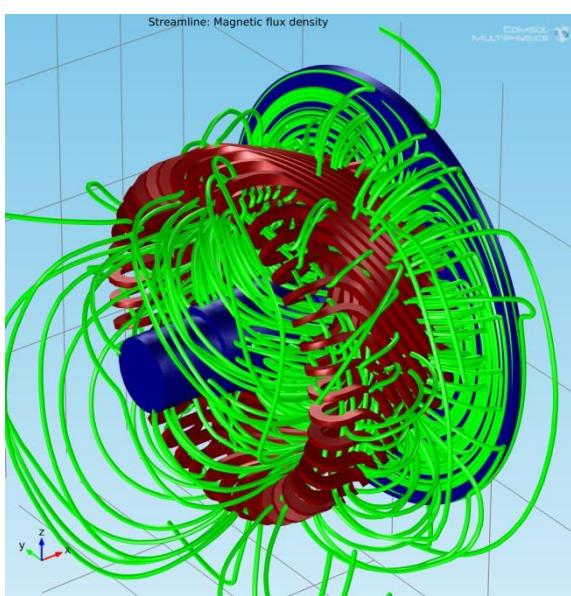
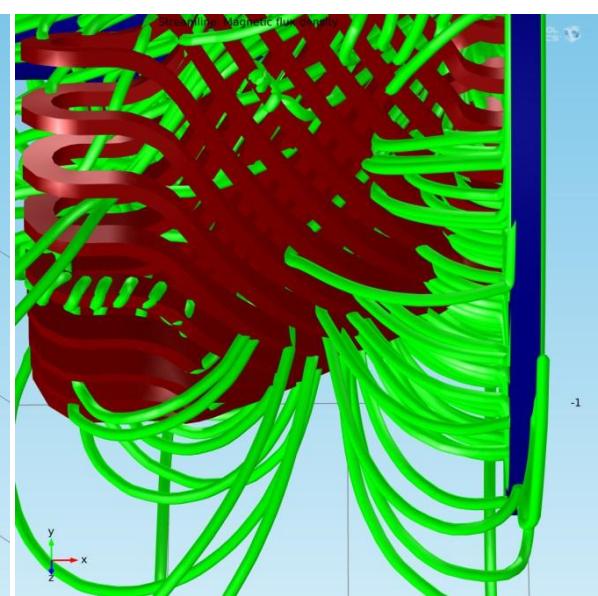


Рис. 4. Распределение магнитной индукции (изолинии) в торцевой части ТГ



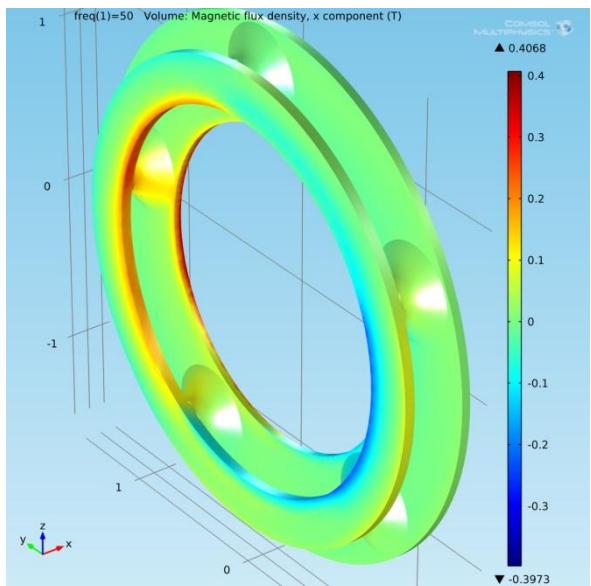


Рис. 6. Распределение B_x в нажимной плите

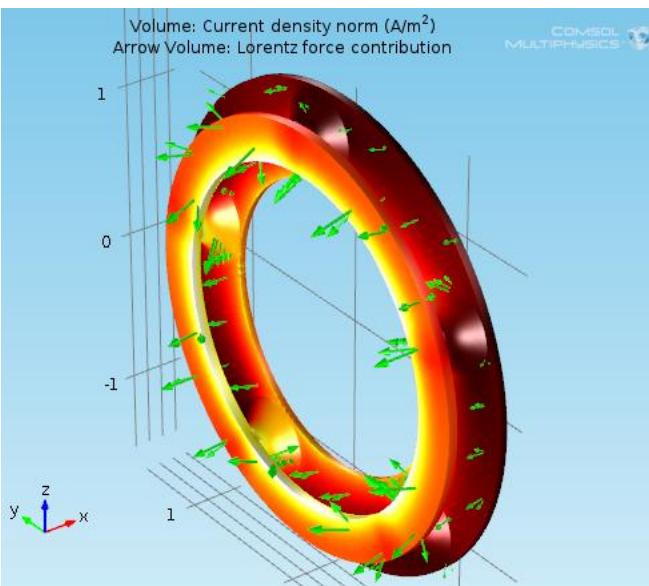


Рис. 9. Распределение плотности тока и силы Ампера в нажимной плите

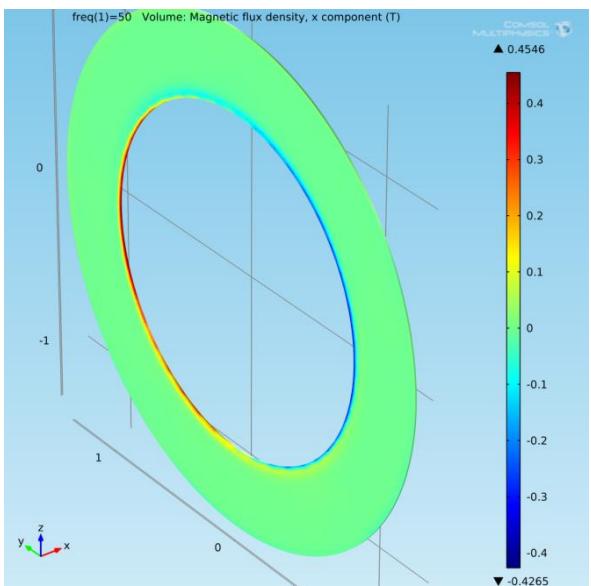


Рис. 7. Распределение B_x в экране

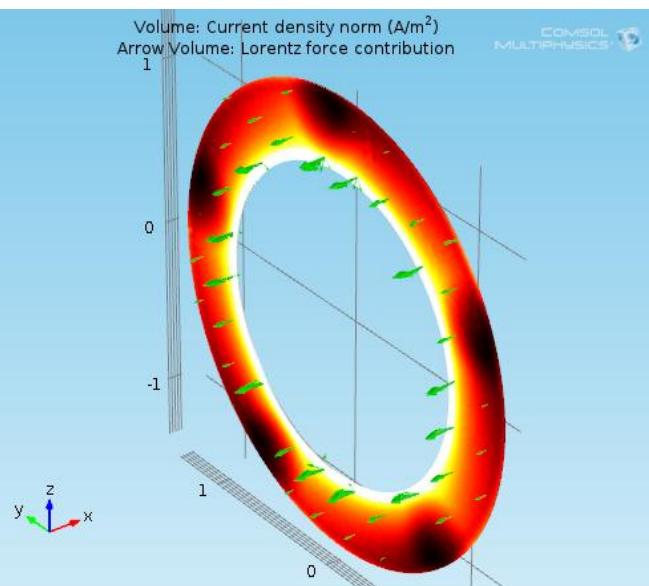


Рис. 10. Распределение плотности тока и силы Ампера в экране

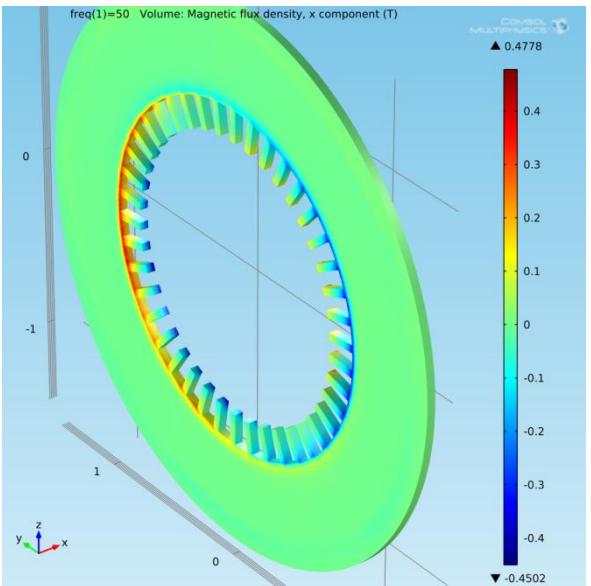


Рис. 8. Распределение B_x в нажимных пальцах (НП)

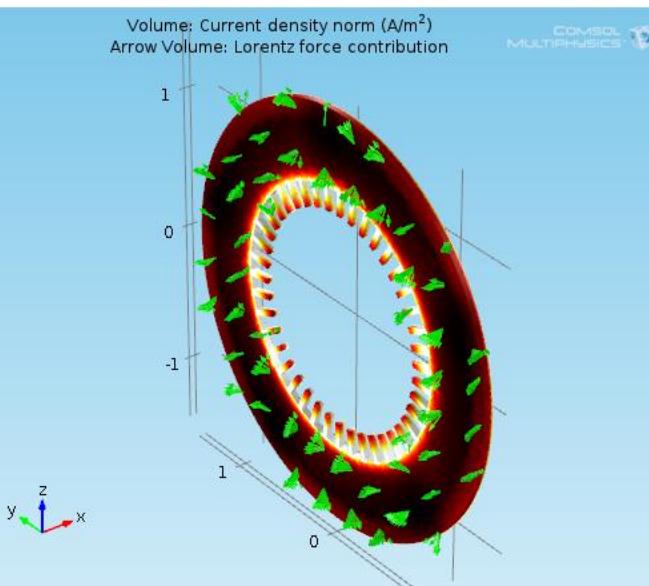


Рис. 11. Распределение плотности тока и силы Ампера в НП

РЕВЕРСИВНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

Приведений аналіз роботи моделей трифазно-однофазних обертових реверсивних тиристорних перетворювачів безконтактних синхронних компенсаторів у системі схемотехнічного моделювання. Показано, що при комбінованому способі управління зустрічно включеними тиристорами можливі короткі замикання якорних обмоток збудників як при упереджуючому, так і при відстаючому куті управління тиристорами. Це необхідно враховувати при розробці систем збудження бесконтактних компенсаторів.

Приведен анализ работы моделей трехфазно-однофазных вращающихся реверсивных тиристорных преобразователей бесконтактных синхронных компенсаторов в системе схемотехнического моделирования. Показано, что при комбинированном способе управления встречно включенными тиристорами возможны короткие замыкания якорных обмоток возбудителей как при упреждающем, так и при отстающем угле управления тиристорами. Это необходимо учитывать при разработке систем возбуждения бесконтактных компенсаторов.

ВСТУПЛЕНИЕ

Одна из важнейших проблем электроэнергетики – регулирование реактивной мощности в электрических сетях, которое, в основном, осуществляется явнополосными синхронными компенсаторами (СК). СК обеспечивают стабилизацию напряжения сети, позволяют с высоким быстродействием кратковременно увеличить до двухкратного номинального значения производство реактивной мощности в динамических режимах. Во всех рабочих режимах система возбуждения обеспечивает подачу токов возбуждения, включая режимы форсировок напряжения возбуждения и развозбуждения с возможностью реверса токов в обмотках при динамических возмущениях в электросистеме. В основном изготавливают бесконтактные СК (БСК). Для увеличения потребляемой реактивной мощности разрабатываются БСК с реверсивными системами возбуждения [2, 4, 6-12].

В работе [2] БСК с реверсивным возбуждением имеет две обмотки возбуждения, подключенные к двум синхронным возбудителям (СВ). Намагничивающая сила (НС) дополнительной обмотки составляет $\approx 15\%$ НС основной обмотки. В работах [6, 7] БСК имеет один СВ и реверсивный мостовой тиристорный преобразователь (ТП). Изменение тока возбуждения СК осуществляется изменением угла управления вращающихся тиристоров по определенному закону. Возможные токи короткого замыкания (КЗ) якорной обмотки СВ при переходе тока нагрузки ТП через нуль ограничиваются реакторами. Основной недостаток БСК [2, 7] – увеличенные вес и габариты.

В работах [8-10, 12] БСК имеет один СВ, токоограничивающие реакторы отсутствуют. Применен трехфазно-однофазный реверсивный ТП. Изменение величины и направления тока нагрузки ТП (тока возбуждения СК) осуществляется изменением величины и направления тока возбуждения СВ.

В работах [1, 8, 10, 12] рассматриваются трехфазно-однофазные реверсивные ТП генераторов, возбуждаемых переменным током, и бесконтактных синхронных машин (БСМ). При изменении ЭДС источника питания по синусоидальному закону реверсивные ТП рассматриваются как непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией и модулированным напряжением (НПЧЕМ). В работах [8, 10] исследования проведены при разных способах управления НПЧЕМ. Показано: при управлении НПЧЕМ по частоте нагрузки и при совместном

управлении тиристорами по частоте заполнения [3] возможны КЗ источника питания; в НПЧЕМ с комбинированным способом управления [5] наилучшее качество формы кривой выходного напряжения [5], при упреждающих углах управления тиристорами можно избежать токов КЗ источника питания. Однако в работах недостаточно раскрыто влияние величины угла управления тиристорами на работу реверсивного преобразователя с комбинированным управлением.

Цель работы: исследование работы трехфазно-однофазного реверсивного тиристорного преобразователя с комбинированным способом управления при широком диапазоне изменения угла управления тиристорами, разработка рекомендаций по его применению в системе возбуждения БСК.

Исследуем преобразователь в системе схемотехнического моделирования Micro Cap (системе МС).

СХЕМА НПЧЕМ

Схема НПЧЕМ показана на рис. 1, где: V_{a1} , V_{b1} , V_{c1} , V_{a2} , V_{b2} , V_{c2} – первый и второй источник питания; $r_a=r_b=r_c=r_i$, $x_a=x_b=x_c=x_i$ – активные и индуктивные сопротивления источника; $T1-T12$ – тиристоры прямого и обратного блоков ТП; R_n , L_n – активное сопротивление и индуктивность нагрузки. В НПЧЕМ применены тиристоры B25RIA120, защищенные RC-цепями.

ЭДС источников питания:

$$\begin{aligned} e_{a1} &= E_{m1} \sin(\omega_1 t); e_{b1} = E_{m1} \sin(\omega_1 t - 120^\circ); e_{c1} = E_{m1} \sin(\omega_1 t + 120^\circ); \\ e_{a2} &= E_{m2} \sin(\omega_2 t); e_{b2} = E_{m2} \sin(\omega_2 t - 120^\circ); e_{c2} = E_{m2} \sin(\omega_2 t + 120^\circ); \end{aligned}$$

где $E_{m1}=E_{m2}$, $\omega_{i1}=2\pi f_{i1}$, $\omega_{i2}=2\pi f_{i2}$.

На вход НПЧЕМ подаются биения напряжений:

$$\begin{aligned} e_a &= e_{a1} + e_{a2} = E_m \sin(\omega_3 t) \cdot \cos \omega_6 t; \\ e_b &= e_{b1} + e_{b2} = E_m \sin(\omega_3 t - 120^\circ) \cdot \cos \omega_6 t; \\ e_c &= e_{c1} + e_{c2} = E_m \sin(\omega_3 t + 120^\circ) \cdot \cos \omega_6 t; \end{aligned}$$

где $E_m=E_{m1}+E_{m2}$, частота биений $f_6=|f_{i1}-f_{i2}|/2$, $\omega_6=2\pi f_6$, частота заполнения $f_3=(f_{i1}+f_{i2})/2$, $\omega_3=2\pi f_3$.

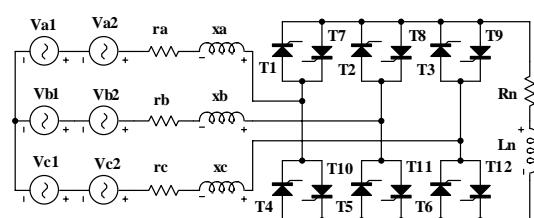


Рис. 1. Электрическая схема модели НПЧЕМ

© А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, Е.А. Ленская

СОВМЕСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НПЧЕМ ПО ЧАСТОТЕ ЗАПОЛНЕНИЯ

Исследуем НПЧЕМ при частоте нагрузки $f_n=f_6=0$. Параметры схемы: $E_{m1}=E_{m2}=55$ В; $f_3=f_1=f_2=138$ Гц; полное сопротивление источника $z_i=1$ Ом; относительная величина активного сопротивления $k_r=r_i/x_i=0$; $R_n=14$ Ом; $L_n=0$. Длительность сигналов управления по частоте $f_u=f_3$ $T_u=120^\circ$.

На рис. 2,а-с показаны зависимости напряжений и токов НПЧЕМ от угла $\theta=\omega_3 t$ при упреждающих углах управления: а) $\alpha_u=15^\circ$; б) $\alpha_u=24,37^\circ$; в) $\alpha_u=24,38^\circ$. Принятые обозначения: e_a, e_b, e_c – ЭДС и токи источников питания (i_i); u_n, i_n – напряжение и ток нагрузки; s_u – сигналы управления тиристорами T_1-T_3 ; γ – угол коммутации. На интервале угла коммутации поочередно включаются прямой и обратный вентили одного плача ТП. Длительность работы обратного вентиля определяется величиной угла α_u . Вентили работают поочередно группами 2-3. Этот режим сохраняется при увеличении α_u до величины угла $\alpha_u=24,37^\circ$, при котором $\gamma = 60^\circ$ (рис. 2,б). При $\alpha_u>24,37^\circ$ $\gamma>60^\circ$, появляются участки КЗ преобразователя с $u_n=0$. Это видно из диаграмм на рис. 2,в, рассчитанных при $\alpha_u=24,38^\circ$. Наибольшие мгновенные величины токов источника (токи КЗ) увеличиваются примерно в 10 раз.

Исследуем НПЧЕМ с параметрами: $E_{m1}=E_{m2}=110$ В; $z_i=3$ Ом; $k_r=0,5$; $R_n=14$ Ом; $L_n=0$; $f_1=134$ Гц; $f_2=142$ Гц; $f_3=|f_1+f_2|/2=138$ Гц; $f_6=|f_1-f_2|/2=4$ Гц; $\alpha_u=18,2^\circ$. Анализ диаграмм напряжений и токов (рис. 2,д) показывает: при $\gamma>60^\circ$ участки КЗ чередуются с участками рабочего режима преобразователя.

КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НПЧЕМ

На рис. 3, 4 показаны временные диаграммы напряжений и токов НПЧЕМ с параметрами: $E_{m1}=E_{m2}=110$ В; $f_1=146$ Гц; $f_2=148$ Гц; $f_3=|f_1+f_2|/2=147$ Гц; $f_6=|f_1-f_2|/2=1$ Гц; $z_i=2$ Ом; $k_r=0,5$; полное сопротивление нагрузки $Z_n=14$ Ом; $\cos\varphi_n=0,9$. Уставка тока нагрузки $i_u=0,5$ А. Напряжения и токи НПЧЕМ (рис. 3) рассчитаны при углах управления: а) $\alpha_u=45^\circ$; б) $\alpha_u=15^\circ$; в) $\alpha_u=5^\circ$; г) $\alpha_u=-5^\circ$. На рис. 4 – фрагменты диаграмм напряжений и токов НПЧЕМ при $\alpha_u=5^\circ$.

Все величины в системе относительных единиц (о.е.), в которой базовыми величинами приняты напряжение холостого хода (х.х.) и ток КЗ выпрямителя:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m = 364 \text{ В} ; I_{dk} = \frac{E_m}{z_i} = 110 \text{ А} ,$$

где $E_m=E_{m1}+E_{m2}=220$ В – наибольшая амплитуда ЭДС источника питания. Все величины в о.е. выпрямителя обозначены нижним индексом (*).

На рисунках: $u_{d0*}=u_{d0}/U_{d0}$, $u_{n*}=u_n/U_{d0}$ – текущие значения напряжений выпрямителя в режимах х.х. и нагрузки; u_{T7*} и u_{T10*} – напряжения на тиристорах Т7 и Т10; a_{ik*} – текущее значение амплитуды тока КЗ источника питания; s_{u_n} и s_{u_o} – сигналы управления тиристорами прямого и обратного блоков ТП.

При индуктивном характере нагрузки НПЧЕМ, комбинированном управлении тиристорами и достаточной величине упреждающего угла управления тиристорами с уменьшением амплитуды ЭДС источника питания поочередно наступают режимы короткого замыкания (КЗ), опрокидывания инвертора (ОИ) и инвертора (И).

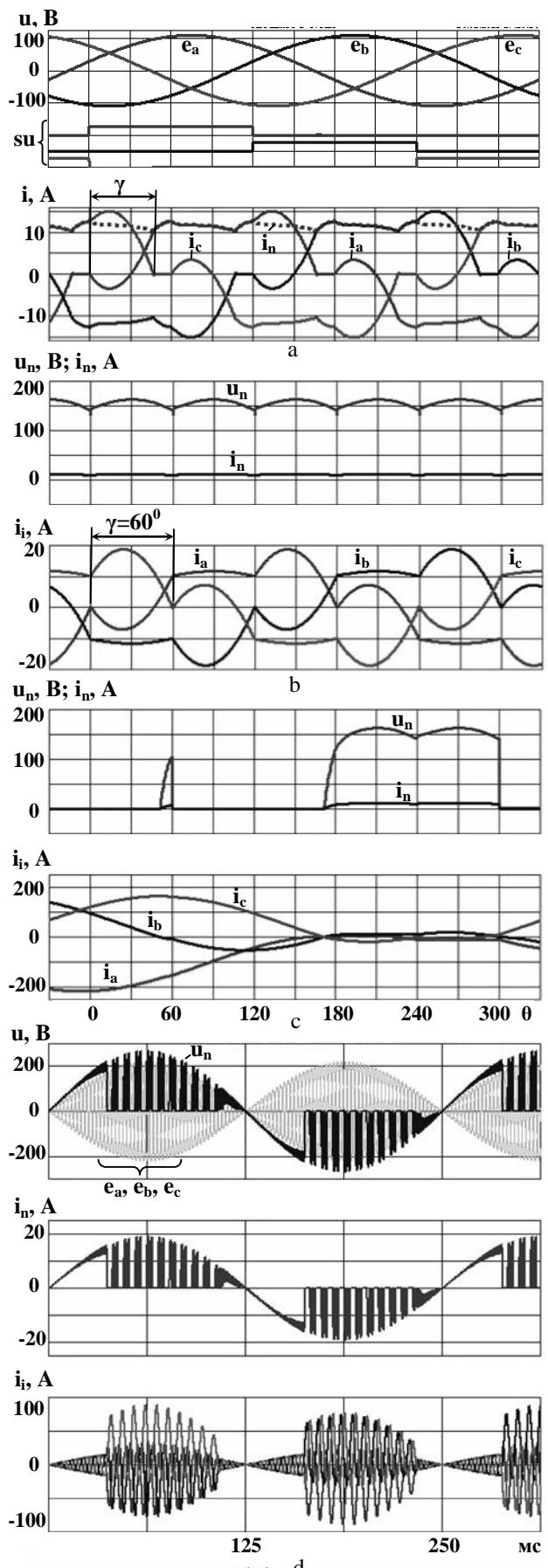


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов НПЧЕМ при управлении по частоте заполнения

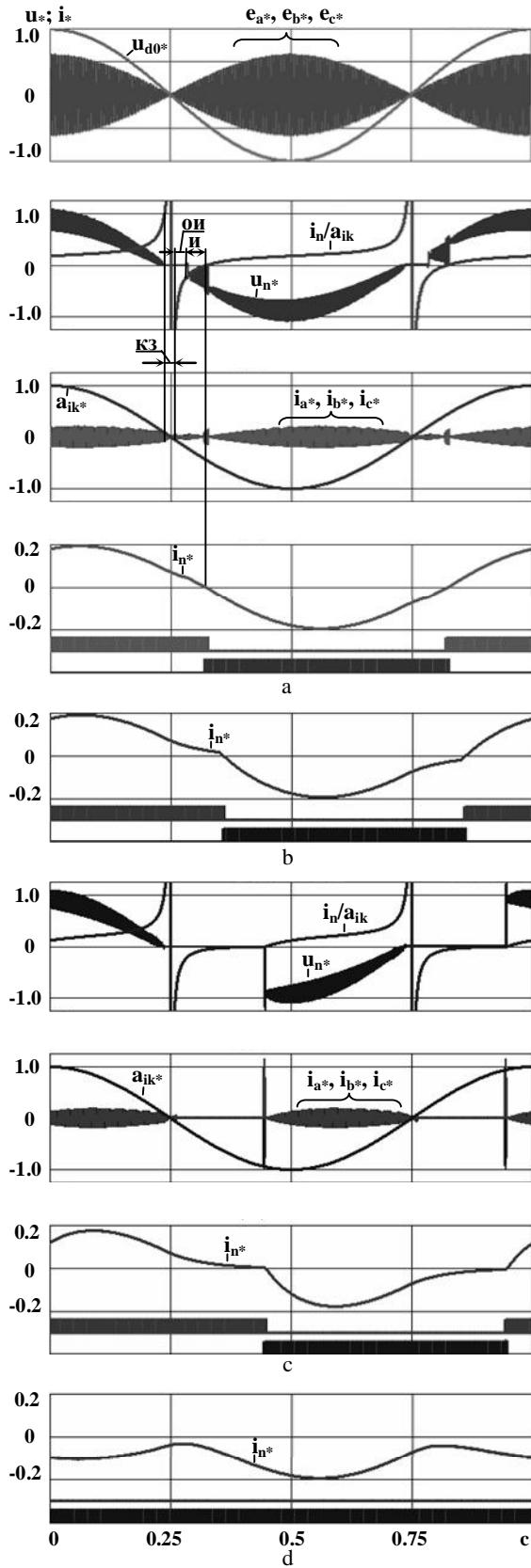


Рис. 3. Диаграммы напряжений и токов НПЧМ при комбинированном законе управления

На рис. 3,а показаны режимы работы НПЧМ при $\alpha_u=45^\circ$. Режим КЗ определяется между точками $i_n/a_{ik}=1$ и $i_n/a_{ik}=-1$. Режимы КЗ и ОИ существенно исказяют форму кривой напряжения u_n^* .

Анализ диаграмм напряжений и токов показывает, что НПЧМ работоспособен при $\alpha_u \approx 50^\circ - 15^\circ$ (рис. 3,а,б).

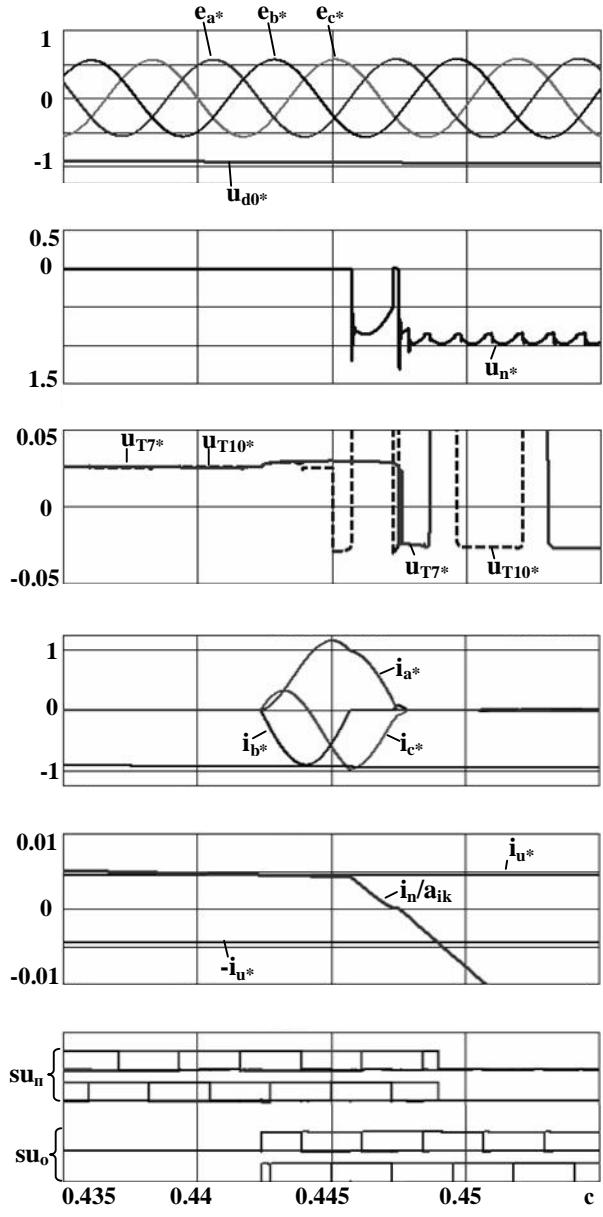


Рис. 4. Фрагменты диаграмм напряжений и токов НПЧМ при угле управления $\alpha_u = 5^\circ$

При сравнительно малых упреждающих углах управления (рис. 3,с и рис. 4) режимы КЗ и ОИ в НПЧМ отсутствуют. Ток нагрузки замыкается через два вентиля тиристорного блока прямой (обратной) проводимости и затухает с постоянной времени нагрузки. Режим КЗ нагрузки затягивается. При $i_n < i_u$ сигналы управления подаются на тиристоры блока обратной (прямой) проводимости, что приводит к кратковременному замыканию источника питания. Это видно из фрагментов диаграмм напряжений и токов НПЧМ на рис. 4, где установка тока нагрузки в о.е. $i_u = i_w/I_{dk} = 0,5/110 = 0,455$. В зоне совместного управления тиристорами величина максимального мгновенного значения тока КЗ источника питания (i_{lmax}) приближается к амплитуде установившегося тока КЗ источника питания, что может привести к повреждению БСК. Токи КЗ существенно зависят от величины со-

противления источника питания и коэффициента форсировки напряжения возбудителя БСК.

При отстающих углах управления тиристорами НПЧЕМ неработоспособен (рис. 3,д).

Таким образом, при комбинированном способе управления, в зоне совместного управления тиристорами принципиально возможны КЗ обмотки якоря возбудителя БСК как при упреждающем, так и при отстающем угле управления.

Результаты исследований могут быть применены при разработке бесконтактных асинхронизированных компенсаторов с двумя и тремя роторными обмотками [11, 12].

ВЫВОДЫ

1. Исследования модели трехфазно-однофазного тиристорного преобразователя БСК в системе схемотехнического моделирования показали: при применении комбинированного способа управления встречно включенными тиристорами в зоне перехода тока нагрузки преобразователя через ноль возможны КЗ якорных обмоток возбудителя как при упреждающем, так и при отстающем угле управления тиристорами, что может привести к повреждению компенсатора.

2. Для обеспечения надежной работы системы возбуждения БСК целесообразно применять контроль состояния тиристоров.

3. Целесообразно провести сопоставительный анализ технико-экономических показателей бесконтактных синхронных и асинхронизированных компенсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брускин Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током. – М.: "Высшая школа", 1974. – 128 с.
- Пекне В.З. Синхронные компенсаторы (конструкция, монтаж, испытания и эксплуатация). – М.: Энергия. 1980. – 272 с.
- А.с. №1104639 А СССР МКИ Н02 Р 13/30. Способ управления тиристорным преобразователем частоты./ А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, В.В. Працюк. Опубл. 1984, БИ № 27.
- Герасименко Ю.Н. и др. Мощные синхронные компенсаторы с бесщеточными системами возбуждения // Электрические станции. – 1984. – № 8. – С. 16-19.
- А.с. №1339821 А1 СССР МКИ Н02 М 5/42. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты. / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак. Опубл. 1987, БИ № 35.
- А.с. №1356130 СССР МКИ Н02 Р 9/14. Синхронная машина с бесщеточной реверсивной системой возбуждения./ Ю.В. Зозулин, Ю.Е. Савельев, В.В. Кузьмин // Опубл. 1987, БИ № 44.
- Кильдишев В.С., Тиристорные бесщеточные возбудители мощных синхронных машин./ В.С. Кильдишев, Г.А. Ковалев, В.В. Кузьмин, Ю.Е. Савельев // Электрические станции. – 1987. – №11. – С. 61-67.
- Галиновский А. М. Исследование моделей трехфазно-однофазных и трехфазно-трехфазных возбудителей бесконтактных машин двойного питания / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, М.А. Цюрила, Е.А. Ленская // Гидроэнергетика Украины. – 2006. – № 4. – С. 36-43.
- Пат. № 22001 У Украины. МКИ Н02Р 9/14: Пристрій реверсивного безщіткового збудження синхронного компенсатора. / О.М. Галіновський, О.О. Ленська, Є.М. Дубчак, Ю.Ю. Савелев // Опубл. 10.04.2007. Бюл. № 4.
- Галиновский А.М. Электрические и эквивалентные схемы, исследование работы трехфазно-однофазных электромашинно-вентильных преобразователей с модулированным напряжением / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, С.В. Коваленко, Е.А. Ленская // Вісник НТУ "ХПІ". – 2008. – №45. – С. 17-35.
11. Антонюк О.В. Асинхронизированные неявнополюсные компенсаторы / О.В. Антонюк, Н.Д. Пинчук // Наука и технологии / Приборостроение. – 15.01.2010 г.
12. Галіновський О.М. Електромашинно-вентильні перетворювачі бесконтактних синхронних та асинхронизованих компенсаторів / О.М. Галіновський, Є.М. Дубчак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 77-80.

Bibliography (transliterated): 1. Bruskin D.Eh. Generatory, vozbuždaemye peremennym tokom. - M.: "Vysshaja shkola", 1974. - 128 s. 2. Pekne V.Z. Sinkronnye kompensatory (konstrukcija, montazh, ispytaniya i ehspluatacija). - M.: Ehnergija. 1980. - 272 s. 3. A.s. №1104639 A SSSR MKI N02 R 13/30. Sposob upravlenija tiristornym preobrazovatelem chastoty./ A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, V.V. Pracjuk. Opubl. 1984, BI № 27. 4. Gerasimenko Ju.N. i dr. Moshnnye sinkronnye kompensatory s besshhetochnymi sistemami vozbuždenija // Ehlektricheskie stancii. - 1984. - № 8. - S. 16-19. 5. A.s. №1339821 A1 SSSR MKI N02 M 5/42. Sposob kombinirovannogo upravlenija tiristornym preobrazovatelem chastoty. / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak. Opubl. 1987, BI № 35. 6. A.s. №1356130 CCCR MKI N02 R 9/14. Sinkronnaja mashina s besshhetochnoj reversivnojj sistemojj vozbuždenija./ Ju.V. Zozulin, Ju.E. Savel'ev, V.V. Kuz'min //Opubl. 1987, BI № 44. 7. Kil'dishev V.S., Tiristorne besshhetochnye vozbuđiteli moshhnykh sinkronnykh mashin./ V.S. Kil'dishev, G.A. Koval'kov, V.V. Kuz'min, Ju.E. Savel'ev // Ehlektricheskie stancii. - 1987. - №11. - S. 61-67. 8. Galinovskij A. M. Issledovanie modelej trekhfazno-odnofaznykh i trekhfazno-trekhfaznykh vozbuđitelej beskontaktnykh mashin dvojnogo pitanija / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, M.A. Cjurila, E.A. Lenskaja // Gidroenergetika Ukrayni. - 2006. - № 4. - S. 36-43. 9. Pat. № 22001 U Ukraina. MKI H02P 9/14: Pristrij reversivnogo bezshkitkovogo zbudzhenija sinkronnogo kompensatora. / O.M. Galinov'skij, O.O. Lens'ka, Є.М. Dubchak, Ju.Ju. Savelcv // Opubl. 10.04.2007. Bjul. № 4. 10. Galinovskij A.M. Ehlektricheskie i ehkvivalentnye skhemy, issledovanie raboty trekhfazno-odnofaznykh ehlektromashinno-ventil'nykh preobrazovatelej s modulirovannym naprijazheniem / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, S.V. Kovalenko, E.A. Lenskaja // Visnik NTU "KhPI". - 2008. - №45. - S. 17-35. II. Antonjuk O.V. Asinkronizirovannyje nejavnopoljusnye kompensatory / O.V. Antonjuk, N.D. Pinchuk // Nauka i tekhnologii / Priborostroenie. - 15.01.2010 g. 12. Galinov'skij O.M. El-ektromashinno-ventil'ni peretvorjuvachi bezkontaktnikh sinkronnikh ta asinkronizovanikh kompensatoriv / O.M. Galinov'skij, Є.М. Dubchak // Visnik Vinnic'kogo politekhnichnogo institutu. - 2012. - № 1. - S. 77-80.

Поступила (received) 15.06.2013

Галиновский Александр Михайлович¹, к.т.н., доц.,
Дубчак Евгений Михайлович¹,
Ленская Елена Александровна²

¹ Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт",
кафедра электромеханики,
03056, Киев, просп. Победы, 37,
тел/phone: +38 044 4068238, e-mail: alga 40@mail.ru

² Отдел НТ политики Департамента технической политики
Национальное агентство Украины по вопросам обеспечения
эффективного использования энергетических ресурсов,
04112, Киев, ул. Ивана Гонты, 1,
тел/phone: +38 044 4564835

Galynovskiy A.M.¹, Dubchak E.M.¹, Lenskaya E.A.²

¹ National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine

² State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine
1, Ivan Gonta Str., Kyiv, 04112, Ukraine

Reversible thyristor converters of brushless synchronous compensators.

Behavior of models of three-phase-to-single-phase rotary reversible thyristor converters of brushless synchronous compensators in a circuit simulation system is analyzed. It is shown that combined control mode of opposite-connected thyristors may result in the exciter armature winding short circuits both at the thyristor feed-forward and lagging current delay angles. It must be taken into consideration when developing brushless compensator excitation systems.

Key words – thyristor converter, synchronous compensators, modeling, analysis.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОЛЫМ ПЕРФОРИРОВАННЫМ РОТОРОМ

Запропоновано методику розрахунку температурного поля поліфункціонального електромеханічного перетворювача з порожністим перфорованим ротором на базі скінченно-елементної моделі взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів.

Предложена методика расчета температурного поля полифункционального электромеханического преобразователя с полым перфорированным ротором на базе конечно-элементной модели взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов.

ВВЕДЕНИЕ

Полифункциональные электромеханические преобразователи (ПЭМП) с полым перфорированным ротором (ППР), относятся к новому классу электромеханических устройств [1]. Основной задачей ПЭМП с ППР является нагрев теплоносителя, температура которого зависит от всех источников тепловой мощности. Поэтому, в отличие от традиционных электрических машин, тепловой расчет ПЭМП не может сводиться к определению только температуры обмотки статора, необходимой для проверки соответствия классу нагревостойкости изоляции. Решение таких задач, как определение значений рабочих температур элементов конструкции, позволит спрогнозировать эксплуатационные характеристики и оптимизировать параметры ПЭМП для получения заданных показателей производительности.

Конструктивно ПЭМП с ППР является жидкостно-кольцевым насосом с двухсторонним подводом, в рабочем объеме которого возникает сложный пространственный поток рабочей жидкости. При этом нагреваемая жидкость выступает как механическая нагрузка для ротора ПЭМП, создаваемая силами вязкого трения, и как охлаждающая среда, которая омывает ППР и отбирает от него теплоту. Вследствие большой сложности гидравлического тракта, а также комплексного воздействия кавитационных и вихревых гидродинамических эффектов параметры потока (скорость, давление и температура) в каждой точке рабочего объема имеют различные значения. Это в свою очередь характеризует сложность идентификации условий охлаждения активной части ПЭМП и существенно затрудняет определение значений коэффициентов теплоотдачи, имеющих первостепенное значение в тепловых расчетах.

Задачей данной работы является расчет температурного поля элементов конструкции ПЭМП с разработкой рекомендаций по оптимизации системы охлаждения и параметров для обеспечения заданных выходных характеристик устройства.

Расчет теплового поля ПЭМП с ППР выполнялся с учетом взаимосвязи с электромагнитным полем, что является особенно важным для асинхронных машин с массивным ротором [2]. Нагрев массивного ротора приводит к существенному изменению конфигурации токонесущего слоя, к изменению плотности тепловыделений и, соответственно, температуры.

Ввиду большой сложности процессов, протекающих в рабочем объеме ПЭМП с ППР, в расчетной модели принимается ряд допущений:

- значения коэффициентов теплоотдачи принимаются средними и определяются в соответствии с критериальными уравнениями, структура которых зависит от режима течения рабочей жидкости и формы сечения канала;

- градиент температуры в продольном сечении ПЭМП отсутствует, а тепловое поле рассматривается в поперечном сечении;

- ввиду того, что инерционность тепловых процессов существенно выше инерционности электромагнитных процессов, влиянием переходных режимов электромагнитного поля пренебрегаем.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПЭМП С ППР

В двумерных декартовых координатах уравнение электромагнитного поля относительно аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала A_z , а также уравнение теплового поля относительно температуры T имеют следующий вид:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 s\gamma(T) \vec{A}_z = -\vec{J}_z, \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = P(A). \quad (2)$$

где ω_1 – угловая частота вращения поля статора; s – скольжение ротора; γ – удельная электрическая проводимость; μ – относительная магнитная проницаемость; \vec{J}_z – вектор плотности тока источника поля; λ , c , ρ – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала; $P(A)$ – удельные тепловые потери.

Уравнение электромагнитного поля решается с использованием роторной системы координат [3] и дополняется граничным условием Дирихле на внешней границе расчетной области ($\vec{A} = 0$) и граничным условием Неймана на границе раздела сред с различными магнитными свойствами ($\vec{B}_{n1} = \vec{B}_{n2}$, $\vec{H}_{t1} = \vec{H}_{t2}$).

По известной функции векторного магнитного потенциала на основании соотношения $B = \text{rot}A$ находятся составляющие вектора магнитной индукции:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, B_y = -\partial A_z / \partial x. \quad (3)$$

Для определения индуцированной в роторе плотности тока используется выражение, вытекающее из первого уравнения системы уравнений Максвелла

$$J_z = (\partial B_y / \partial x - \partial B_x / \partial y) / \mu. \quad (4)$$

Суммарная тепловая мощность ПЭМП рассчитывается по выражению

$$P(A) = J_z^2(A)/\gamma(T) + J_{cstop}^2/\gamma(T) + P_{cl} + P_{kav} + P_{tren} + P_{rez} + P_{mex} + P_{dob}, \quad (5)$$

где P_{cl} – потери в стали статора; P_{kav} – мощность тепловыделений, обусловленных кавитацией; P_{tren} – мощность потерь на трение жидкости в зазоре ПЭМП; P_{rez} – мощность тепловыделений за счет резонансных колебаний; P_{mex} – механические потери на трение в подшипниках; P_{dob} – добавочные потери.

Удельная электрическая проводимость стали ротора $\gamma(T)$ зависит от температуры T в соответствии с выражением

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (6)$$

где γ_0 – электрическая проводимость массива при температуре T_0 ; α – температурный коэффициент.

Поскольку каждой точке массива соответствует свое значение температуры и электропроводности, то итоговая закономерность пространственного распределения тепловых источников будет являться весьма сложной и может быть найдена только с использованием численных методов расчета [2].

Взаимосвязь уравнений электромагнитного и теплового полей проявляется во взаимном влиянии температуры, электропроводности, плотности вихревых токов и удельных тепловых потерь, и отображается в выражениях (1)-(6), численная реализация которых выполнена на базе программного комплекса Comsol Multiphysics 3.5a, позволяющего рассматривать физические свойства материалов как зависящие от температуры. Благодаря идентичности формы математической записи уравнений электромагнитного и теплового поля расчет выполняется с использованием единой сетки конечных элементов, показанной на рис. 1.

Первым программным этапом решения взаимосвязанной задачи является расчет квазистационарного электромагнитного поля, позволяющий определить распределение мощности тепловыделений в роторе и статоре в условиях установленного режима работы ПЭМП. В качестве исходных для расчета электромагнитного поля использовались экспериментальные данные о токах статора и частоте вращения ротора в режиме нагрузки.

Непосредственный учет перфораций ротора в двухмерной геометрии модели не представляется возможным. Поэтому увеличение активного сопротивления ротора вследствие наличия перфораций учитывалось с помощью задания эквивалентной удельной электропроводности для соответствующей расчетной подобласти согласно выражению

$$\gamma_{ekb}(T) = \frac{\gamma(T)}{k_r}, \quad (7)$$

где k_r – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления ротора вследствие введения перфораций.

После расчета электромагнитной задачи данные средствами программы передаются в подчиненную задачу нестационарной теплопередачи для расчета процесса нагрева. Начальными условиями для теплового расчета являются значения температуры внутри расчетной области в начальный момент времени t_0

$$T(x, y, t)|_{t=t_0} = T_0(x, y, t_0). \quad (8)$$

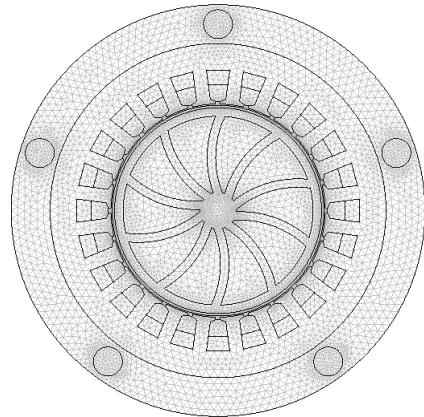


Рис. 1. Конечно-элементная сетка модели

Выбор граничных условий для уравнения теплопроводности (2) обусловлен особенностями охлаждения ПЭМП. Основным видом теплообмена ротора и рабочей жидкости является конвективный теплообмен. Текущая мощность, отдываемая конвекцией рабочей жидкости, определяется в соответствии с законом Ньютона-Рихмана, а на соответствующих границах задается граничное условие третьего рода [4]

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{A, B, C, D, E} = -\frac{k_T}{\lambda} (T - T_0), \quad (9)$$

где k_T – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура охлаждающей среды.

На рис. 2 показан фрагмент расчетной геометрической модели, которая воспроизводит конструкцию ПЭМП в поперечном сечении.

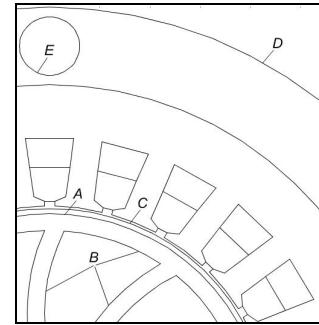


Рис. 2. Задание граничных условий

Граничное условие (9) задается на внешней и внутренней поверхностях ротора A и B , на внутренней поверхности герметизирующей гильзы C , на внешней поверхности корпуса D и на поверхностях E охлаждающих аксиальных каналов. Потери на трение вращающихся деталей о газ или жидкость, которые в действительности выделяются в пограничном слое, принято считать поверхностными и представлять в виде идеализированных источников поверхностного тепловыделения, приписывая им интенсивность q_F , $\text{Вт}/\text{м}^2$. В этом случае граничное условие третьего рода принимает вид

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{A, B, C, D, E} = -\frac{k_T}{\lambda} (T - T_0) + \frac{q_F}{\lambda}. \quad (10)$$

Условия охлаждения большинства частей электрической машины наиболее целесообразно сравнивать с теплоотдачей в каналах, так как поток охлаждающей среды окружен в машине со всех сторон нагретыми стенками [5]. В этом отношении ПЭМП не

является исключением, однако, так же как и каналы электрических машин, каналы ПЭМП отличаются от каналов, которые применяют для измерений коэффициентов теплоотдачи. Рабочая жидкость движется в них с неравномерной скоростью и подвержена турбулентности, что вызвано изменениями сечения и резкими поворотами. Турбулентный характер движения жидкости способствует повышению коэффициента теплоотдачи, поэтому большинство установленных экспериментальным путем величин коэффициентов теплоотдачи должны увеличиваться на так называемый коэффициент "вихреобразования" [5].

С целью определения коэффициентов теплоотдачи проводились многочисленные теоретические и экспериментальные исследования. Покажем некоторые подходы (выражения) для определения приближенных значений коэффициентов теплоотдачи, которые использовались в численных расчетах теплового поля ПЭМП при задании граничных условий третьего рода (9, 10).

На внешней поверхности корпуса D согласно опытным данным с герметически закрытыми машинами и масляными трансформаторами (при естественном охлаждении через теплопроводность и конвекцию в воздухе) задается значение коэффициента теплоотдачи $k_T \approx 8 \text{ Вт}/(\text{°C} \cdot \text{м}^2)$. Для расчета значения коэффициента теплоотдачи на поверхности аксиальных каналов E статора может использоваться ряд известных выражений, позволяющих определить средний коэффициент теплоотдачи в круглом канале при турбулентном режиме течения. Среди них наиболее часто используется выражение М.А. Михеева [6]

$$Nu_{жcd} = 0,021 \cdot Re_{жcd}^{0,8} \cdot Pr_{жcd}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жcd}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon, \quad (11)$$

где $Re_{жcd}$ – число Рейнольдса для движения жидкости в круглом канале; $Pr_{жcd}$ – число Прандтля при температуре жидкости в центре канала; $(Pr_{жcd}/Pr_c)^{0,25}$ – поправка на переменность физических параметров в поперечном сечении канала; ε – поправка на участок гидродинамической стабилизации при турбулентном режиме.

Для приближенного расчета коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности ротора A может использоваться выражение для среднего коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке канала кольцевого сечения при турбулентном течении жидкости

$$Nu_{жck} = 0,017 \cdot Re_{жck}^{0,8} \cdot Pr_{жck}^{0,4} \left(\frac{Pr_{жck}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18} \cdot \varepsilon, \quad (12)$$

где $Re_{жck}$ – число Рейнольдса для движения жидкости в кольцевом канале; $Pr_{жck}$ – число Прандтля при температуре жидкости в середине канала; $d = d_2 - d_1$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала.

Существенной неопределенностью характеризуются условия охлаждения внутренней поверхности ротора B . Несмотря на существенный опыт проектирования вихревых машин, расчет коэффициентов теплоотдачи с их рабочих поверхностей проводится с помощью эмпирических зависимостей [7]. Среди них наиболее часто используются зависимости (11) и (12). Выражение (11) может быть использовано для определения коэффициента теплоотдачи в каналах треугольного сечения (межлопаточных каналах), при этом предварительно рассчитывается эквивалентный диаметр.

Выражения (11) и (12) относятся к гладким поверхностям труб, в предположении, что не возникает

добавочных вихрей, вызванных внезапными изменениями сечения и резкими поворотами, характерными для гидравлического тракта ПЭМП. Экспериментально установлено [5], что коэффициент теплоотдачи повышается за счет добавочных вихрей, обусловленных внезапными изменениями сечения и резкими поворотами, и его повышение не зависит от скорости охлаждающей среды. Поэтому, оно может учитываться посредством простого числового коэффициента "вихреобразования". В соответствии с экспериментами поставленными фирмой AEG, коэффициент теплоотдачи может увеличиться вплоть до двукратного значения, вследствие вихреобразования. Согласно измерениям Зутте, коэффициент "вихреобразования" может принимать значения от 1,7 до 1,9 [5]. Этот коэффициент рекомендуется принимать большим (2...2,1) у поверхности воздушного зазора между неподвижными и вращающимися частями машины.

Теплообмен на внутренней поверхности герметизирующей гильзы C , которая примыкает к зоне повышенного давления и соприкасается со смесью жидкости и кавитационных пузырьков, имеет сложную физическую природу. Процесс кавитации сопровождается образованием большого количества пузырьков, наполненных преимущественно парами жидкости, а также газами, и имеет много общего с процессом кипения жидкости, в связи с чем, коэффициент теплоотдачи при кавитации и кипении должны определяться сходным набором теплофизических параметров: плотностью жидкой и паровой фазы, удельной теплотой парообразования, коэффициентом теплопроводности жидкости и пара, коэффициентом вязкости жидкости. В результате анализа уравнений динамики двухфазной среды методами теории размерностей и обработки опытных данных Д.А. Лабунцовым было получено соотношение для определения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении неподвижной жидкости в большом объеме [8]:

$$k_T = b \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{2/3} (\zeta v T_H)^{-1/3} q^{-2/3}, \quad (13)$$

где ρ' и ρ'' – плотности жидкости и пара при температуре насыщения; ζ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости при температуре насыщения; v – кинематический коэффициент вязкости жидкости; T_H – температура насыщения; q – плотность теплового потока.

Для функции $b(\rho'/\rho'')$, на основании опытных данных выведено эмпирическое выражение:

$$b \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) = 0,075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)^{-2/3} \right]. \quad (14)$$

При вынужденном движении кипящей жидкости в трубах в условиях, когда жидкость нагрета до температуры насыщения, коэффициент теплоотдачи может быть подсчитан с использованием следующих выражений [9]:

$$k_T = k_1 \text{ при } \frac{k_2}{k_1} \leq 0,5; \quad (15)$$

$$k_T = k_1 \text{ при } \frac{k_2}{k_1} \leq 2; \quad (16)$$

$$\frac{k_T}{k_1} = \left(1 + \frac{k_2}{k_1} \right)^{1/2}, \text{ при } 0,5 \leq \frac{k_2}{k_1} \leq 2, \quad (17)$$

где k_1 – коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении однофазной жидкости в канале круглого

сечения, определяемый по выражению (11); k_2 – коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении в большом объеме, определяемый по выражению (13) и (14).

Корректное задание мощности тепловыделений, возникающих в рабочем объеме ПЭМП за счет гидродинамических эффектов, может быть выполнено исходя из оценки эффективности его работы.

Эффективность работы теплогенератора, в пренебрежении рассеянием тепла в гидромагистралях и элементах контура, оценивают отношением:

$$\eta_{\vartheta} = \frac{Q}{W}, \quad (18)$$

где Q – теплота переданная от теплогенератора потребителю за время t ; W – электроэнергия потребляемая теплогенератором за время t .

Точное определение величины этих тепловыделений требует проведения экспериментальных, а также теоретических исследований гидродинамических процессов в ПЭМП и выходит за рамки данной работы. В [10] приведены конкретные примеры получения тепловой энергии (описаны опыты) с помощью устройства, конструкция которого наиболее близка к рассматриваемому ПЭМП. Из приведенных экспериментальных данных следует, что отношение выделенной мощности к затраченной составило 1,27...2,9, в зависимости от мощности приводного электродвигателя и температуры нагреваемой жидкости. Если учесть потери электродвигателя, то коэффициент преобразования механической энергии в теплоту составил 1,57...3,59.

Механическая мощность ПЭМП, затрачиваемая на создание гидродинамических эффектов и транспортировку рабочей жидкости определяется как:

$$P_2 = P_1 - J_z^2(A)/\gamma(T) - J_{cmop}^2/\gamma(T) - P_{cl} - P_{dob} - P_{mex}, \quad (19)$$

где P_1 – мощность, потребляемая ПЭМП.

Мощность тепловыделений, обусловленная гидродинамическими эффектами и задаваемая в качестве объемной плотности тепловых потерь на расчетном участке межлопаточных каналов ПЭМП, рассчитывается исходя из выражения:

$$P_{ed} = P_2 \cdot \eta_m, \quad (20)$$

где η_m – коэффициент преобразования механической энергии в теплоту.

Потери в стали статора, добавочные, а также механические потери определяются по существующим методикам расчета [11, 12], и задаются как объемные тепловыделения на соответствующих расчетных участках статора и ротора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПЭМП

Для получения исчерпывающей оценки теплового состояния элементов конструкции ПЭМП целесообразно рассмотреть несколько случаев, которым присущи различные тепловые нагрузки и охлаждающие свойства теплоносителя:

- работа ПЭМП при различных значениях η_{ϑ} ;
- работа ПЭМП при повышенном значении k_{nepf} ротора;
- работа ПЭМП при различных параметрах системы осевых каналов статора.

Результаты численного расчета могут быть представлены в виде картин температурного поля всей расчетной области для конкретного момента времени, а

также в виде температурно-временных зависимостей для любого из расчетных узлов. На рис. 3 – 8 представлены картины установившегося распределения температуры в поперечном сечении ПЭМП, а также температурно-временные зависимости отдельных расчетных узлов модели при значениях $\eta_{\vartheta} = 1,3, 1,9$ и $2,5$ ($k_{nepf} = \text{const} = 0,1$).

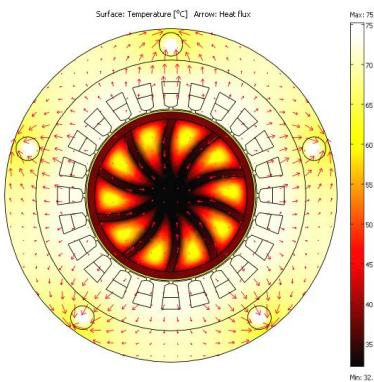


Рис. 3. Распределение температуры и вектора теплового потока в поперечном сечении ПЭМП при $\eta_{\vartheta} = 1,3$ и $k_{nepf} = 0,1$

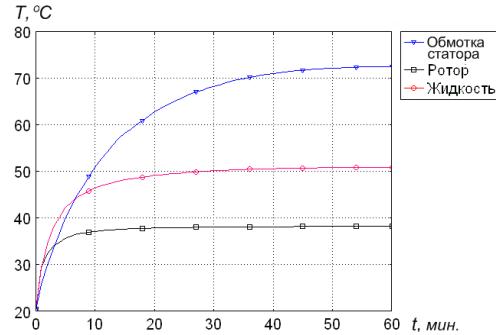


Рис. 4. Температурно-временные зависимости отдельных расчетных узлов модели при $\eta_{\vartheta} = 1,3$ и $k_{nepf} = 0,1$

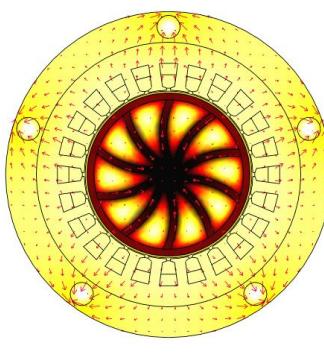


Рис. 5. Распределение температуры и вектора теплового потока в поперечном сечении ПЭМП при $\eta_{\vartheta} = 1,9$ и $k_{nepf} = 0,1$

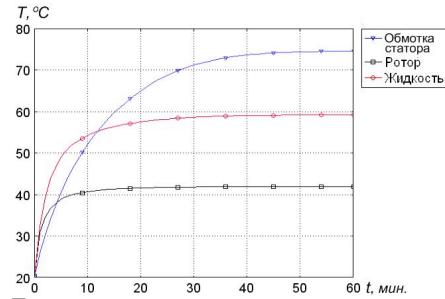


Рис. 6. Температурно-временные зависимости отдельных расчетных узлов модели при $\eta_{\vartheta} = 1,9$ и $k_{nepf} = 0,1$

Значение температуры в каждой точке сечения ПЭМП определяется в соответствии с уровнем интенсивности цветовой заливки, а распределение вектора теплового потока показано в виде стрелок. На графиках температурно-временных зависимостей показана динамика роста средней температуры рабочей жидкости, ротора и температуры наиболее нагретой точки обмотки статора.

Из представленных результатов следует, что с изменением мощности тепловыделений, обусловленных гидродинамическими эффектами, картина установившегося распределения температуры в сечении ПЭМП меняется не существенно. Так, температура наиболее нагретой точки обмотки статора изменяется в пределах 73...79 °C, что свидетельствует о теплоизолирующих свойствах рабочего зазора и незначительном теплообмене между статором и ротором, причем отвод тепла от ротора происходит с его внутренней поверхности, а от обмотки статора – через аксиальные каналы и поверхность корпуса.

Фактором, определяющим тепловую инерционность статора, является поступление в аксиальные каналы предварительно нагретой жидкости. Полученные картины распределения температуры свидетельствуют о том, что в целом, тепловая напряженность ПЭМП находится в допустимых пределах.

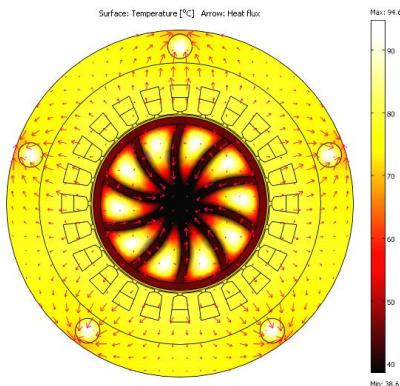


Рис. 7. Распределение температуры и вектора теплового потока в поперечном сечении ПЭМП при $\eta_0 = 2,5$ и $k_{nep\phi} = 0,1$

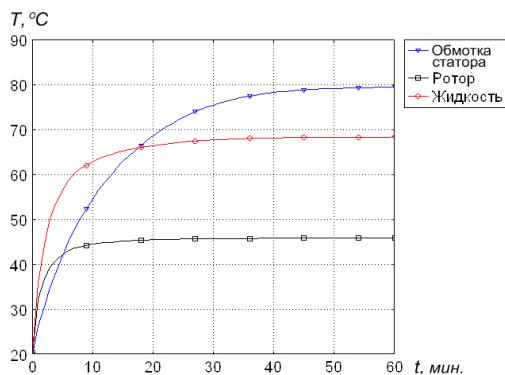


Рис. 8. Температурно-временные зависимости отдельных расчетных узлов модели при $\eta_0 = 2,5$ и $k_{nep\phi} = 0,1$

Рассмотрим температурное поле в сечении ПЭМП для случая, когда коэффициент перфорации ротора имеет повышенное значение – 0,35 (рис. 9, 10). В этом случае, работа ПЭМП характеризуется повышенными токами, протекающими в обмотке статора, повышенной частотой вихревых токов ротора (соответственно большим уровнем потерь в обмотке стато-

ра и роторе), а также меньшими значениями коэффициентов теплоотдачи, что обусловлено снижением частоты вращения ротора и расхода жидкости.

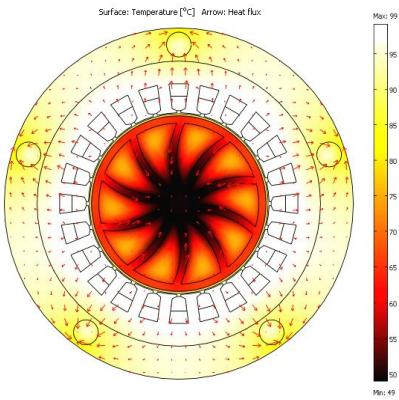


Рис. 9. Распределение температуры и вектора теплового потока в поперечном сечении ПЭМП при $\eta_0 = 1,3$ и $k_{nep\phi} = 0,35$

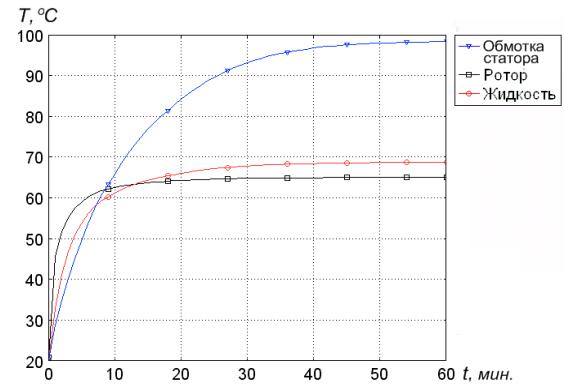


Рис. 10. Температурно-временные зависимости отдельных расчетных узлов модели при $\eta_0 = 1,3$ и $k_{nep\phi} = 0,35$

Из сравнения картин теплового поля ПЭМП, имеющих значения коэффициента перфорации 0,1 и 0,35 следует, что при значении $\eta_0 = 1,3$ необходимая температура теплоносителя на выходе теплогенератора (65...70 °C) может быть получена за счет увеличения $k_{nep\phi}$. Повышенное магнитное сопротивление обуславливает напряженное тепловое состояние статора (98 °C) и приводит к необходимости интенсификации охлаждения с применением большего количества и/или сечения аксиальных каналов. С целью улучшения условий охлаждения обмотки статора при работе с повышенным значением $k_{nep\phi}$, имеет смысл рассмотреть некоторые расчетные варианты при различных параметрах аксиальных каналов.

Распределение температуры и вектора теплового потока в поперечном сечении ПЭМП ($k_{nep\phi} = 0,35$, $\eta_0 = 1,3$), имеющего число каналов статора $n_k = 10$ радиусом $r = 6$ мм представлены на рис. 11.

Из результатов расчета видно, что с увеличением количества охлаждающих каналов в два раза температура обмотки статора уменьшается на 20 °C. На рис. 12 в виде графика поверхности представлена зависимость температуры наиболее нагретой точки обмотки статора от числа аксиальных каналов и их радиуса. Расчеты, проведенные для случаев отсутствия охлаждающих каналов статора, показывают, что температура обмотки достигает весьма высоких значений – 270...280 °C.

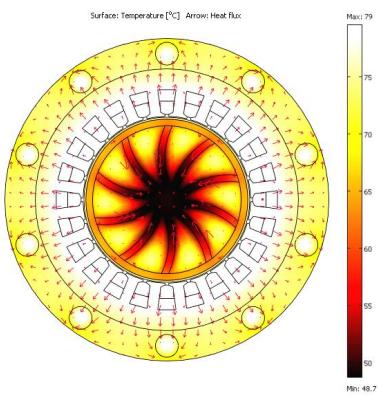


Рис. 11. Распределение температуры и вектора теплового потока в поперечном сечении ПЭМП при $n_k = 10$ и $r = 6$ мм ($k_{\text{перф}} = 0,35$ и $\eta_3 = 1,3$)

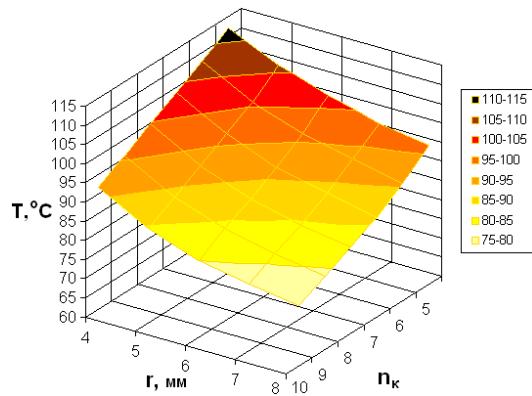


Рис. 12. Зависимость температуры наиболее нагретой точки обмотки статора от числа аксиальных каналов и их радиуса

ВЫВОДЫ

Разработаны основные положения методики расчета температурного поля ПЭМП на базе конечно-элементной модели взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов. С использованием предложенной методики проведено исследование и выполнена оценка температурного поля ПЭМП при различных тепловых нагрузках и охлаждающих свойствах теплоносителя. Полученные результаты позволяют выбирать размерные соотношения элементов конструкции ПЭМП для оптимизации параметров системы охлаждения и получения заданных показателей производительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблодский Н.Н. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором / Н.Н. Заблодский, М.А. Филатов, В.Ю. Грицюк // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 1. – С. 25-27.
2. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин / Ю.М. Васьковський. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.
3. Васьковский Ю.Н. Принцип относительности и выбор системы координат при анализе электромагнитного поля в электрических машинах / Ю.Н. Васьковский, Ю.А. Гайденко // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 11-14.
4. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
5. Шуйский В.П. Расчет электрических машин / В.П. Шуйский. – Л. : Энергия, 1968. – 732 с.
6. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1973. – 320 с.
7. Байбаков О.В. Вихревые гидравлические машины / О.В. Байбаков. – М. : Машиностроение, 1981. – 197 с.

8. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М. : МЭИ, 2006. – 550 с.
9. Бойков Г.П. Основы тепломассообмена / Г.П. Бойков, Ю.В. Видин, В.М. Журавлев. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2000. – 272 с.
10. Способ получения энергии и резонансный насос-теплогенератор: патент 2142604: МПК6 F 24 J 3/00 / Петраков А.Д.; патентообладатель Петраков А.Д. – № 98102707/06; заявл. 26.01.1998; опубл. 10.12.1999.
11. Копылов И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф.А. Горянин, Б.К. Клоков. – М. : Энергия, 1980. – 496 с.
12. Гольдберг О.Б. Проектирование электрических машин / О.Б. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М. : Высшая школа, 2001. – 430 с.

Bibliography (transliterated):

1. Zablodskij N.N. Chislennoe modelirovaniye `elektromagnitnyh polej v polifunktional'nyh `elektromehanicheskikh preobrazovatelyah s polym perforirovannym rotorom / N.N. Zablodskij, M.A. Filatov, V.Yu. Gricyuk // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 1. - S. 25-27.
2. Vas'kov'skij Yu.M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin / Yu.M. Vas'kov'skij. - K.: NTUU "KPI", 2007. - 191 s.
3. Vas'kovskij Yu.N. Princip otnositel'nosti i vybor sistemy koordinat pri analize `elektromagnitnogo polya v `elektricheskikh mashinah / Yu.N. Vas'kovskij, Yu.A. Gajdenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2008. - № 2. - S. 11-14.
4. Isachenko V.P. Teploperekeda / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. - M. : Energiya, 1975. - 488 s.
5. Shujskij V.P. Raschet `elektricheskikh mashin / V.P. Shujskij. - L. : Energiya, 1968. - 732 s.
6. Miheev M.A. Osnovy teploperekeda / M.A. Miheev, I.M. Miheeva. - M. : Energiya, 1973. - 320 s.
7. Bajbakov O.V. Vihrevye gidravlicheskie mashiny / O.V. Bajbakov. - M. : Mashinostroenie, 1981. - 197 s.
8. Cvetkov F.F. Teplomassoobmen / F.F. Cvetkov, B.A. Grigor'ev. - M. : M'EI, 2006. - 550 s.
9. Bojkov G.P. Osnovy teplomassoobmena / G.P. Bojkov, Yu.V. Vidin, V.M. Zhuravlev. - Krasnoyarsk : IPC KGTU, 2000. - 272 s.
10. Sposob polucheniya `energii i rezonansnyj nasos-teplogenerator: patent 2142604: MPK6 F 24 J 3/00 / Petrakov A.D.; patentoobladatel' Petrakov A.D. - № 98102707/06; заявл. 26.01.1998; опубл. 10.12.1999.
11. Kopylov I.P. Proektirovanie `elektricheskikh mashin / I.P. Kopylov, F.A. Goryainov, B.K. Klokov. - M. : Energiya, 1980. - 496 s.
12. Gol'dberg O.B. Proektirovanie `elektricheskikh mashin / O.B. Gol'dberg, Ya.S. Gurin, I.S. Sviridenko. - M. : Vysshaya shkola, 2001. - 430 s.

Поступила (received) 28.05.2013

Заблодский Николай Николаевич¹, д.т.н., проф.,
Плюгин Владислав Евгеньевич¹, к.т.н., доц.,
Грицюк Владимир Юрьевич¹,
Гринь Геннадий Михайлович²,

¹Донбасский государственный технический университет,
кафедра "Электрические машины и аппараты",
94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16,
тел/phone +38 06442 20564, факс/fax +38 06442 26887,
e-mail: info@dgtm.edu.ua, grits.86@mail.ru

²Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса,
93202, Луганская обл., Первомайск, пер. Заводской, 1,
тел/phone: +38 06455 44604, факс/fax: +38 06455 45800,
e-mail: pemz-market@yandex.ru

Zablodskiy N.N.¹, Pliugin V.E.¹, Gritsyuk V.Yu.¹, Grin G.M.²

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

²Pervomajsk Electromechanical Plant named K. Marx

1, Zavodskoy Lane, Pervomajsk, Lugansk region, 93202, Ukraine

Calculation of the thermal field of polyfunctional electromechanical transducer with a hollow perforated rotor.

Proposed the method of calculating the temperature field polyfunctional electromechanical transducer with hollow perforated rotor on the based finite element model of interconnected electromagnetic and thermal processes.

Key words – polyfunctional electromechanical transducer, perforated rotor, finite element model, thermal field.

ПЕРЕДЧАСНИЙ ВИХІД З ЛАДУ ОБМОТОК ДВОПОЛЮСНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

Встановлені причини передчасного згорання обмоток двополюсних асинхронних двигунів середньої потужності після першого ремонту обмоток. Надані рекомендації по підвищенню їх надійності.

Определены причины преждевременного выхода из строя обмоток двухполюсных асинхронных двигателей средней мощности после первого ремонта обмоток. Даны рекомендации по повышению их надежности.

Вступ. Асинхронні двигуни загального призначення середньої потужності напругою до 1000 В становлять по кількості 90 % всіх електродвигунів, що знаходяться в експлуатації. Середній строк служби асинхронних двигунів складає 5 років (20000 годин). Згідно статистики, на долю обмоток припадає 90 % відмов, решта 10 % – на підшипники. Надійність обмоток у вирішальній мірі визначається ізоляцією обмоток. Руйнація ізоляції виникає в основному в результаті нагрівання.

Актуальність проблеми. Спостереження показують, що двополюсні двигуни АО2-42 – АО2-92 потужністю 7,5-100 кВт, А2-71 – А2-92 потужністю 30-125 кВт, двигуни ВАО81, ВАО82 потужністю 40-55 кВт, а також двигуни серії 4А180 – 4А250 потужністю 22-90 кВт, фази статорних обмоток яких виконують із двох паралельних гілок, після першого ремонту в подальшому мають набагато більшу частоту інтенсивності раптових відмов. У майже всіх випадках вихід із ладу двигунів був спричинений міжвитковими замиканнями в катушках, що знаходяться по вертикалі вгорі статора. Міжвиткові замикання виникають через надмірне нагрівання відповідних катушок. Надмірне нагрівання вертикально розміщених катушок пов’язане з ексцентриситетом ротора, який з’являється в асинхронних двигунах після деякого часу роботи в результаті зносу підшипників в процесі експлуатації.

На теперішній час відомі та досліджені способи контролю і вимірювання відносного ексцентриситету ротора асинхронного двигуна [1-4], розроблена методика розрахунку втрат в асинхронному двигуні при ексцентриситеті ротора і описаний пристрій, який запобігає задіванню ротора за статор [5]. Описані 18 авторських свідоцтв способів діагностики ексцентриситету ротора асинхронного двигуна по його електромеханічним параметрам [6]. Відмічено, що діагностика ексцентриситету можлива тільки на заводі або в лабораторних умовах і зазвичай непридатна для використання на виробництві під час експлуатації двигуна. Крім того, всі способи, як правило, мають недостатню чутливість до ексцентриситету ротора.

Проблеми, пов’язані з ексцентриситетом в багатополюсних двигунах, розглядає в своїй відомій книзі Гемке Р.Г. [7]. Він відмічає появу шуму та вібрацій і рекомендує збільшувати повітряний зазор на 10-20 % за допомогою проточки ротора, що, звичайно, погіршує енергетичні показники двигуна. Констатує факт збільшення споживання струму паралельною гілкою, що знаходиться в зоні більшого повітряного зазору, але двополюсні двигуни, ексцентриситет в яких призводить до набагато гірших наслідків, Гемке Р.Г. не розглядає.

Мета роботи – встановити причину збільшення інтенсивності відмов двополюсних двигунів після першого ремонту обмоток і дати рекомендації щодо підвищення надійності роботи асинхронних двигунів.

Матеріал і результати дослідження. Досліджувався двигун Ново-Каховського заводу АІММ250L потужністю 90 кВт, який є аналогом двигуна єдиної серії 4А250М2У3. Двигун АІММ250L має внутрішній діаметр статора $D_{st}=232$ мм, довжину пакета статора $l_s=272$ мм, $\eta=92\%$, $\cos\varphi_1=0.9$; напруга $U=380/660$ В, фазний струм $I_\phi=95,34$ А. Обмотка двошарова петльова рівносекційна, провід $d_{tol}=1,6$ мм в 5 паралельних проводів, число витків катушки $w_k=7$, крок катушок $y=13$, число паралельних гілок $a=2$, число витків фази $w_\phi=56$.

До цього двигуна була прикута увага, тому що після першого ремонту обмотки статора менш як за місяць двигун вийшов з ладу, після повторного ремонту двигуна знову (ще за більш короткий строк) згоріла обмотка, незважаючи на те, що режим роботи був під контролем, вимірювались лінійні струми, які споживав двигун, ці струми були симетричні і не перевищували номінальні значення. Була висунута гіпотеза, що нагрівання катушок, що лежать у вертикальній площині статора, пов’язане з можливим ексцентриситетом ротора відносно статора, який завжди виникає у двигунах, в більш чи меншій мірі, після тривалого періоду роботи.

На рис. 1 показано розміщення в статорі однієї фази, позначеній АХ, що складається з двох катушкових груп, кожна з яких є паралельною гілкою. Катушкові групи заради простоти зображення показані у вигляді двох катушок і розміщені в горизонтальній площині, щоб максимальний потік, який буде їх пронизувати, був вертикально направлений. При можливому виникненні ексцентриситету повітряний зазор між статором і ротором зменшується в нижній частині.

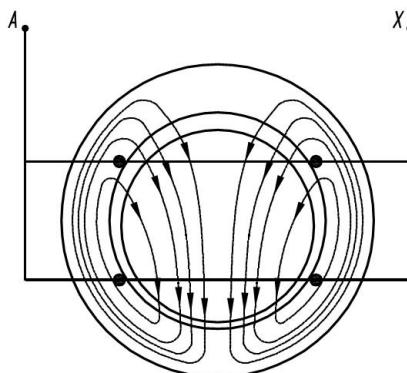


Рис. 1. Розміщення катушкових груп фази в статорі

© В.Д. Лущик, С.Ю. Полезін, Г.С. Антипко

Рекомендація розробників єдиної серії асинхронних двигунів 4А відносно кроку обмотки звучить так: "В двошарових обмотках двополюсних двигунів при великих значеннях числа пазів на полюс і фазу ($q>5$) із технологічних міркувань крок приймається рівним приблизно 2/3 діаметрального кроку" [8], тобто скорочення повинно дорівнювати:

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{16}{24} = 0,666, \quad (1)$$

де y – крок обмотки; τ – полюсне ділення досліджуваного двигуна, у якого число пазів статора $z_1=48$.

Насправді крок обмотки досліджуваного двигуна $y=13$ і $\beta=13/24=0,54$. При такому значному скороченні котушкові групи фази знаходяться на великій відстані одна від одної. Як можна бачити на рис. 1, котушкові групи, що знаходяться в нижній частині статора, пронизуються більшим потоком, ніж котушкові групи, що знаходяться у верхній частині статора, ця різниця залежить від величини ексцентриситету та від величини скорочення кроку котушок. Приймемо, що магнітний потік, який пронизує нижню котушкову групу, на 2 % більший. В замкненому контурі, який утворюють паралельні гілки фази, виникає різниця ЕРС величиною 2 % від фазної ЕРС, яка дорівнює $E_1=k_e \cdot U_1=0,985 \cdot 380=374$ В. Ці 2 % складають $\Delta E=7,486$ В. Під дією різницевої ЕРС виникає зрівняльний струм I_{3p} . На рис. 2 показані дві котушкові групи із двох котушок в кожній, з'єднані паралельно. На рис. 3 показаний контур, утворений двома котушковими групами. На обох рисунках стрілками показаний струм I_1 , що споживає двигун із мережі, і зрівняльний струм I_{3p} , який утворюється під дією ΔE .

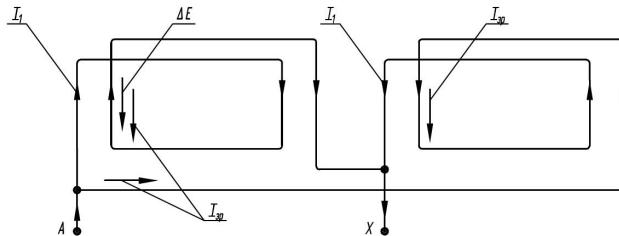


Рис. 2. Котушкові групи фази, з'єднані паралельно

Активний опір однієї паралельної гілки при 75°C $r_{75}=0,1464$ Ом.

Активний опір контуру, утворюваного двома паралельними гілками (рис. 3) $r_{\text{конт}}=2 \cdot r_{75}=0,2928$ Ом.

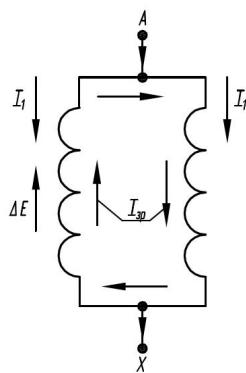


Рис. 3. Контур, утворений двома котушковими групами

Індуктивний опір фазної обмотки, розрахований по методиці, приведений в [9], $x_{1\phi}=0,078$ Ом.

Оскільки число пазів на полюс і фазу одної паралельної гілки в два рази менше числа q_1 , яке знаходиться в знаменнику формули індуктивного опору фазної обмотки

$$x_{1\phi} = \frac{1,58 f_1 l_1 w_1^2}{p q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_1, \quad (2)$$

то індуктивний опір одної паралельної гілки має в два рази більше значення. Індуктивний опір контуру, утворюваного двома гілками $x_{\text{конт}}=4 \cdot x_{1\phi}=0,312$ Ом.

Загальний опір контуру:

$$Z = \sqrt{r_{\text{конт}}^2 + x_{\text{конт}}^2} = \sqrt{0,2928^2 + 0,312^2} = 0,4279 \text{ Ом}. \quad (3)$$

Зрівняльний струм, що протікає в фазній обмотці при $\Delta E=7,486$ В:

$$I_{3p} = \frac{\Delta E}{Z} = \frac{7,486}{0,4279} = 17,495 \text{ А}. \quad (4)$$

На рис. 4 зображена спрощена векторна діаграма асинхронного двигуна, на якій показаний струм I_{3p} .

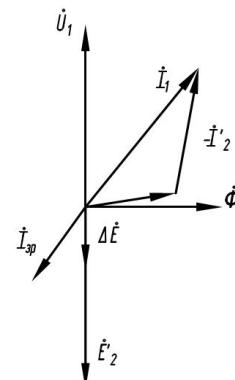


Рис. 4. Векторна діаграма

Із діаграми видно, що зрівняльний струм I_{3p} протікає в протифазі зі струмом I_1 в гілці, в якій наводиться $+ \Delta E$. Оскільки фазний струм двигуна I_1 в гілках фази роздвоюється і становить $I_{\text{гілки}}=I_1/2=47,67$ А, то в котушковій групі фазної обмотки, що знаходиться в нижній частині статора, струм становитиме

$$I_{\text{гілки}}' = 47,67 - 17,495 = 30,175 \text{ А}, \quad (5)$$

а у верхній котушковій групі струм дорівнюватиме

$$I_{\text{гілки}}'' = 47,67 + 17,495 = 60,165 \text{ А}, \quad (6)$$

що на 37 % перевищує номінальне значення струму.

При ремонті обмоток бажано збільшувати крок обмоток до скорочення кроку $\beta=0,66$, незважаючи на ускладнення технології укладання котушок в пази. Так, при збільшенні з $\beta=0,54$ ($y=13$, $\tau=24$) до $\beta=0,66$ ($y=16$, $\tau=24$) збільшується обмотковий коефіцієнт в 1,15 рази. У стільки ж зменшується число витків котушок, і відповідно у стільки ж можна збільшити поперечний переріз мідного проводу, зменшивши тим самим втрати в обмотці статора і збільшивши ККД двигуна. Негативний вплив ексцентриситету при збільшенні β зменшується.

В єдиній серії 4А аж до 4A225 ($P_2=55$ кВт) число ефективних провідників (паралельних провідників) в паралельній гілці фази $n=1,2,3$, тому нема сенсу вико-

нувати фазну обмотку двома паралельними гілками, з'єднуючи паралельно котушкові групи фази. При $n=1,2,3$ і навіть, можливо, при $n=4$ варто з'єднувати котушкові групи послідовно. Число витків котушок в два рази зменшується, але в два рази збільшується число паралельних провідників. При цьому негативний вплив ексцентриситету буде зовсім відсутній.

При виготовленні обмотки слід першу фазу розміщувати в вертикальній площині (вісь фази горизонтальна), тоді вісі двох інших фаз відносно вертикальної осі будуть розміщені під кутом 30° . Це зменшить негативний вплив ексцентриситету.

Варто у лобовій частині верхньої котушки по вертикальній лінії встановлювати температурний датчик. При зростанні температури в процесі експлуатації до зверху допустимої слід відправити двигун в ремонт для ліквідації ексцентриситету.

Висновки. Встановлена причина зменшення належності роботи асинхронних двигунів середньої потужності після першого ремонту обмоток.

1. При числі ефективних провідників обмотки $n < 4$ фазну обмотку слід виконувати одною паралельною гілкою, $a=1$.

2. При двох паралельних гілках в фазі обмотку слід виконувати зі скороченням кроку $\beta=0,66$.

3. При виготовленні обмотки першу фазу слід розміщувати в вертикальній площині (вісь фази горизонтальна).

4. У лобовій частині верхньої котушки по вертикальній лінії слід встановлювати температурний датчик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Никиян Н.Г. Способ измерения эксцентриситета ротора в многоскоростных асинхронных машинах / Н.Г. Никиян // Электротехника. – 1989. – № 6. – С. 52-54.
- Никиян Н.Г. Определение эксцентриситета ротора асинхронных машин по величине ЭДС высших гармоник / Н.Г. Никиян, М.Е. Йондем // Известия вузов. Электромеханика. – 1991. – № 11.
- Мирзоева С.М. Исследование неравномерности воздушного зазора в электрических машинах для получения диагностирующей информации / С.М. Мирзоева, М.А. Гашимов // Электротехника. – 2001. – № 8. – С.33-37.
- Гашимов М.А. Диагностика эксцентриситета электрических машин в условиях эксплуатации / М.А. Гашимов, С.М. Мирзоева, Н.К. Рамазанов // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 41-45.
- Клецель М.Я. Защита асинхронного двигателя от эксцентриситета ротора / М.Я. Клецель, А.В. Мануковский, А.Н. Новожилов // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 63-67.
- Новожилов А.Н. Способы диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя по его электромеханическим параметрам / А.Н. Новожилов, Н.А. Исупова // Вестник ПГУ. Серия энергетическая. – 2011. – № 1. – С. 37-44.
- Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин / Р.Г. Гемке; под. ред.. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.: ил.
- Асинхронные двигатели общего назначения / [Е.П. Бойко, Ю.В. Гайнцев, Ю.М. Ковалев и др.]; под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчука. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
- Гурин Я.С. Проектирование серий электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.: ил.

Bibliography (transliterated): 1. Nikiyan N.G. Sposob izmerenija ekscentrisiteta rotora v mnogoskorostnyh asinchronnyh mashinah / N.G. Nikiyan // Elektrotehnika. - 1989. - № 6. - S. 52-54. 2. Nikiyan N.G. Opredelenie ekscentrisiteta rotora asinchronnyh mashin po velichine EDS vysshih garmonik / N.G. Nikiyan, M.E. Jondem // Izvestiya vuzov. Elektromehanika. - 1991. - № 11. 3. Mirzoeva S.M. Issledovanie neravnomernosti vozduashnogo zazora v elektricheskikh mashinah dlya poluchenija diagnostiruyuschej informacii / S.M. Mirzoeva, M.A. Gashimov // Elektrotehnika. - 2001. - № 8. - S.33-37. 4. Gashimov M.A. Diagnostika ekscentrisiteta elektricheskikh mashin v usloviyah ekspluatacii / M.A. Gashimov, S.M. Mirzoeva, N.K. Ramazanov // Elektrичество. - 2005. - № 6. - S. 41-45. 5. Klecel' M.Ya. Zaschita asinchronnogo dvigatelya ot ekscentrisiteta rotora / M.Ya. Klecel', A.V. Manukovskij, A.N. Novozhilov // Elektrичество. - 2006. - № 7. - S. 63-67. 6. Novozhilov A.N. Sposoby diagnostiki ekscentrisiteta rotora asinchronnogo dvigatelya po ego elektromechanicheskim parametram / A.N. Novozhilov, N.A. Isupova // Vestnik PGU. Seriya energeticheskaya. - 2011. - № 1. - S. 37-44. 7. Gemke R.G. Neispravnosti elektricheskikh mashin / R.G. Gemke; pod. red. R.B. Umanceva. - 9-e izd., pererab. i dop. - L.: Energoatomizdat, 1989. - 336 s.: il. 8. Asinchronnye dvigateeli obschego naznacheniya / [E.P. Bojko, Yu.V. Gaincev, Yu.M. Kovalev i dr.]; pod red. V.M. Petrova i A.E. Kravchika. - M.: Energiya, 1980. - 488 s. 9. Gurin Ya.S. Proektirovaniye serij elektricheskikh mashin / Ya.S. Gurin, B.I. Kuznecov. - M.: Energiya, 1978. - 479 s.: il.

Надійшла (received) 15.06.2013

Лущик В'ячеслав Данилович¹, д.т.н., проф.,
Полезін Сергій Юрійович¹,
Антипов Геннадій Самулович², головний енергетик

¹Донбаський державний технічний університет,
кафедра електрических машин та апаратів,
94204, Луганська обл., Алчевськ, пр. Леніна, 16,
тел/phone: +38 099 7654495, e-mail: v.d.luschik@yandex.ua
²ПАТ "Стакановський завод технічного вуглецю",
94005, Луганська обл., Стаканов, вул. Чайковського, 21,
тел/phone: +38 050 1710156, e-mail: oge@carbonblack.biz.ua

Lushchyk V.D.¹, Polezin S.Yu.¹, Antipko G.S.²

¹Donbass State Technical University
16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine
²Public Joint Stock Company "Stakhanov Carbon Black Plant"
21, Tchaykovsky Str., Stakhanov, Lugansk region, 94005, Ukraine

Premature failure of medium-power two-pole induction motor windings.

Causes of premature failure of medium-power two-pole induction motor windings after the windings first repair are revealed. Recommendations for the medium-power two-pole induction motor winding reliability improvement are given.

Key words – induction motor, winding, premature failure, reliability, repair.

РАСЧЕТНЫЙ И ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ

Подано принципи і результати чисельно-польового розрахунку і відповідного гармонійного аналізу магнітного поля в активній зоні крупного турбогенератора в режимі навантаження. Окрім традиційної координатної функції магнітної індукції, в проміжку розглянуті її часові функції в нерухомих точках і в точках, пов'язаних з ротором, що обертається, а також функції магнітного потокосцеплення обмотки статора. Зроблений висновок, що ці функції магнітної індукції, які сильно відрізняються від синусоїд, не можуть бути основою визначення часових функцій магнітного потокосцеплення і ЕДС обмотки статора, які близькі до синусоїд.

Представлены принципы и результаты численно-полевого расчета и соответствующего гармонического анализа магнитного поля в активной зоне крупного турбогенератора в режиме нагрузки. Кроме традиционной координатной функции магнитной индукции, в зазоре рассмотрены ее временные функции в неподвижных точках и в точках, связанных с вращающимся ротором, а также функции магнитного потокосцепления обмотки статора. Выявлено, что эти функции магнитной индукции, которые сильно отличаются от синусоид, не могут быть основой определения временных функций магнитного потокосцепления и ЭДС обмотки статора, близких к синусоидам.

Введение. Принцип действия электрических машин (ЭМ) основан на существовании и взаимодействии магнитных полей [1]. Обоснование важнейших явлений – индуктирования ЭДС в обмотках и силовых действий базируется, как правило, на магнитных полях в зазоре между индуктором и якорем, роли которых делят статор и ротор. При этом одной из ключевых величин является магнитная индукция (МИ).

В классической теории ЭМ величина МИ в зазоре определяется методом магнитной цепи, а форма ее распределения принимается умозрительно с использованием имеющегося опыта экспериментальных исследований. Это распределение "сглаживается", а наличие зубцов сердечников учитывается в расчетах специальными коэффициентами.

В большинстве случаев расчеты магнитного поля в зазоре ограничиваются случаями действия одной из обмоток, например, индуктора – это общепринятый режим холостого хода. В режиме нагрузки, в котором и происходят основные процессы в ЭМ, при действии всех обмоток расчеты магнитных полей в зазоре методом магнитной цепи, как правило, не удается ввиду чрезмерной сложности и невысокой точности из-за серьезных допущений.

Приближенное распределение МИ ложится в основу гармонического анализа электромагнитных величин в зазоре и в обмотках, что также является основой классической теории ЭМ. Такой упрощенный подход, как показано в [2] на примере турбогенератора (ТГ), не дает достоверных результатов, когда речь идет о конкретных числовых значениях этих величин.

Отказаться от ряда допущений, влияющих на результаты расчета магнитных полей в ЭМ, позволяют численные методы в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением [3, 4]. Однако на практике в большинстве случаев ограничиваются рассмотрением координатного распределения МИ в зазоре (по линии его развертки) ЭМ и последующего гармонического анализа этого распределения и связанных с ним других величин.

Численные методы позволяют рассмотреть и другие функции электромагнитных величин [3], кото-

рые являются более полезными и правомерными для последующего анализа различных процессов в ЭМ. В данной работе это представляется на примере ТГ – одного из важнейших представителей семейства ЭМ.

Постановка задачи. Целью данной работы является представление принципов и результатов численно-полевого расчета и соответствующего гармонического анализа координатных и временных функций магнитного поля в активной зоне крупного ТГ в режиме нагрузки (РН). В расширенный состав, кроме традиционного рассмотрения координатной (угловой) функции МИ в зазоре, входят еще временные функции МИ в неподвижных точках зазора, в точках, связанных с поверхностью вращающегося ротора, магнитного потокосцепления (МПС) обмотки статора.

Объект исследования – ТГ представлен на рис.1 расчетной моделью его электромагнитной системы.

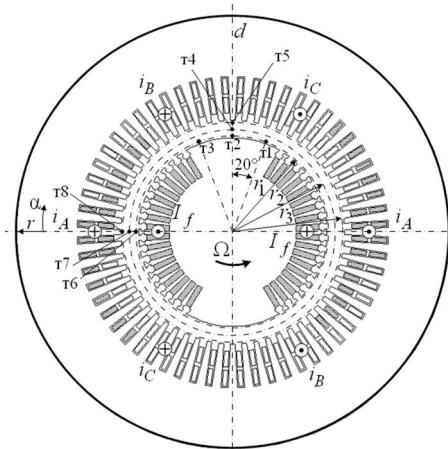


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора

Это типичный для серии ТГВ [5] трехфазный ($m_s=3$) двухполюсный ($2p=2$) ТГ. Номинальные параметры конкретной модели ТГ: мощность 225 МВт; фазные напряжение 9093 В и ток 9703 А; коэффициент мощности 0,85; частота $f_s=50$ Гц. У фазных обмоток статора число параллельных ветвей $a_s=2$, относительное укорочение 0,8, число последовательных вит-

© В.И. Мильх, Н.В. Полякова

ков $N_s=10$; число пазов статора $Q_s = 60$; активная длина ТГ $l_a=5,1$ м; немагнитный зазор 0,1 м; диаметр ротора 1,075 м; число витков обмотки ротора 180.

На рис.1 в поперечном сечении ТГ показаны фазные зоны обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$ (первая выделена затемнением стержней в пазах). Также обозначены: Ω – угловая скорость вращения ротора и магнитных полей; принятая полярная (r , α) система координат; d – продольная ось ротора. Даны обозначения и направления тока обмотки возбуждения I_f и мгновенных фазных токов обмотки статора i_A , i_B , i_C , принятые в [6] и соответствующие режиму номинальной нагрузки (НН).

Общий принцип расчета магнитных полей.

В поперечном сечении ТГ (рис.1) квазистационарное магнитное поле описывается общезвестным дифференциальным уравнением [3, 4]

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость; A_z , J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; \vec{k} – орт по аксиальной оси z .

На внешней поверхности сердечника статора принимается граничное условие Дирихле $A_z=0$. Численный расчет магнитного поля проводится методом конечных элементов по общедоступной программе FEMM [4]. При этом основным допущением является неучет возможной реакции вихревых токов.

При заданных геометрии и размерах электромагнитной системы, а также кривых намагничивания стали сердечников, режим возбуждения ТГ определяется конкретным сочетанием токов его обмоток [6].

В обмотке статора принята симметричная система фазных токов, на стержни в пазу приходятся токи

$$i_{As} = I_m \cos(\omega t + \beta); \quad i_{Bs} = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \beta); \\ i_{Cs} = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (2)$$

где $I_m = \sqrt{2}I_{sas}$ – их амплитуда; $I_{sas} = I_s/a_s$; I_s – действующие значения тока стержня и фазного тока; $\omega = 2\pi f_s$ – угловая частота; β – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора d .

Номинальные параметры ТГ, указанные выше, обеспечиваются током возбуждения $I_{fN} = 1994,9$ А и углом $\beta = -158,47^\circ$, что определено методом из [7].

Для получения **координатных – угловых функций** МИ достаточно задать эти токи и провести однопозиционный расчет магнитного поля по программе FEMM. В режиме НН, в указанной на рис.1 позиции ротора для момента времени $t=0$, по (2) определены токи $i_{As}=-6382,6$ А; $i_{Bs}=1010,6$ А; $i_{Cs}=5372,0$ А. Картина магнитного поля для режима НН представлена на рис.2, где показаны направления и соотношение МДС обмотки возбуждения F_f , обмотки статора F_a и результирующей МДС F_l .

Для получения **временных функций** электромагнитных величин проводятся многопозиционные расчеты магнитных полей для задаваемого с шагом Δt временного ряда

$$t_k=\Delta t \cdot (k-1); \quad k=1,2,\dots,K_{\min}, \quad (3)$$

и соответствующего ряда угловых позиций ротора

$$\alpha_k=\Delta\alpha \cdot (k-1); \quad k=1,2,\dots,K_{\min}, \quad (4)$$

с шагом $\Delta\alpha=\Omega \cdot \Delta t$, где K_{\min} – минимальное число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения.

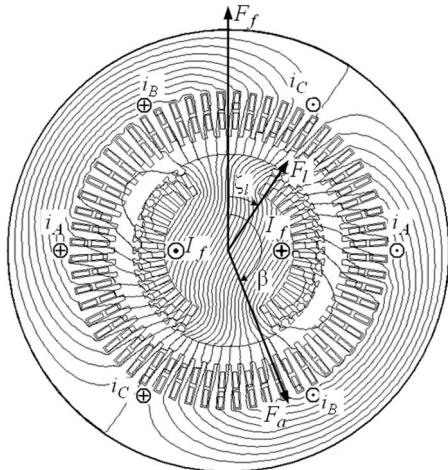


Рис. 2. Картина магнитного поля ТГ в режиме НН при исходном положении ротора (максимальное значение ВМП – 0,608 Вб/м)

Повороты ротора (4), вычисление токов статора (2) в моменты времени (3) и сбор необходимых результатов расчета проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенным в FEMM. При каждом очередном расчете магнитного поля генерировалась конечно-элементная структура примерно из 76 тыс. узлов и 152 тыс. треугольников.

При расчетах угол поворота ротора $\Delta\alpha$ между фиксированными позициями взят достаточно малым – $0,5^\circ$, а временной шаг Δt оказался равным $27,7(7)$ мкс. Так обеспечивалась необходимая детализация временных функций электромагнитных величин.

Результаты расчета магнитных полей. Для расчетного анализа в зазоре ТГ выделены три окружности с радиусами r_1 , r_2 и r_3 , а также конкретные точки t_1, t_2, \dots, t_8 , которые показаны на рис.1. Радиус r_2 соответствует средней линии зазора, r_1 больше радиуса поверхности бочки ротора на 5 мм, r_3 меньше радиуса расточки сердечника статора тоже на 5 мм.

При представлении результатов расчетов ограничились рассмотрением радиальной составляющей МИ B_r , которая обеспечивает полезный магнитный поток.

Координатная функция МИ $B_r(\alpha)$ получена расчетом магнитного поля в одной позиции (рис.2). Она представлена на рис. 3 для трех уровней расположения окружности в зазоре (масштаб на координатной линии дан в относительных единицах α/τ_p , где τ_p – полюсное деление, в угловой мере равное 180°).

На окружности у поверхности ротора (r_1) сильно проявляются зубцовые пульсации его сердечника, у расточки сердечника статора (r_3) – его зубцовые пульсации. На окружности посередине зазора (r_2) эти пульсации дистанционно сглажены. На всех уровнях

явно прорисовывается влияние большого зуба ротора и "перекос" графиков на его ширине, что объясняется сгущением силовых линий под одним из краев этого зуба, в направлении которого действует результирующая МДС F_l в РН (рис. 2).

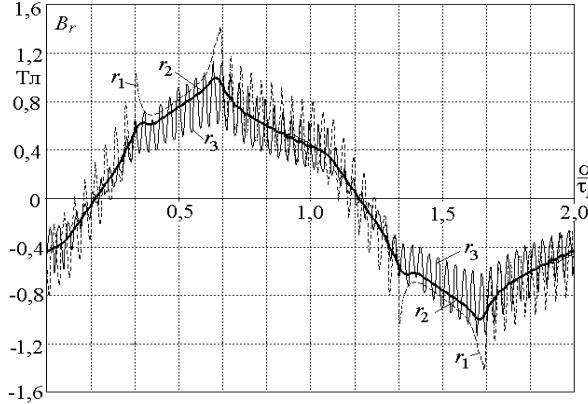


Рис. 3. Распределение радиальной составляющей МИ в зазоре ТГ на трех окружностях разного радиуса

Временная функция МИ $B_r(t)$ получена много-позиционными расчетами магнитных полей в дискретной форме

$$B_r(t_k), k=1,2,\dots,K, \quad (5)$$

где K – число точек в пределах полного поворота ротора, которое составило 721. Реально же эта функции с учетом периодичности сформирована по расчетам в 120 точках при повороте ротора от 0 до 60° и соответствующем интервале времени.

Графики временных функций (5) для трех зафиксированных в зазоре точек т6, т7 и т8 на соответствующих радиусах представлены на рис. 4, где время дано в относительных единицах, а за базу взят период T , соответствующий повороту ротора на $2\tau_p$.

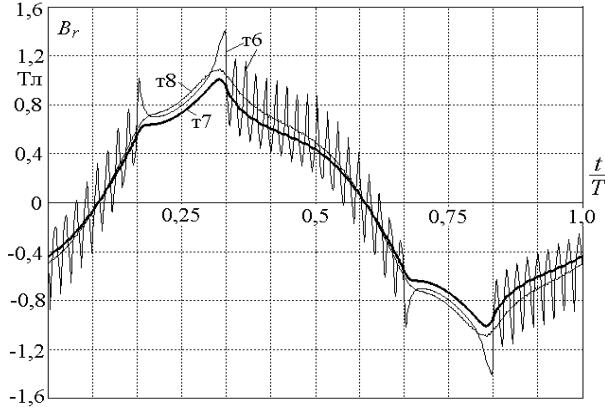


Рис. 4. Временные функции радиальной составляющей МИ в зазоре ТГ в неподвижных точках на разных радиусах

В целом графики временных функций (рис. 4) похожи на графики координатных функций (рис. 3), но теперь проявляют себя только зубцовые пульсации у поверхности ротора (т6). В точках т7 и т8 эти пульсации дистанционно сглажены, а вот зубцовые пульсации от статора никак не проявляются: для временных функций безразлична зубчатая структура сердечника статора – для точек, неподвижных относительно него.

Для точек, связанных с вращающимся ротором, период изменения временных функций МИ $B_r(t)$, как показано в [8], составляет

$$T_t = \frac{T}{2m_s}. \quad (6)$$

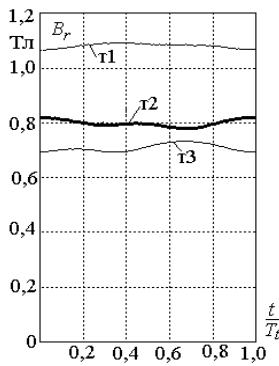


Рис. 5. Временные функции $B_r(t)$ в точках на поверхности вращающегося ротора на их периоде

Из полных значений B_r выделяется переменная составляющая магнитной индукции (ПСМИ) и получается в виде числового массива соответствующая дискретная временная функция:

$$B_{rav}(t_k) = B_r(t_k) - B_{avg}, k=1,2,\dots,K, \quad (7)$$

где среднее полное значение МИ (постоянная составляющая) для конкретно рассматриваемой точки

$$B_{avg} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{rk}. \quad (8)$$

Интерес к ПСМИ на поверхности ротора ТГ связан с тем, что именно она приводит к дополнительным потерям мощности в поверхностном слое бочки ротора и дополнительному его подогреву [9].

Графики временной функции ПСМИ даны на рис. 6 – для наглядности периодичной структуры на трех периодах их изменения. Три выбранные точки на поверхности ротора (рис. 1) разнесены на 20° , что составляет треть периода T_t в угловой мере. Соответственно на рис. 6 сдвинуты по фазе друг относительно друга временные функции ПСМИ.

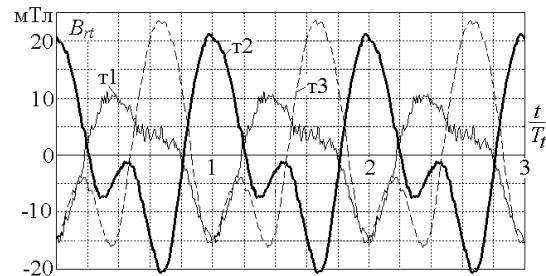


Рис. 6. Временные функции ПСМИ на их трех периодах в трех точках на поверхности вращающегося ротора

Графики ПСМИ (рис. 6) имеют довольно сложный характер, они существенно отличаются для разных точек, тогда как классическая теория [1, 9] предполагает неизменность этих функций по окружности поверхности ротора. Основной причиной отличия является насыщение большого зуба ротора. Его правая часть (т1) насыщена сильнее – здесь имеются большие значения МИ (рис. 5). Поэтому развитие ко-

лебаний ПСМИ в правой части затруднено, т.к. здесь магнитные свойства стали характеризуются насыщенной частью кривой намагничивания, в отличие от слабо насыщенной левой части (т3).

В соответствии с теорией ТГ [9], ПСМИ на поверхности ротора вызвана наличием гармонического спектра в координатной функции МДС обмотки статора и зубчатой структурой его сердечника.

Первая причина – абстрактный математический прием разложения условной ступенчатой функции МДС обмотки статора на спектры гармоник, вращающиеся в противоположные стороны. А реальной физической причиной является периодическая структура распределения максимумов полных токов по пазам статора (рис. 7). В тех пазах, где присутствуют стержни одной фазы, максимум составляет $2I_{mas}$, в остальных – $\sqrt{3} I_{mas}$. Координатный период на рис. 7 $\tau_t = \tau_p / m_s$ и выливается во временной период T_t (6).

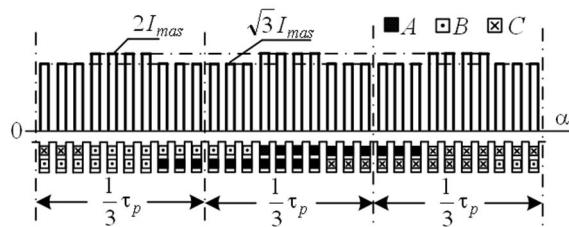


Рис. 7. Распределение максимальных значений полных токов по пазам статора в пределах полюсного деления

В рассматриваемом ТГ вторая причина – зубцовые пульсации практически незаметны, они проявляются в ТГ с меньшим числом зубцов статора, что выявлено в [8], где их было вдвое меньше.

Графики функции $B_{rt}(t)$ на рис.6 для точек t2 и t3 достаточно "гладкие", а для точки t1 проявились микропульсации, вызванные погрешностью из-за дискретной конечно-элементной структуры, которая автоматически перестраивается и меняется при переходе вращающегося ротора из одной позиции в другую.

Уровни ПСМИ в точках, вращающихся вместе с ротором, на разных позициях зазора представлены на рис. 8 – для точек t2, t4 и t5. Для точки t2 повторяется в другом масштабе график с рис. 6, где зубцовые пульсации незаметны. По мере приближения к расточке статора такие пульсации усиливаются, они становятся заметными для точки t4 и оказываются доминирующими в функции ПСМИ вблизи этой расточки.

Средние значения МИ B_{rav} (8) и максимумы ПСМИ $B_{rt max}$ даны в табл.1 для указанных точек. Они подтверждают приведенные выше рассуждения.

Если опять вернуться к рис.3 и рис.4, то можно предположить, что переход от функций радиальной

составляющей МИ к ЭДС в обмотке статора будет более обоснованным для второй из них. Ведь как неподвижны заданные точки в зазоре, так неподвижны и проводники обмотки статора, а графики того же типа могут дать временную функцию ЭДС проводника

$$e(t) = r \cdot \Omega \cdot l_a \cdot B_r(t). \quad (9)$$

Таблица 1. Средние значения МИ и максимальные значения ПСМИ в указанных точках зазора, вращающихся с ротором

№ точки	t1	t2	t3	t4	t5
B_{rav} , Тл	1,082	0,799	0,709	0,733	0,672
$B_{rt max}$, мТл	11,7	21,3	23,7	26,6	282

Однако это приемлемо только для проводников, лежащих в зазоре при гладкой поверхности статора. Ведь ТГ с формой ЭДС обмотки статора, повторяющей форму кривых $B_r(t)$ на рис. 4, неприемлемы, тем более результат зависел бы от того, на каком радиусе r взять кривую, а ведь форма функции $e(t)$ в конкретном ТГ едина – есть такою, какою есть.

Решение этого противоречия в том, что не следует пользоваться функцией $B_r(t)$ из зазора, а следует пользоваться временной функцией МПС $\Psi(t)$ фазной обмотки статора, как это показано в [2]. Такая функция МПС формируется посредством рассмотренных многопозиционных расчетов магнитного поля ТГ.

Конкретно, МПС фазной обмотки $A-A'$ [3]

$$\Psi_A = N_s l_a \left(\frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (10)$$

где $S_A, S_{A'}$ – площади сечения по всем стержням фазных зон A и A' (на рис. 1 затемнены); $K_A, K_{A'}$ – числа конечных элементов их дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площадью ΔS_j .

Заметим, что в программе FEMM есть процедура автоматического извлечения этого МПС (10).

Как и для МИ (5), многопозиционными расчетами формируется дискретная временная функция МПС

$$\Psi(t_k), k=1,2,\dots,K, \quad (11)$$

где K – то же число точек, что и в (5).

Графики функций $\Psi(t)$ для фазных обмоток статора показаны на рис.9 на периоде их изменения T .

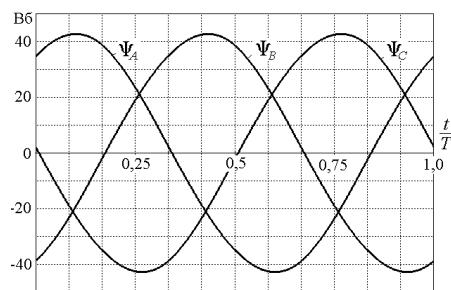


Рис. 9. Временные функции МПС фазных обмоток статора

Эти графики близки к "чистым" синусоидам, а иного в ТГ и не предполагается, и не похожи на угловые (рис. 3) и временные (рис. 4) функции МИ в зазоре, даже с учетом подавления ряда гармоник посредством обмоточного коэффициента [1].

Все рассмотренные функции МИ и МПС являются периодическими и могут быть детально проанализированы посредством гармонического анализа, апробация принципов которого проведена в [2].

Гармонический анализ числовых дискретных функций электромагнитных величин B_r , B_{rt} и Ψ выполнен на основе их разложения в ряды Фурье [10].

Для угловой функции имеем косинусный ряд

$$\Gamma = \sum_{v=1}^{N_g} \Gamma_{m,v} \cos(v\alpha + \eta_v), \quad (12)$$

где амплитуды и аргументы гармоник

$$G_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \eta_v = -\arctg(s_v / c_v) \quad (13)$$

определяются через коэффициенты синусного и косинусного рядов:

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sin(v\alpha_k); \quad c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \cos(v\alpha_k). \quad (14)$$

Для временных функций имеем аналогичный ряд

$$\Gamma = \sum_{v=1}^{N_g} \Gamma_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v), \quad (15)$$

и сопутствующие обеспечивающие величины

$$G_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \zeta_v = -\arctg(s_v / c_v); \quad (16)$$

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sin(v\omega t_k); \quad c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \cos(v\omega t_k). \quad (17)$$

В приведенных выражениях под обозначением Γ подразумевается любая из величин B_r , B_{rt} и Ψ , определенное количество точечных значений K для которых берется в пределах их полного периода. Для функций B_r и Ψ , имеющих полупериодичную асимметрию типа $\Gamma(t+T/2) = -\Gamma(t)$, в рядах (12) и (15) присутствуют лишь нечетные гармоники $v=1,3,5,\dots$, для функции B_{rt} , не имеющей симметрии на периоде, присутствуют четные и нечетные гармоники $v=1,2,3,\dots$

Допустимый номер гармоник N_g не должен превышать половины выбранного для (14), (17) числа значений K . При повороте ротора и магнитного поля на $\tau_p/3$ с шагом $0,5^\circ$ за период T_t число K составляло 120, а $N_g = 60$, при использовании полного периода $T K = 720$, а $N_g = 360$, хотя в случае полупериодичной асимметрии можно обойтись и числом $K = 360$ на полупериоде.

Номера гармоник v в (12) и (15) соответствуют периодичности конкретно рассматриваемой функции. Так периоду T в режиме нагрузки соответствует первая глобальная гармоника $v=1$. Если же рассматривается функция с периодом T_t , то полученная в (15) локальная первая гармоника $v=1$ в глобальном исчислении будет иметь номер $v_s = 2 m_s = 6$. Вообще локальные гармоники с номером v в глобальном исчислении имеют номер

$$v_s = 2 m_s v = 6 v. \quad (18)$$

Зубцовая гармоника от сердечника статора в локальном исчислении имеют номер $v=10$, а в глобальном исчислении ее период T_{Qs} составляет T/Q_s и ее номер $v_{Qs} = Q_s = 60$.

Результаты гармонического анализа функций электромагнитных величин.

Гармонический состав координатных функций (рис. 3) и временных функций (рис. 4) МИ представлен в табл. 2. Здесь и далее амплитуды гармоник даны в относительных единицах (о.е.)

$$B_{m,v,*} = B_{m,v} / B_{m,1}, \quad (20)$$

где за базу принимается амплитуда первой гармоники $B_{m,1}$ для конкретной функции, а сама она дается в абсолютном значении.

Таблица 2. Основные гармоники функций МИ на трех радиусах в зазоре: $B_r(\alpha)$ – угловая функция на окружностях; $B_r(t)$ – временная функция в неподвижных точках

Функция	$B_r(\alpha)$			$B_r(t)$		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
$B_{m,1,Tl}$	0,945	0,849	0,776	0,942	0,852	0,968
$B_{m,3,Tl}$	0,105	0,100	0,097	0,103	0,096	0,090
$B_{m,5,Tl}$	0,082	0,065	0,060	0,081	0,065	0,057
$B_{m,7,Tl}$	0,070	0,038	0,019	0,082	0,054	0,043
$B_{m,9,Tl}$	0,044	0,025	0,019	0,045	0,024	0,017
$B_{m,11,Tl}$	0,019	0,014	0,025	0,016	0,007	0,003
$B_{m,13,Tl}$	0,042	0,020	0,019	0,039	0,015	0,007
$B_{m,15,Tl}$	0,035	0,011	0,005	0,036	0,011	0,005
d_{dist}	0,959	0,991	0,964	0,958	0,991	0,993

Роль высших гармоник оценивается коэффициентом искажения кривых

$$d_{dist} = B_{m,1} \sqrt{\sum_{v=1}^{N_g} B_{m,v}^2}. \quad (21)$$

Для функций, содержащих явно выраженные зубцовые пульсации, значения d_{dist} заметно отличаются от единицы, присущей "чистой" синусоиде.

В табл. 3 дается гармонический состав временных функций ПСМИ (рис. 6) в указанных трех точках на поверхности врачающегося ротора. Здесь присутствуют нечетные и четные гармоники с локальными номерами, которые пересчитываются в глобальные номера по (18), зубцовая гармоника в табл. 3 имеет локальный номер $v=10$ – она слабо выражена.

Коэффициент искажения для точек t_1 , t_2 и t_3 составил 0,910, 0,824 и 0,842, соответственно, т.е. роль высших гармоник весьма существенна.

Таблица 3. Основные гармоники ПСМИ по точкам на поверхности ротора, врачающихся вместе с ним

Точка	t_1	t_2	t_3	Точка	t_1	t_2	t_3
$B_{m,1,MtL}$	10,15	14,51	16,03	$B_{m,7,MtL}$	0,023	0,010	0,006
$B_{m,2,MtL}$	0,434	0,670	0,621	$B_{m,8,MtL}$	0,012	0,010	0,005
$B_{m,3,MtL}$	0,053	0,143	0,147	$B_{m,9,MtL}$	0,018	0,009	0,002
$B_{m,4,MtL}$	0,008	0,021	0,020	$B_{m,10,MtL}$	0,016	0,004	0,003
$B_{m,5,MtL}$	0,011	0,017	0,019	$B_{m,11,MtL}$	0,023	0,002	0,004
$B_{m,6,MtL}$	0,024	0,007	0,003	$B_{m,12,MtL}$	0,011	0,004	0,005

В табл. 4 дан гармонический состав для временной функции МПС фазной обмотки статора. В нем присутствуют только нечетные гармоники. Они даны в относительных единицах аналогично (20) и имеют глобальные номера v . Амплитуда первой гармоники $\Psi_{m,1}$ составляет 42,49 Вб, тогда как максимальное значение на рис. 9 – 42,72 Вб.

Таблица 4. Относительные значения амплитуд гармоник МПС фазной обмотки статора

v	3	5	7	9	11	13	15
$\Psi_{m,v}^*$	0,0136	0,0010	0,0006	0,0005	0,0002	0,0001	0,0000

Для временной функции МПС коэффициент искажения, аналогичный (21), оказался на уровне 1 (0,9999), т.е. здесь действительно имеет место практически чистая синусоида, т.к. высшие гармоники весьма малы.

Выводы.

1. Координатные функции МИ в зазоре имеют сильные зубцовые пульсации: от сердечника ротора у его поверхности и от сердечника статора у его поверхности. Форма этих функций имеет явно выраженный прекос из-за несимметричного действиярезультирующей МДС в режиме нагрузки относительно большого зуба ротора.

2. Временные функции МИ в неподвижных точках зазора в целом аналогичны ее координатным функциям, но зубцовые пульсации от неподвижного статора в них не проявляются.

3. Временные функции ПСМИ в точках на поверхности вращающегося ротора имеют сложную форму и их период составляет шестую часть основного периода электромагнитных величин ТГ. Эти функции в разных точках поверхности весьма существенно отличаются друг от друга.

4. Временные функции МПС обмотки статора практически синусоидальны и не наследуют характер координатных и временных функций МИ в зазоре.

5. Гармонический состав координатных и временных функций МИ в зазоре является разным и еще существенно зависит от положения рассматриваемых мест их определения в зазоре.

6. В разных точках на поверхности вращающегося ротора временная функция ПСМИ имеет различный гармонический состав, а существенную роль играют первая и вторая гармоники, эквивалентные шестой и двенадцатой в глобальном исчислении, зубцовые гармоники от статора оказались несущественными.

7. Во временных функциях МПС, а значит и ЭДС обмотки статора, все гармоники, выше первой, оказываются несущественными и несоизмеримо меньшими, чем аналогичные гармоники МИ в зазоре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Мильх В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов // Технична електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 40-49.
3. Мильх В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 40-46.
4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.
5. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електрических станцій // Ю.В. Зозулін, О.Є. Антонов, В.М. Бичкік, А.М. Боричевський, К.О. Кобзар, О.Л. Лівшиць, В.Г. Ракогон, І.Х. Роговий, Л.Л. Хаймович, В.І. Чередник.– Харків: ПФ "Колегіум", 2011. – 228 с.
6. Мильх В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 33-38.
7. Мильх В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 1. – С. 36-41.
8. Мильх В.И., Полякова Н.В. Анализ переменной составляющей магнитного поля на поверхности вращающегося ротора турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 5. – С. 39-44.
9. Титов В.В., Хугорецкий Г.М. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. – 832 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vol'dek A.I. 'Elektricheskie mashiny. L.: 'Energiya, 1978. - 832 s. 2. Milyh V.I., Polyakova N.V. Garmonicheskij analiz `elektromagnitnyh velichin trefaznoj obmotki statora turbogeneratora na osnove klassicheskikh i chislennno-polevych metodov // Tehnicna elektrodinamika. - 2013. - № 3. - S. 40-49. 3. Milyh V.I., Polyakova N.V. Opredelenie `elektromagnitnyh parametrov `elektricheskikh mashin na osnove chislennyh raschetov magnitnyh polej // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2006. - № 2. - S. 40-46. 4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <femm.berlios.de>. 5. Stvorennya novih tipiv ta modernizaciya diyuchih turbogeneratoriv dlya teplovih elektrichnih stancij // Yu.V. Zozulin, O.Є. Antonov, V.M. Bichik, A.M. Borichevs'kij, K.O. Kobzar, O.L. Livshic', V.G. Rakogon, I.H. Rogovij, L.L. Hajmovich, V.I. Cherednik. - Harkiv: PF "Kolegium", 2011. - 228 s. 6. Milyh V.I., Polyakova N.V. Sistema napravlenij i fazovoy sootnoshenij `elektromagnitnyh velichin pri chislennyh raschetaх magnitnyh polej v turbogeneratore // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - № 5. - S. 33-38. 7. Milyh V.I., Polyakova N.V. Organizaciya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniem zadannyh ego vygodnyh parametrov // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 1. - S. 36-41. 8. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz peremennoj sostavlyayuschej magnitnogo polya na poverhnosti vraschayuschesgosya rotora turbogeneratora // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2013. - № 5. - S. 39-44. 9. Titov V.V., Hutoreckij G.M. i dr. Turbogeneratory. -L.: 'Energiya, 1967. - 895 s. 10. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. M.: Nauka, 1973. - 832 s.

Поступила (received) 12.08.2013

*Мильх Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
Полякова Наталия Владимировна, ассистент
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра "Электрические машины",
61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone: +38 057 7076514, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua*

*Milykh V.I., Polyakova N.V.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Theoretical and harmonic analysis of magnetic fields in the active zone of a turbogenerator under load conditions.

The paper presents some principles and results of numerical field calculation and the corresponding harmonic analysis of magnetic field in the active zone of a large turbogenerator under load conditions. In addition to the traditional coordinate function of the magnetic induction, its time functions are considered at fixed points and at rotating rotor linked points in the gap. The stator magnetic flux linkage functions are also examined. It is revealed that these magnetic induction functions, which are different from sine curves, fail to provide the basis for determining time functions of magnetic flux linkage and the stator winding EMF that are close to sine waves.

Key words – turbogenerator, magnetic field, numerical field calculation, load mode, magnetic induction, magnetic flux linkage, coordinate function, time function, harmonic analysis.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РОТОРА ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Розроблена математична модель температурного поля ротора частотно-керованого асинхронного двигуна на основі диференціальних рівнянь тепlopровідності. Отримана модель була апробована в ході експериментальних досліджень даних двигунів.

Разработана математическая модель температурного поля ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя на основе дифференциальных уравнений теплопроводности. Полученная модель была апробирована в ходе экспериментальных исследований рассматриваемых двигателей.

ВВЕДЕНИЕ

Метод эквивалентных тепловых схем (метод ЭТС), широко используемый при проектировании и исследовании электрических машин, позволяет определить средние температуры отдельных элементов конструкции электрических машин. Этого, как правило, достаточно для большинства практических задач расчета нагрева электрических машин. Однако, при частотном регулировании асинхронных двигателей, как показано в [1], возникают добавочные потери в обмотках и магнитопроводе от действия высших гармоник тока и магнитного потока, обусловленных ступенчатой формой напряжения, и одновременно изменяются условия охлаждения двигателей. Все это приводит к существенному исказению температурных полей по сравнению с питанием двигателей синусоидальным напряжением. При этом наличие добавочных потерь изменяет величины и соотношение между мощностями потерь элементов конструкции двигателя. Увеличение средних по двигателю температур может достигать 29 % (регулирование "вниз" по пропорциональному закону) [2, 3]. Наиболее существенно совместное влияние добавочных потерь и изменение условий охлаждения в процессе регулирования для ротора, так как добавочные электрические потери в роторе составляют примерно 65 % от суммы добавочных потерь двигателя. Расчетное и экспериментальное исследование теплового состояния частотно-управляемых двигателей при различных законах регулирования позволило установить, что распределение температуры по ветви ротора имеет форму несимметричного колокола. Однако количество точек определения температуры по ветви ротора при исследовании по методу ЭТС и в эксперименте ограничено (одна и три точки соответственно) [2-4]. В связи с этим, представляется интерес исследование температурных полей отдельных элементов конструкции асинхронных частотно-управляемых двигателей и в частности роторов.

Целью данной работы является разработка математической модели температурного поля ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя.

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Математическая модель основывается на дифференциальных уравнениях теплопроводности, составленных для отдельных участков ротора. В дифференциальных уравнениях и граничных условиях тепловые связи устанавливаются на основе результатов теплового расчета методом ЭТС [2-4].

При анализе температурного поля ротора принимаются следующие допущения [5]:

1) при отношении длины ротора к его диаметру (0,5-1,0) температурное поле ротора можно считать одномерным;

2) в силу высокой теплопроводности стали вдоль

листов и алюминиевых стержней и плотного прилегания алюминия и стали, в каждом поперечном сечении ротора температура принимается одинаковой;

3) в каждом поперечном сечении ротора поле температур имеет круговую симметрию относительно оси ротора;

4) при одностороннем наружном обдуве обтекаемого корпуса температурное поле ротора несимметрично относительно его середины;

5) в пределах длины сердечника теплообмен с окружающей средой происходит через поверхность ротора в воздушный зазор при среднем коэффициенте теплоотдачи α_δ (предполагаем, что аксиальные каналы в роторе отсутствуют).

6) в торцевых частях ротора (короткозамыкающие кольца и роторные лопатки) теплообмен с окружающей средой происходит при среднем коэффициенте теплоотдачи $\alpha_{t,p}$;

7) поперечное сечение ротора S_p в пределах длины сердечника состоит из сечения стали S_{Fe} и суммарного сечения стержней обмотки S_{Al} . Теплоотдающий периметр Π_δ есть периметр по внешнему диаметру листов ротора. Поперечное сечение роторных лопаток $S_{p,l}$, а их теплоотдающий периметр – $\Pi_{p,l}$. Поперечное сечение короткозамыкающего кольца (поперек оси двигателя) – $S_{k,k}$, а его теплоотдающий периметр – $\Pi_{k,k}$.

8) удельные потери ротора (потери на единицу длины) складываются из основных и дополнительных потерь от первой гармоники напряжения и добавочных потерь от высших гармоник напряжения;

9) в аксиальном направлении ротор разбивается на расчетные участки.

Разбивку ротора в аксиальном направлении начинаем со стороны вентилятора наружного обдува и выделяем следующие участки:

- 1 – роторные лопатки;
- 2 – короткозамыкающее кольцо обмотки ротора;
- 3 – сердечник и стержни обмотки ротора;
- 4 – короткозамыкающее кольцо обмотки ротора;
- 5 – роторные лопатки.

Разбиение на расчетные участки, с соответствующей им нумерацией, показано на рис. 1.

В пределах 3-го участка, который показан на рис. 1, сечение проходит по стержню обмотки ротора.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На каждом i -ом расчетном участке выделяется элементарный объем dV_i с длиной dx_i . Для каждого элементарного объема составляется уравнение теплового баланса и формулируются граничные условия. При этом учитывается, что условия теплообмена и

тепловыделения на участках 1, 2, 3 различны, что определяет структуру уравнений.

Уравнение теплового баланса для элементарного объема в пределах 1-го участка имеет вид:

$$Q_{x1} = Q_{x1+dx1} + dQ_{\alpha1}; \quad 0 \leq x_1 \leq l_1, \quad (1)$$

где l_1 – аксиальный размер роторных лопаток, замененных эквивалентными прямоугольными; Q_{x1} – тепловой поток, входящий через правый торец рассматриваемого элементарного объема dV_1 ; Q_{x1+dx1} – тепловой поток, выходящий через левый торец dV_1 ; $dQ_{\alpha1}$ – конвективный тепловой поток от dV_1 к внутреннему воздуху.

В соответствии с законами Фурье и Ньютона-Рихмана:

$$Q_{x1} = -\lambda_{Al} \cdot S_{p.l.} \cdot \frac{dT_1}{dx_1}; \quad (2)$$

$$Q_{x1+dx1} = -\lambda_{Al} \cdot S_{p.l.} \cdot \frac{d}{dx_1} \left(T_1 + \frac{dT_1}{dx_1} \cdot dx_1 \right); \quad (3)$$

$$dQ_{\alpha1} = \alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{p.l.} \cdot dx_1 \cdot (T_1 - \theta_{1B.B.}), \quad (4)$$

где $\theta_{1B.B.}$ – температура внутреннего воздуха со стороны вентилятора наружного обдува, определяемая в ходе теплового расчета по методу ЭТС [2, 3].

После подстановки уравнений (2), (3), (4) в (1) и преобразований получим дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{d^2T_1}{dx_1^2} = \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{p.l.}}{\lambda_{Al} \cdot S_{p.l.}} \cdot T_1 - \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{p.l.} \cdot \theta_{1B.B.}}{\lambda_{Al} \cdot S_{p.l.}}. \quad (5)$$

Пренебрегая тепловым потоком, сходящим с торцов роторных лопаток, получим:

$$\frac{dT_1}{dx_1} = 0 \text{ при } x_1 = 0.$$

Уравнение теплового баланса для элементарного объема dV_2 в пределах 2-го участка:

$$Q_{x2} + Q_2 \cdot dx_2 = Q_{x2+dx2} + dQ_{\alpha2}; \quad (6)$$

$$0 \leq x_2 \leq l_2,$$

где Q_{x2} , Q_{x2+dx2} , $dQ_{\alpha2}$ – аналогичны Q_{x1} , Q_{x1+dx1} , $dQ_{\alpha1}$; Q_2 – удельные (на единицу длины) потери в короткозамкнутом кольце обмотки ротора.

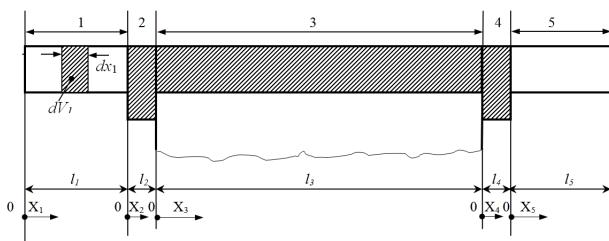


Рис. 1. Разбивка ротора асинхронного двигателя на расчетные участки

Удельные потери в короткозамкнутом кольце обмотки ротора определяются по формуле

$$Q_2 = \frac{P_{k.k.}}{l_2}, \quad (7)$$

где $P_{k.k.}$ – сумма основных и дополнительных электрических потерь от первой гармоники напряжения и добавочных электрических потерь от высших гармоник напряжения в одном короткозамкнутом кольце; l_2 – аксиальный размер короткозамкнутого кольца.

После преобразований (6) получим дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{d^2T_2}{dx_2^2} = \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{k.k.}}{\lambda_{Al} \cdot S_{k.k.}} \cdot T_2 - \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{k.k.} \cdot \theta_{1B.B.} + Q_2}{\lambda_{Al} \cdot S_{k.k.}}. \quad (8)$$

Уравнение теплового баланса для элементарного объема dV_3 в пределах 3-го участка:

$$Q_{x3} + (Q_{3Fe} + Q_{3Al}) \cdot dx_3 = Q_{x3+dx3} + dQ_{\alpha3}, \quad (9)$$

$$0 \leq x_3 \leq l_3.$$

Ротор в пределах l_3 рассматривается как тело, состоящее из сердечника ротора и стержней обмотки ротора с коэффициентами теплопроводности λ_{Fe} и λ_{Al} соответственно (λ_{Fe} для шихтованного пакета в направлении – поперек шихтовки). В связи с этим, члены уравнения (9) имеют вид:

$$Q_{x3} = -(\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe} + \lambda_{Al} \cdot S_{Al}) \cdot \frac{dT_3}{dx_3}; \quad (10)$$

$$Q_{x3+dx3} = -(\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe} + \lambda_{Al} \cdot S_{Al}) \cdot \frac{d}{dx_3} \left(T_3 + \frac{dT_3}{dx_3} \cdot dx_3 \right); \quad (11)$$

$$dQ_{\alpha3} = \alpha_{\delta} \cdot \Pi_{\delta} \cdot dx_3 \cdot (T_3 - \theta_{\delta}); \quad (12)$$

$$Q_{3Fe} = \frac{\sum P_{3Fe}}{l_3}; \quad (13)$$

$$Q_{3Al} = \frac{\sum P_{3Al}}{l_3}, \quad (14)$$

где $\sum P_{3Fe}$ – сумма добавочных магнитных потерь от высших гармоник напряжения; $\sum P_{3Al}$ – сумма основных и дополнительных электрических потерь от первой гармоники напряжения и добавочных электрических потерь от высших гармоник напряжения; θ_{δ} – средняя температура воздуха в воздушном зазоре; $\theta_{1B.B.}$, $\theta_{2B.B.}$ – температуры внутреннего воздуха со стороны вентилятора наружного обдува и со стороны привода, определяемые в ходе теплового расчета по методу ЭТС [2, 3].

После преобразований (9) получим дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{d^3T_3}{dx_3^2} = \frac{\alpha_{\delta} \cdot \Pi_{\delta}}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe} + \lambda_{Al} \cdot S_{Al}} \cdot T_3 - \frac{\alpha_{\delta} \cdot \Pi_{\delta} \cdot \theta_{\delta} + Q_{3Fe} + Q_{3Al}}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe} + \lambda_{Al} \cdot S_{Al}}. \quad (15)$$

Уравнение теплового баланса для элементарного объема dV_4 в пределах 4-го участка подобно уравнению (6), дифференциальное уравнение теплопроводности подобно (7):

$$\frac{d^2T_4}{dx_4^2} = \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{k.k.}}{\lambda_{Al} \cdot S_{k.k.}} \cdot T_4 - \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{k.k.} \cdot \theta_{2B.B.} + Q_2}{\lambda_{Al} \cdot S_{k.k.}}; \quad (16)$$

$$0 \leq x_4 \leq l_4.$$

Уравнение теплового баланса для элементарного объема dV_5 в пределах 5-го участка подобно уравнению (1), дифференциальное уравнение теплопроводности подобно (5):

$$\frac{d^2T_5}{dx_5^2} = \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{p.l.}}{\lambda_{Al} \cdot S_{p.l.}} \cdot T_5 - \frac{\alpha_{t.p.} \cdot \Pi_{p.l.} \cdot \theta_{2B.B.}}{\lambda_{Al} \cdot S_{p.l.}}; \quad (17)$$

$$0 \leq x_5 \leq l_5.$$

При решении системы уравнений теплопроводности (5), (7), (15) – (17) используем граничные условия:

1) условия непрерывности температурного поля и теплового потока

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 \\ \frac{dT_1}{dx_1} &= \frac{dT_2}{dx_2} \end{aligned} \right\} \text{при } x_1 = l_1; \quad \left. \begin{aligned} T_2 &= T_3 \\ \frac{dT_2}{dx_2} &= \frac{dT_3}{dx_3} \end{aligned} \right\} \text{при } x_2 = l_2; \quad \left. \begin{aligned} x_2 &= 0; \\ \frac{dT_2}{dx_2} &= \frac{dT_3}{dx_3} \end{aligned} \right\} \text{при } x_3 = 0;$$

$$\left. \begin{array}{l} T_3 = T_4 \\ \frac{dT_3}{dx_3} = \frac{dT_4}{dx_4} \end{array} \right\} \text{при } x_3 = l_3; \quad \left. \begin{array}{l} T_4 = T_5 \\ \frac{dT_4}{dx_4} = \frac{dT_5}{dx_5} \end{array} \right\} \text{при } x_4 = l_4; \quad x_4 = 0; \quad x_5 = 0.$$

2) условия конвективного теплообмена торцов роторных лопаток. С учетом ранее принятого допущения относительно теплового потока с торцов роторных лопаток, получим:

$$\frac{dT_1}{dx_1} = 0 \text{ при } x_1 = 0; \quad \frac{dT_5}{dx_5} = 0 \text{ при } x_5 = l_5.$$

Решение системы дифференциальных уравнений теплопроводности для всех участков с учетом принятых допущений и граничных условий позволит получить распределение температур вдоль длины ротора, т.е. температурное поле ротора.

Полученная математическая модель была использована при исследовании теплового состояния (поля) асинхронных двигателей АИР160S4 и АИР90В4 [6-9]. Исследования проводились как для стационарного, так и для переходного режимов работы двигателя, а также при разных законах регулирования частоты вращения.

Результаты теоретических исследований были подтверждены экспериментальными исследованиями двигателя АИР90В4, замеры температурного поля которого производились с помощью температурных датчиков установленных в двигателе. Расхождение результатов исследований не превысило шести процентов.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель температурного поля ротора частотно-управляемого асинхронного двигателя на основе дифференциальных уравнений теплопроводности.

2. Следующим этапом исследований будет разработка аналогичной математической модели для статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осташевский Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя в при различных законах регулирования и типах преобразователей [Текст] / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 3. – С. 37-41.
2. Осташевский Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематич. вып. науч-техн. журнала "Электроинформ". – 2009. – С. 266-270.
3. Осташевский Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Вестник НТУ "ХПІ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – 2010. – № 16. – С. 89-102.
4. Петренко А.Н. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания [Текст] // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 21-23.
5. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
6. Осташевский Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных [Текст] / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2010. – № 75. – С. 46-51.
7. Осташевский Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя при изменении нагрузки [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 25-29.

8. Осташевский Н.А. Нагрев частотно-управляемого асинхронного двигателя в перемежающемся режиме [Текст] / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/5 (45). – С. 61-64.

9. Осташевский Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя с помощью метода конечных элементов [Текст] / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 39-42.

Bibliography (transliterated): 1. Ostashevskij N.A. Poteri chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya v pri razlichnyh zakonah regulirovaniya i tipah preobrazovatelej [Tekst] / N.A. Ostashevskij, V.N. Ivanenko, A.N. Petrenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 3. - S. 37-41. 2. Ostashevskij N.A. Matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya v stacionarnykh rezhimakh [Tekst] / N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko // Problemy avtomatizirovannogo `elektroprivoda. Teoriya i praktika. Tematich. vyp. nauch-tehn. zhurnala "Elektroinform". - 2009. - S. 266-270. 3. Ostashevskij N.A. Issledovanie teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh zakonah regulirovaniya [Tekst] / N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko // Vestnik NTU "HPI". Sbornik nauchnyh trudov. Tematicheskij vypusk "Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov". - 2010. - № 16. - S. 89-102. 4. Petrenko A.N. `Ekspperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh istochnikakh pitanija [Tekst] // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - № 5. - S. 21-23. 5. Borisenko A.I. Aerodinamika i teploperedacha v elektricheskikh mashinah / A.I. Borisenko, V.G. Dan'ko, A.I. Yakovlev. - M.: Energiya, 1974. - 560 s. 6. Ostashevskij N.A. Matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya v nestacionarnykh [Tekst] / N.A. Ostashevskij, V.P. Shajda, A.N. Petrenko // Elektromashinobuduvannya ta elektroobladrannya. - 2010. - № 75. - S. 46-51. 7. Ostashevskij N.A. Issledovanie teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya pri izmenenii nagruzki [Tekst] / N.A. Ostashevskij, A.N. Petrenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2010. - № 3. - S. 25-29. 8. Ostashevskij N.A. Nagrev chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya v peremezhayuschemsya rezhime [Tekst] / N.A. Ostashevskij, V.P. Shajda, A.N. Petrenko // Vostochno-europejskij zhurnal peredovyh tehnologij. - 2010. - № 3/5 (45). - С. 61-64. 9. Ostashevskij N.A. Issledovanie teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyayemogo asinhronnogo dvigatelya s pomoshch'yu metoda konechnyh elementov [Tekst] / N.A. Ostashevskij, V.P. Shajda, A.N. Petrenko // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - № 5. - S. 39-42.

Поступила (received) 12.07.2013

Осташевский Николай Александрович¹, к.т.н., проф.,
Шайда Виктор Петрович¹, к.т.н., доц.,
Петренко Александр Николаевич², к.т.н.

¹ Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра "Электрические машины",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: viktorschayda08@rambler.ru

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

Ostashevskiy N.A.¹, Shayda V.P.¹, Petrenko A.N.²

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

² O.M. Bektov Kharkiv National University of Municipal Economy
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Development of a mathematical model for a frequency-controlled asynchronous motor rotor temperature field on the basis of differential equations of heat conduction.

A mathematical model of the temperature field of a frequency-controlled asynchronous motor rotor is made out on the basis of differential equations of heat conduction. The model developed is approved in the course of experimental research on the motors examined.

Key words – frequency-controlled asynchronous motor, method of equivalent thermal charts, thermal field of rotor.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Розроблено Matlab-моделі двох перетворювальних систем електроприводу змінного струму номінальною потужністю 8 MW: одна на основі автономного інвертора струму з відтинаючими діодами, інша – на основі багаторівневого каскадного інвертора напруги. За допомогою віртуального моделювання зіставлені якісні характеристики цих систем.

Разработаны Matlab-модели двух преобразовательных систем электропривода переменного тока номинальной мощностью 8 MW: одна на основе автономного инвертора тока с отсекающими диодами, вторая – на основе многоуровневого каскадного инвертора напряжения. С помощью виртуального моделирования сопоставлены качественные характеристики этих систем.

ВВЕДЕНИЕ

Современный мощный частотно-регулируемый электропривод переменного тока представляет собой электромеханическую систему, включающую в себя силовой электрический преобразователь, называемый преобразователем частоты (ПЧ), асинхронный либо синхронный электродвигатель, исполнительный механизм и управляющее устройство, которое на основе информации, получаемой с помощью датчиков от составляющих элементов электропривода и питающей сети, вырабатывает управляющие сигналы, обеспечивающие движение механической части исполнительного механизма с заданными скоростью и ускорением. Структурная схема электропривода приведена на рис. 1.

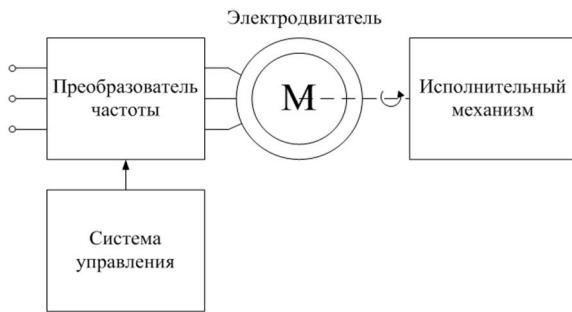


Рис. 1. Структурная схема частотно-регулируемого электропривода

В зависимости от структуры и принципа работы силового полупроводникового коммутатора ПЧ разделяются на два класса:

- преобразователи частоты с непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока).
- преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока.

К преобразователям первого класса относятся непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) на однооперационных тиристорах (Cycloconverter) и матричные преобразователи (Matrix Converter).

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых приводах находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока. Структурная силовая схема таких преобразователей состоит из трех блоков: управляемого или неуправляемого выпрямителя, силового фильтра (емкостного либо индуктивного) в звене постоянного тока и автономного инвертора, преобразующего постоянное напряжение в трехфазное переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды (рис. 2).

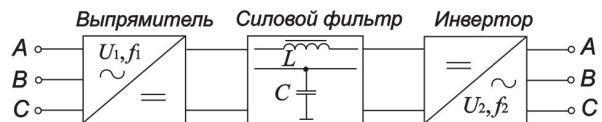


Рис. 2. Структурная схема ПЧ с звеном постоянного тока

В зависимости от типа используемого автономного инвертора преобразователи частоты подразделяются на ПЧ на основе инвертора напряжения (АИНПЧ) и ПЧ на основе инвертора тока (АИТПЧ).

На сегодняшний день топология преобразовательных устройств для частотно-регулируемого электропривода переменного тока имеет значительное количество схемотехнических решений [1-5]. Для высоковольтного электропривода, номинальная мощность которого может достигать нескольких десятков мегаватт, можно выделить два принципиально разных преобразователя, требующих подробного сопоставления – преобразователь частоты на основе автономного инвертора тока с отсекающими диодами (АИТ-ОД) и преобразователь частоты на основе каскадного многоуровневого инвертора напряжения (МУИПЧ).

Сопоставление преобразовательных систем любой сложности может выполняться на этапе проектирования на виртуальных компьютерных моделях. Эволюция средств компьютерного моделирования устройств преобразовательной техники позволяет синтезировать подробные виртуальные модели, способные работать в различных режимах в масштабе реального времени. Качественные характеристики, полученные на таких моделях, позволяют с высокой точностью судить о характере электромагнитных процессов в электромеханической системе.

В данной статье проводится сопоставление двух указанных выше преобразовательных систем электропривода переменного тока путем сравнительного анализа характеристик, полученных с помощью Matlab-моделирования.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ АИТ-ОД

В АИТПЧ автономный инвертор получает питание от источника с большим внутренним сопротивлением – источника тока (то есть, основной элемент силового фильтра в звене постоянного тока – реактор), на выходе инвертора формируется переменный ток в виде последовательности разнополярных трапецидальных импульсов. Первая гармоника такой последовательности должна соответствовать требуемому значению выходного тока. В этом случае для двигателя инвертор

является источником с большим внутренним сопротивлением, то есть источником тока.

Схема автономного инвертора тока с отсекающими диодами получила распространение в мощных приводах переменного тока. Достоинствами схемы являются:

1. Возможность глубокого регулирования скорости вращения вала машины переменного тока (асинхронной или синхронной) при использовании частотных методов регулирования;

2. Возможность возврата (рекуперации) энергии электрической машины в питающую сеть;

3. Использование коммутатора, выполненного на однооперационных тиристорах, что позволяет создавать схемы, рассчитанные на большие токи в ключах.

К недостаткам данной схемы можно отнести использование тиристорного выпрямителя с фазовым регулированием во входной цепи схемы, выполненного, чаще всего, по шестипульсной мостовой схеме, вносящего определенные искажения в сетевой ток и напряжение питающей сети.

Для снижения влияния тиристорного управляемого выпрямителя на питающую сеть, необходимо увеличивать его пульсность. Увеличение пульсности схемы АИТ-ОД также благоприятно сказывается на качестве напряжений и токов машины переменного тока, питаемой от такого преобразователя.

В данной статье рассматривается преобразователь, выполненный по 24-пульсной симметричной схеме, питаемый от трехфазной сети переменного тока, мощностью короткого замыкания 250 MVA и действующим значением линейного напряжения 10 kV, нагруженный на асинхронную машину (АМ), мощностью 8 MW с номинальным действующим значением линейного напряжения статора 10 kV.

Структурная схема такого преобразователя приведена на рис. 3.

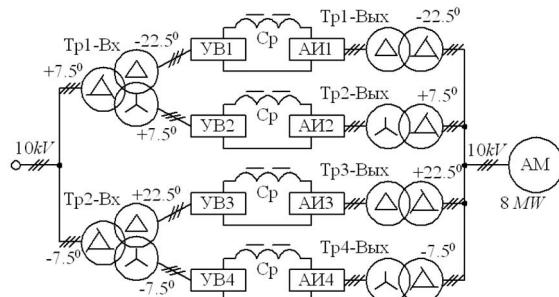


Рис. 3. Структурная схема ПЧ на основе АИТ-ОД

Схемно, структура представляет собой четыре однотипных ячейки мощностью 2 MW, каждая из которых состоит, в свою очередь, из шестипульсного мостового тиристорного управляемого выпрямителя (УВ), питающего через сглаживающий реактор (Др) трехфазную шестипульсную схему автономного инвертора тока с отсекающими диодами (рис. 4).

Номинальное линейное напряжение на входе УВ и выходе АИТ-ОД составляет 690 V, номинальный ток в звене постоянного тока – 2500 A. Ячейки потенциально разделены с входным источником питания и нагрузкой входным и выходным трансформаторами. Трансформаторы, посредством схем соединения обмоток, создают во входной и выходной цепях структуры соответствующий фазовый сдвиг токов ячеек, обеспечивая двадцатичетырехпульсный режим рабо-

ты по входу и выходу.

Для обеспечения 24-пульсного режима работы по входной цепи необходимо обеспечить фазовый сдвиг в 15 эл. град. между трехфазными системами линейных напряжений вентильных обмоток входных трансформаторов, питающих четыре ячейки структуры. Для этого из нескольких возможных вариантов была выбрана симметричная структура, состоящая из двух трехобмоточных трансформаторов, сетевые обмотки которых соединены в зигзаг, обеспечивающий фазовый сдвиг на +7.5 и -7.5 эл. град. соответственно. Одна из двух вентильных обмоток обоих трансформаторов соединена в звезду, а другая – в треугольник. Отметим, что в трансформаторе с фазовым сдвигом зигзага на +7.5 эл. град., треугольник должен иметь фазовый сдвиг -30 эл. град., а в трансформаторе с фазовым сдвигом зигзага на -7.5 эл. град., треугольник должен иметь фазовый сдвиг +30 эл. град. соответственно. В результате на вентильных обмотках в четырех ячейках структуры получаются симметричные трехфазные системы напряжений с фазовым сдвигом относительно сетевого в -22.5, +7.5, +22.5 и -7.5 эл. град. соответственно (см. рис. 3). Очевидно, что данные системы трехфазных напряжений имеют фазовый сдвиг друг относительно друга в 15 эл. град., что обеспечивает 24-пульсный режим работы по входной цепи. Также можно отметить, что выбранный режим питания ячеек имеет фазовые сдвиги, симметричные относительно напряжений питающей сети.

В рамках выбранной структуры вместо двух трехобмоточных трансформаторов можно использовать четыре двухобмоточных с соединением сетевых обмоток в зигзаг, а вентильных – в звезду и треугольник таким образом, чтобы обеспечить системам питания описанный выше фазовый сдвиг.

Схема выходных трансформаторов собрана аналогично входной схеме с тем лишь отличием, что в ней изначально предполагается наличие четырех двухобмоточных трансформаторов, со схемой соединения обмоток, обращенных к АМ, в зигзаг (у двух трансформаторов со сдвигом в +7,5 эл. град., а у двух других в -7,5 эл. град.), а обмоток, обращенных к АИТ-ОД – в звезду или треугольник в соответствии со входной цепью. Входные трансформаторы, как и выходные создают фазовый сдвиг в -22,5, +7,5, +22,5 и -7,5 эл. град. симметричных трехфазных систем напряжений на выходах четырех ячеек АИТ-ОД относительно 3-х фазной системы напряжений на статоре АМ, что обеспечивает эквивалентный 24-пульсный режим работы выходной цепи схемы.

В табл. 1 приведены параметры элементов силовой схемы АИТ-ОД, учет которых необходим для создания MatLab-модели.

В соответствии с описанной выше структурой и параметрами элементов из табл. 1, в программном пакете MatLab/Simulink была составлена модель ПЧ на основе АИТ-ОД с асинхронной машиной номинальной мощностью 8 MW на напряжение 10 kV, приведенная на рис. 5. Модель состоит из четырех основных типов блоков:

1. Блоки силовой схемы (1-24).
2. Блоки подсистем системы управления (25-30).
3. Блоки датчиков и измерительных подсистем (31-38).
4. Блоки измерительных приборов (39, 40).

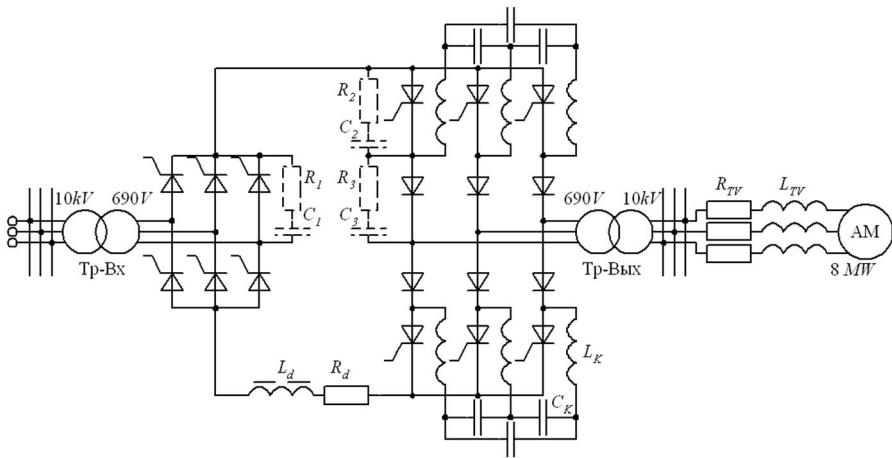


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема ячейки ПЧ на основе АИТ-ОД

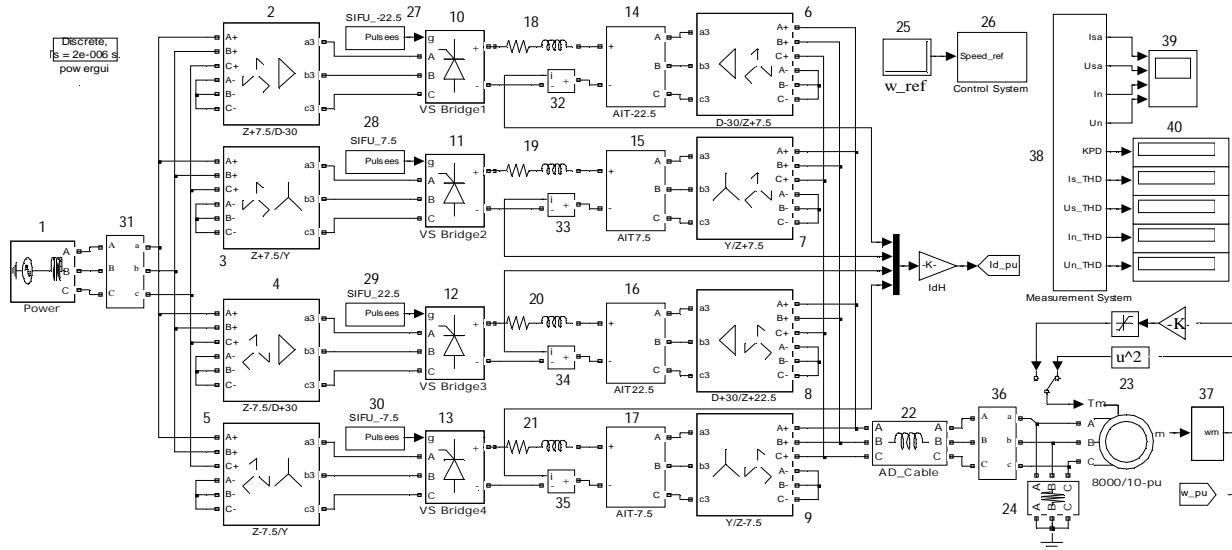


Рис. 5. Matlab-модель ПЧ на основе АИТ-ОД

Блоки (1-24) моделируют элементы силовой схемы АИТ-ОД с учетом указанных в табл. 1 параметров. Отличием модели (рис. 5) от структурной схемы (рис. 3) является наличие четырех двухобмоточных трансформаторов на входе вместо предполагаемых двух трехобмоточных, что обусловлено отсутствием в пакете SimPowerSys моделей трехобмоточных трансформаторов с возможностью задания схемы соединения обмоток в зигзаг. Однако такая замена является вполне допустимой с точки зрения алгоритма работы системы в целом в случае соблюдения необходимого фазового сдвига напряжений вентильных обмоток четырех ячеек относительно входного напряжения.

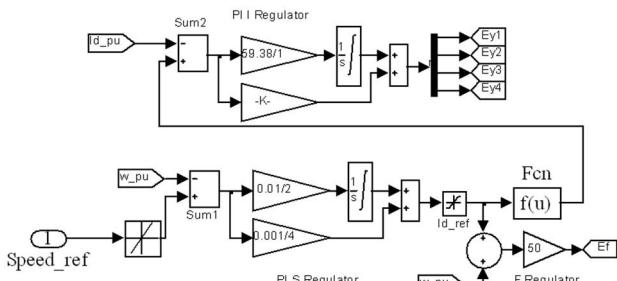


Рис. 6. Matlab-модель скалярной системы автоматического регулирования ПЧ на основе АИТ-ОД

Система автоматического регулирования (САР) преобразователя, предназначенная для осуществления частотного пуска АМ и удержания заданной скорости вращения его вала при заданной величине нагрузки, выполнена по скалярному принципу. Структура скалярной системы автоматического регулирования строится по принципу подчиненного двухинтегрирующего регулятора тока-скольжения, модель которого приведена на рис. 6.

Входным сигналом САР является сигнал задания частоты вращения ротора АМ, поступающий из блока w_ref на задатчик интенсивности, с выхода которого поступает на устройство сравнения Sum1, где из него вычитается сигнал обратной связи датчика угловой скорости ротора АМ. Разностный сигнал поступает на пропорционально-интегральный регулятор скольжения PI_S_Regulator, вырабатывающий сигнал, пропорциональный скольжению двигателя. Выходной сигнал регулятора скольжения, ограниченный на уровне номинально скольжения асинхронной машины (для исследуемой машины — 0.5%), поступает одновременно на два внутренних контура регулирования — регулятор выходной частоты АИТ-ОД и регулятор тока УВ.

Таблица 1
Параметры элементов силовой схемы АИТ-ОД

Параметр	Обозначение	Значение
Питающая сеть		
Действующее значение линейного напряжения	U_s	10000 V
Сетевая частота	f_0	50 Hz
Индуктивность фазы	L_0	1.27 mH
Входной и выходной трансформаторы		
Тип трансформатора	TMII-2500/10Y2	
Номинальная мощность	$S_{ном,тр}$	2.6 MVA
Номинальная частота	$f_{ном}$	50 Hz
Действующее значение номинального линейного напряжения первичной обмотки	U_{1mp}	10000 V
Действующее значение номинального линейного напряжения вентильной обмотки	U_{mpn}	660 V
Мощность короткого замыкания	P_K3	15.5 kVA
Относительное напряжение короткого замыкания	e_K	8 и 3 %
Вентильный комплект		
Количество ячеек преобразователя	k	4
Однооперационные тиристоры выпрямителя:		
Прямое падение напряжения	U_f	1.2 V
Сопротивление снаббера тиристора	R_{ST1}	24.6 Ω
Емкость снаббера тиристора	C_{ST1}	0.1 μF
Динамическое сопротивление прямой ветви ВАХ тиристора	R_{onT1}	0.116 mΩ
Однооперационные тиристоры инвертора:		
Прямое падение напряжения	U_f	1.25 V
Сопротивление снаббера тиристора	R_{SD}	12.3 Ω
Емкость снаббера тиристора	C_{SD}	0.31 μF
Динамическое сопротивление прямой ветви ВАХ тиристора	R_{onD}	0.136 mΩ
Отсекающие диоды:		
Прямое падение напряжения	U_f	1 V
Сопротивление снаббера диода	R_{SD}	24.6 Ω
Емкость снаббера диода	C_{SD}	0.1 μF
Динамическое сопротивление прямой ветви ВАХ диода	R_{onD}	0.08 mΩ
Конденсаторы и реакторы		
Емкость коммутирующего конденсатора	C_K	1.372 mF
Индуктивность токоограничивающего реактора	L_K	7 μH
Индуктивность сглаживающего реактора	L_d	1.5 mH
Активное сопротивление сглаживающего реактора	R_d	1.5 mΩ
Кабельная линия		
Длина кабельной линии	l_{line}	150 m
Омическое сопротивление кабельной линии	R_{line}	0.0526 Ω
Индуктивность кабельной линии	L_{line}	75 μH
Асинхронный двигатель		
Номинальная мощность	P_H	8 MVA
Номинальное линейное напряжение обмоток статора	U_1	10000 V
Резистивное сопротивление обмотки статора	r_1	0.045 Ω
Индуктивность рассеяния обмотки статора	L_1	3 mH
Сопротивление обмотки ротора	r'_2	0.0483 Ω
Индуктивность рассеяния обмотки ротора	L'_2	4.47 mH
Взаимная индуктивность обмоток	L_m	0.153 H
Инерционная постоянная	H	0.4 s
Число пар полюсов	p	1

На входе пропорционального регулятора частоты $F_Regulator$ сигнал задания скольжения суммируется с сигналом обратной связи по угловой скорости ротора АМ. Результирующий сигнал, определяющий задание синхронной скорости АМ, подается на систему управления автономным инвертором, задавая его выходную частоту. Отметим следующее: несмотря на то,

что регулятор частоты АИТ-ОД подчинен регулятору скольжения, выходной сигнал регулятора скольжения не является задающим для регулятора частоты, т.к. на него вводится не отрицательная, а положительная связь по угловой скорости.

Прежде чем поступить на регулятор тока, выходной сигнал регулятора скольжения проходит через функциональный преобразователь Fcn , определяющий задание тока статора I_S в функции абсолютного скольжения S_a . Эта зависимость является нелинейной функцией, которая на рабочем участке механической характеристики АМ отвечает условию $I_S^2 \equiv S_a$. Крайне этих зависимостей симметричны относительно оси тока (задания тока), что определяется симметрией механических характеристик АМ в двигательном и генераторном режимах работы. Коэффициент передачи функционального преобразователя определяется соотношением

$$k_{\Phi\Pi} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{3,T \max}}{U_{3,T \min}}\right)^2 - 1}}{S_{KT}}, \quad (1)$$

где $U_{3,T \max}$ – сигнал, определяющий задание максимального тока статора; $U_{3,T \min}$ – сигнал, определяющий задание минимального тока статора, равного тому холостого хода исследуемой машины; S_{KT} – критическое скольжение АМ.

Выходной сигнал функционального преобразователя поступает на устройство сравнения Sum2, где из него вычитается сигнал обратной связи, полученный от датчика постоянного тока на выходе УВ. Разностный сигнал поступает на пропорционально-интегральный регулятор тока $PI_I_Regulator$,рабатывающий сигнал управления e_U для системы импульсно-фазового управления УВ.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ КАСКАДНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

В силовую схему каскадного многоуровневого инвертора может входить от трех до десяти инверторных ячеек, последовательно включенных в каждую фазу [9]. В качестве исследуемой, на рис. 7 изображена структурная силовая схема электропривода на основе 13-уровневого МУИПЧ и асинхронного двигателя на номинальную мощность 8 MW.

Преобразователь состоит из 18 симметричных инверторных ячеек, по 6 последовательно соединенных ячеек на каждую фазу нагрузки, обеспечивающих на зажимах двигателя действующее значение линейного напряжения 10 kV. Максимальное количество уровней выходного напряжения определяется по соотношению

$$L_{ph} = 2 \cdot k + 1, \quad (2)$$

где k – количество ячеек в фазе.

Схема силовых цепей инверторной ячейки, состоящая из входного трехфазного неуправляемого выпрямителя на диодах $D1-D6$, конденсатора C и выходного однофазного мостового инвертора на транзисторных модулях $T1-T4$, представлена на рис. 8.

Инверторные ячейки запитываются раздельно от соответствующих трехфазных вентильных обмоток фазосдвигающего трансформатора Т (см. рис. 7), соединенных по схеме "зигзаг", что обеспечивает необходимый фазовый сдвиг для каждого уровня выходного напряжения.

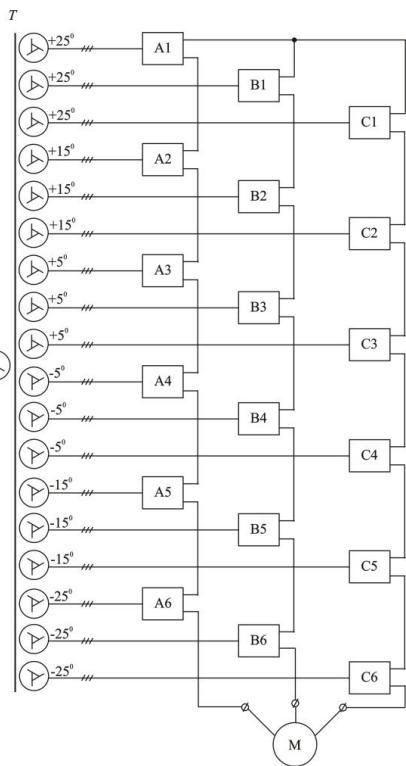


Рис. 7. Структурная силовая схема электропривода на основе МУИПЧ

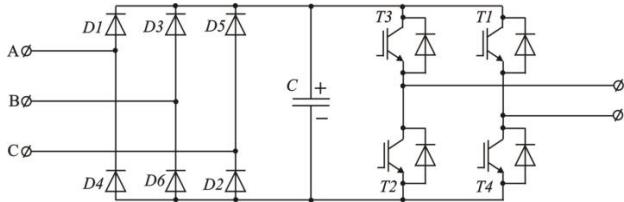


Рис. 8. Схема силовых цепей инверторной ячейки

Наиболее сложным конструктивным элементом силовой схемы МУИПЧ является фазосдвигающий трансформатор T , количество трехфазных вентильных обмоток которого соответствует количеству инверторных ячеек. Первичная обмотка трансформатора соединена по схеме "звезда". Схема соединения вентильных обмоток будет зависеть от количества инверторных ячеек в фазе нагрузки.

Параметры элементов инверторных ячеек, выбираются из соответствующих требований к однофазным инверторам напряжения с учетом мощности нагрузки и соотношений представленных в [10].

В табл. 2. приведены параметры элементов силовой схемы МУИПЧ, учет которых необходим для разработки Matlab-модели.

Matlab-модель электропривода с асинхронным двигателем номинальной мощности $P_H = 8 \text{ МВт}$ на напряжение $U = 10 \text{ кВ}$ с преобразовательной системой на основе 13-уровневого каскадного инвертора напряжения (рис. 9) состоит из четырех основных типов блоков:

1. Блоки силовой схемы (1-23).
2. Блоки подсистем системы управления (24, 25).
3. Блоки измерительных подсистем (32, 33, 40).
4. Блоки измерительных приборов (осциллографов) (41-46).

Таблица 2

Параметр	Обозначение	Значение
Питающая сеть		
Действующее значение линейного напряжения	U_s	10000 V
Сетевая частота	f_0	50 Hz
Индуктивность фазы	L_0	1.27 mH
Многообмоточный фазосдвигающий трансформатор		
Количество первичных трехфазных обмоток	N_{W1}	1
Количество трехфазных вентильных обмоток	N_{W2}	18
Номинальная мощность	$S_{ном,тр}$	8 MVA
Номинальная частота	$f_{ном}$	50 Hz
Действующее значение номинального линейного напряжения первичной обмотки	U_{1mp}	10000 V
Действующее значение номинального линейного напряжения вентильных обмоток	U_{mpn}	962 V
Относительное омическое сопротивление первичной обмотки трансформатора	R_{1*}	0.004
Относительное омическое сопротивление вентильных обмоток трансформатора	R_{n*}	0.004
Относительное значение индуктивности рассеяния вентильных обмоток трансформатора	L_n*	0.08
Инверторная ячейка		
Количество ячеек в фазе преобразователя	k	6
Максимальное количество уровней выходного напряжения	L_{ph}	13
Тип диода неуправляемого выпрямителя		SKKD 701/16
Сопротивление снаббера диода	R_{SD}	100 Ω
Емкость снаббера диода	C_{SD}	0.5 μF
Динамическое сопротивление прямой ветви ВАХ диода	R_{onD}	0.28 mΩ
Пороговое напряжение диода	U_f	1 V
Тип транзисторного модуля		SKM 800GA176D
Сопротивление снаббера модуля	R_{SM}	200 Ω
Емкость снаббера диода	C_{SM}	0.5 μF
Динамическое сопротивление	R_{onM}	1.7 mΩ
Пороговые напряжение на транзисторе и диоде модуля	U_{fT}, U_{fD}	2 V
Время спада и нарастания тока через прибор при переключении	T_f, T_t	0.23 μs, 1.03 μs
Энергия потерь включения транзистора	E_{on}	335 mJ
Энергия потерь выключения транзистора	E_{off}	245 mJ
Энергия потерь переключения обратного диода	E_{rr}	155 mJ
Емкость конденсатора	C	19.5 mF
Частота ШИМ	f_{PWM}	5000 Hz
Кабельная линия		
Длина кабельной линии	l_{line}	150 m
Омическое сопротивление кабельной линии	R_{line}	0.018 Ω
Асинхронный двигатель		
Номинальная мощность	P_H	8 MVA
Номинальное линейное напряжение обмоток статора	U_1	10000 V
Резистивное сопротивление обмотки статора	r_1	0.045 Ω
Индуктивность рассеяния обмотки статора	L_1	3 mH
Сопротивление обмотки ротора	r'_2	0.0483 Ω
Индуктивность рассеяния обмотки ротора	L'_2	4.47 mH
Взаимная индуктивность обмоток	L_m	0.153 H
Инерционная постоянная	H	0.4 s
Число пар полюсов	p	1

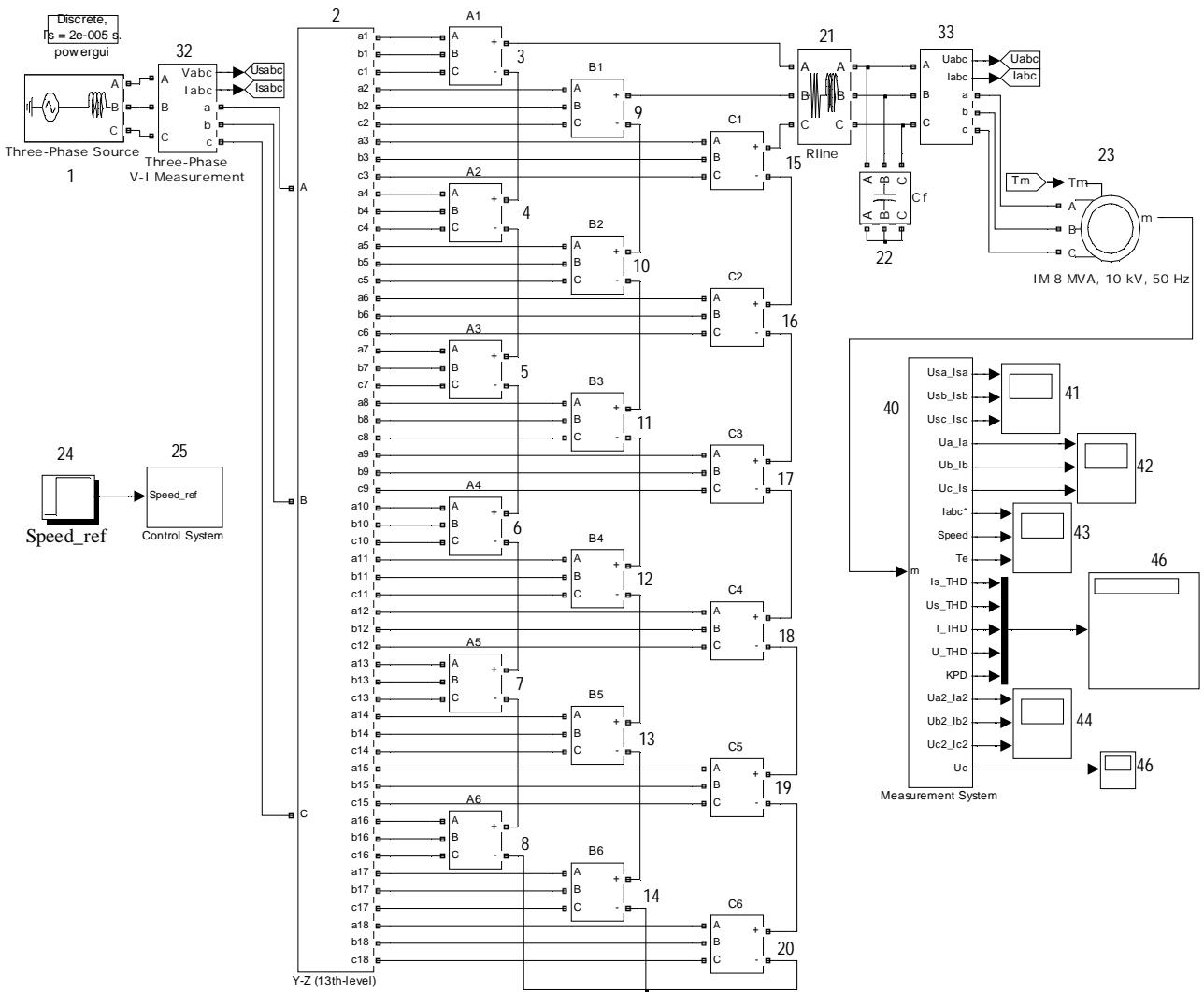


Рис. 9. Matlab-модель электропривода с МУИПЧ

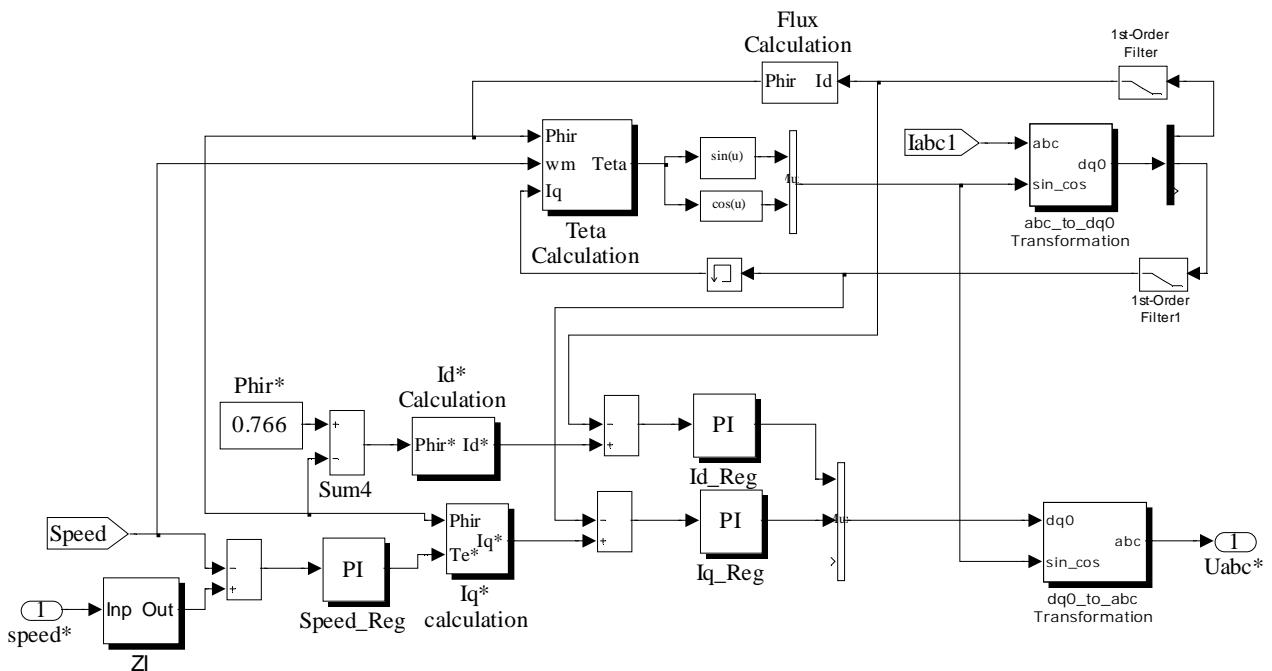


Рис. 10. Matlab-модель векторной системы автоматического регулирования ПЧ на основе МУИН

Блоки (1-23) моделируют элементы силовой схемы МУИПЧ с учетом указанных в табл. 2 параметров. Многообмоточный фазосдвигающий трансформатор (блок 2) выполнен на основе трех симметричных блоков Multi-Winding Transformer библиотеки SimPowerSystems с использованием методики, изложенной в [10].

В системе автоматического регулирования МУИПЧ (рис. 10) использован принцип векторного управления, основанный на регулировании составляющих вектора тока статора, направленных по и перпендикулярно вектору потокосцепления ротора. Систему блока расчета сигналов управления инвертором модели можно представить состоящей из трех узлов: регулятора скорости, регулятора потокосцепления ротора и узла вычисления задания фазных напряжений.

Регулятор скорости представляет собой дискретный ПИ регулятор (блок Speed_Reg), на входы узла сравнения которого (блок Sum) поступают сигналы с выхода задатчика интенсивности speed* и обратной связи по скорости ротора Speed. Регулятор скорости вырабатывает сигнал задания момента Te*.

На вход узла сравнения Sum4 поступают сигналы задания потокосцепления ротора Phir* и сигнал обратной связи по потокосцеплению Phir, рассчитанный в блоке Flux Calculation по соотношению

$$\psi_r = L_{m*} \cdot I_d \cdot H, \quad (3)$$

$$\text{где } H = \frac{1}{1 + T_{r,s}} - \quad (4)$$

– передаточная функция; I_d – составляющая вектора тока обратной связи по оси d ; L_{m*} – относительное значение взаимной индуктивности.

Постоянная времени для передаточной функции вычисляется по соотношению

$$T = \frac{L_{m*} + L'_{2*}}{\omega_0 \cdot r'_{2*}}, \quad (5)$$

где L'_{2*} , r'_{2*} – соответственно относительно приведенные индуктивность рассеяния и резистивное сопротивление ротора при $S = 1$; ω_0 – угловая частота (314 rad/s).

Значения токов обратной связи I_d , I_q получаем при помощи блока abc_to_dq0 Transformation, подавая на его вход сигнал обратной связи по фазным токам статора и рассчитанные в блоке Teta Calculation значения синуса и косинуса угла положения вектора потокосцепления ротора

$$I_q = \frac{2}{3} \cdot \left(i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \right), \quad (6)$$

$$I_d = \frac{2}{3} \cdot \left(i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \right). \quad (7)$$

Угол положения вектора потокосцепления ротора рассчитывается в блоке Teta Calculation

$$\theta = \int (\omega_r + \omega_m) dt, \quad (7)$$

$$\text{где } \omega_r = \frac{L_{m*} \cdot I_q}{T \cdot \psi_r} - \quad (8)$$

– частота вращения ротора; ω_m – механическая ско-

рость ротора.

Значения токов задания I_{d*} , I_{q*} рассчитываются соответственно в блоках Id* Calcultion и Iq* Calculation

$$I_{d*} = \frac{\psi_r}{L_{m*}}, \quad I_{q*} = \frac{(L_{m*} + L'_{2*}) \cdot \psi_r}{L_{m*} \cdot T_{e*}}. \quad (9)$$

Рассчитанные токи управления I_{dreg} , I_{qreg} получаются в блоках Id_reg и Iq_reg, представляющих собой дискретные ПИ регуляторы, на вход которых поступают соответствующие сигналы рассогласования с выходов узлов сравнения Sum1 и Sum2.

Сигналы управления инвертором рассчитываются в блоке dq0_to_abc Transformation, выполняющем обратный переход от системы координат dq0 в систему координат abc

$$\begin{aligned} u_{areg} &= I_{dreg} \cdot \sin \theta + I_{qreg} \cdot \cos \theta, \\ u_{breg} &= 0.5 \cdot \left[\begin{aligned} &(\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) \cdot I_{qreg} - \\ &(-\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) \cdot I_{dreg} \end{aligned} \right], \\ u_{creg} &= -u_{areg} - u_{breg}. \end{aligned} \quad (10)$$

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Характеристики, полученные на Matlab-моделях преобразовательных систем электропривода переменного тока, позволяют произвести качественный анализ их эффективности при разных выходных частотах. На рис. 11,а и рис. 12,а приведены осцилограммы токов и напряжений питающей сети и обмотки статора асинхронной машины с преобразовательной системой на основе АИТ-ОД, снятые для фазы А при выходной частоте 50 и 25 Гц соответственно. Рис. 11,б и рис. 12,б соответствуют модели электропривода с преобразователем на основе МУИПЧ.

Для согласования характеристик обеих преобразовательных систем виртуальный эксперимент на модели с каскадным многоуровневым инвертором напряжения проводился при отключенном выходном $L-C$ фильтре (см. рис. 9). Выходной фильтр, предназначенный для подавления высокочастотной составляющей напряжений на зажимах статорных обмоток электродвигателя, является особенностью конструкции многоуровневого инвертора напряжения и в инверторе тока не используется.

Виртуальные средства SimPowerSystems позволяют производить измерения любых электрических величин и характеристик модели. Качественно сопоставить схемы преобразовательных систем можно с помощью коэффициентов несинусоидальности фазных токов и напряжений питающей сети и обмоток статора асинхронной машины, а также коэффициентов полезного действия преобразовательной системы. Эти данные, снятые при различных выходных частотах работы схем и вентиляторном характере нагрузки приведены в табл. 3 для двух типов преобразователей. При измерении КПД МУИПЧ были учтены динамические потери в силовых полупроводниковых приборах [11].

Из анализа осцилограмм и данных, представленных в табл. 3, можно сделать вывод о практическом равенстве коэффициентов полезного действия обеих преобразовательных систем. Несмотря на то, что КПД многоуровневого инвертора напряжения в основных режимах работы в среднем на 1.8% выше, это преимущество нивелируется при установке выходного высоковольтно-

го фильтра. Однако, как показывают данные табл. 3, установка фильтра все же необходима, в связи с тем, что коэффициент несинусоидальности выходного напряжения МУИПЧ превышает 10%.

Таблица 3

Значения коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений на входе и выходе преобразователя и КПД при изменении частоты на выходе от 15 до 50 Hz: 1 – АИТ-ОД, 2 – МУИПЧ при ШИМ 5000 Hz

Частота на выходе <i>f</i> , Hz	Результаты измерений											
	THD, %								КПД, %			
	<i>I_S</i>		<i>U_S</i>		<i>I_{AM}</i>		<i>U_{AM}</i>					
<i>f</i> , Hz	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
50	1.85	0.54	1.96	0.35	3.48	0.98	5.65	8.94	96.7	96.6		
45	5.08	0.9	4.07	0.28	4.50	2.55	5.74	12.3	96.4	96.4		
40	5.29	0.89	4.40	0.22	4.37	2.63	6.28	12.7	96.1	96.0		
35	5.57	0.94	4.29	0.18	5.37	2.71	11.6	13.2	95.7	95.2		
30	5.52	1.09	3.99	0.16	7.14	5.76	18.0	15.7	94.7	93.5		
25	5.61	1.21	3.61	0.1	8.90	5.94	22.1	19.5	93.4	90.5		
20	5.03	1.68	3.08	0.09	10.5	8.62	26.7	25.8	90.4	85.3		
15	4.34	2.13	2.42	0.06	10.9	9.86	33.5	32.6	83.5	75.2		

Из рис. 11,а видно, что при установленных в модели параметрах АИТ-ОД запас по углу управления выпрямителя в номинальном режиме составляет 6.5 эл. град., что дает возможность понизить напряжение вентильных обмоток преобразовательного трансформатора и тем самым увеличить КПД автономного инвертора тока.

Matlab-модель МУИПЧ позволяет получить вы-

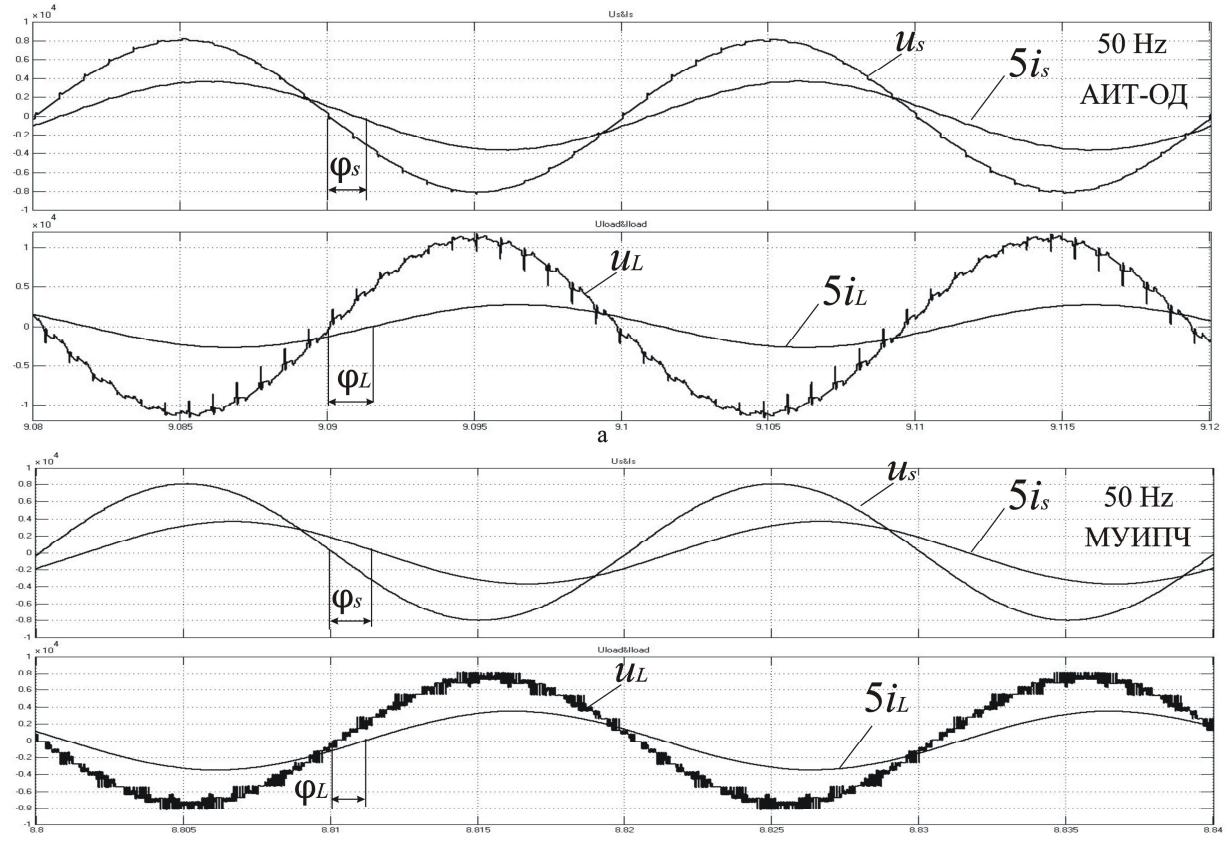
ходные характеристики в случае работы системы управления без ШИМ. Такой режим целесообразен при работе асинхронного двигателя вnomинальном режиме и неглубоком регулировании напряжения на его зажимах. В этом случае необходимость в установке выходного фильтра отпадает.

В табл. 4 приведено сопоставление результатов расчета коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений, а также КПД преобразовательной системы на основе АИТ-ОД с преобразовательной системой на основе МУИПЧ, работающей без ШИМ. Как видно из табл. 4, несмотря на стабильно высокий КПД, эффективная работа МУИПЧ без ШИМ возможна лишь в незначительном диапазоне изменения выходной частоты. Коэффициенты несинусоидальности входного и выходного тока, а также выходного напряжения ниже у инвертора тока во всем диапазоне изменения частоты.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны две Matlab-модели частотно-регулируемых приводов мощностью 8 MVA: с преобразователем частоты на базе автономного инвертора тока с отсекающими диодами; с преобразователем частоты на базе 13-уровневого каскадного инвертора напряжения, позволяющие исследовать работу систем электропривода при широком диапазоне изменения параметров преобразователей.

2. В виртуальном эксперименте определены КПД и коэффициенты несинусоидальности (THD) входных и выходных токов и фазных напряжений двух систем



б

Рис. 11. Осциллографмы токов и напряжений питающей сети и обмотки статора АМ при частоте 50 Hz

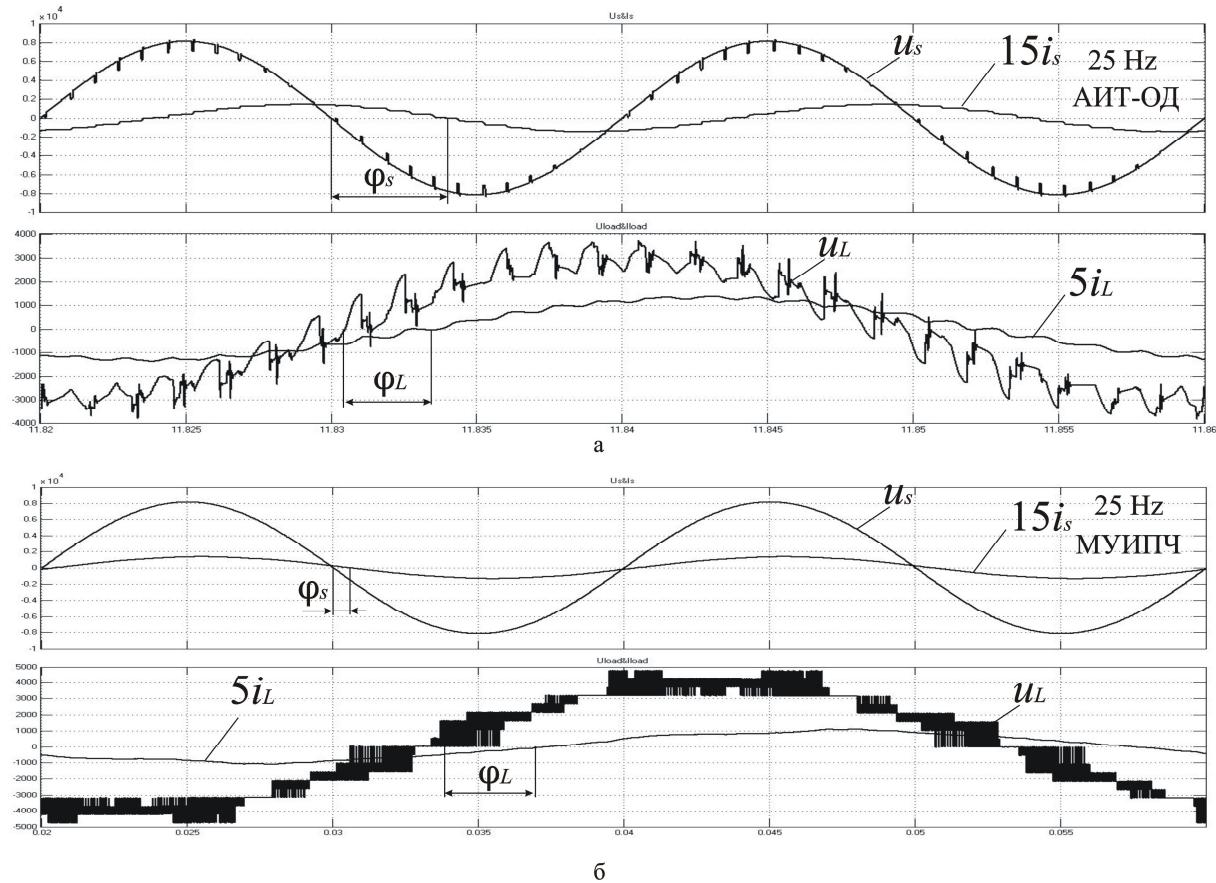


Рис. 12. Осциллограммы токов и напряжений питающей сети и обмотки статора АМ при частоте 25 Hz

электроприводов в широком диапазоне изменения выходных частот.

Таблица 4

Значения коэффициентов несинусоидальности токов и напряжений на входе и выходе преобразователя и КПД при изменении частоты на выходе от 15 до 50 Hz: 1 – АИТ-ОД, 2 – МУИПЧ без ШИМ

Частота на выходе <i>f</i> , Hz	Результаты измерений									
	THD, %								КПД, %	
	<i>I_S</i>		<i>U_S</i>		<i>I_{AM}</i>		<i>U_{AM}</i>			
<i>f</i> , Hz	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
50	1.85	3.21	1.96	0.84	3.48	4.14	5.65	7.6	96.7	97.0
45	5.08	3.88	4.07	0.64	4.50	6.55	5.74	8.55	96.4	97.8
40	5.29	4.2	4.40	0.49	4.37	7.33	6.28	9.77	96.1	98.1
35	5.57	5.2	4.29	0.42	5.37	8.94	11.6	16.9	95.7	97.8
30	5.52	6.63	3.99	0.32	7.14	12.9	18.0	25.8	94.7	96.9
25	5.61	7.06	3.61	0.21	8.90	16.3	22.1	29.2	93.4	94.9
20	5.03	8.27	3.08	0.14	10.5	17.9	26.7	33.8	90.4	89.6
15	4.34	22.1	2.42	0.08	10.9	18.7	33.5	48.5	83.5	67.3

3. Сравнение экспериментальных результатов, совпадающих при частоте 50 Hz с проведенными расчетами, показывает, что КПД обеих систем электропривода практически одинаковы.

4. Экспериментальные значения коэффициентов несинусоидальности выходных токов ниже в схеме на базе многоуровневого инвертора, что объясняется его более высокой эквивалентной пульсностью – 36 против 24 в схеме на базе автономного инвертора тока. МУИПЧ с ШИМ оказывает меньшее влияние на форму сетевых напряжений и токов, чем АИТ-ОД.

5. Коэффициенты несинусоидальности тока и напряжения статора системы электропривода на базе автономного инвертора тока при частоте 50 Hz не превышает 3.48% и 5.65% соответственно, а в системе на базе многоуровневого каскадного инвертора напряжения 0.98% и 8.94% соответственно. Однако при уменьшении частоты эти коэффициенты возрастают.

6. Результаты моделирования получены для конкретных исходных данных. При других параметрах элементов силовых схем требуется внесение изменений в соответствующие таблицы значений и повторное выполнение виртуального эксперимента. Практический интерес представляют результаты для номинального режима работы асинхронного двигателя при частоте 50 Гц. Данные, полученные на Matlab-моделях при других частотах, позволяют оценить степень снижения КПД и повышение коэффициентов несинусоидальности при выходе из номинального режима.

7. Эксперимент на Matlab-модели АИТ-ОД показал возможность увеличения КПД преобразовательной системы с заданными параметрами путем оптимизации номинальных напряжений вентильных обмоток входных трансформаторов.

8. Более высокая стоимость МУИПЧ, необходимость в установке выходного высоковольтного фильтра и сложная конструкция силового трансформатора в некоторой степени компенсируются простотой обслуживания и ремонта вентильной схемы, связанной с однотипностью модульной конструкции преобразователя. По сравнению со схемой МУИПЧ, силовая схема АИТ-ОД отличается большей простотой и надежностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Rodriguez, J.S. Lai and F.Z. Peng. "Multilevel inverters: A survey of topologies, control and applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, Aug. 2002, pp. 724-738.
 2. L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon S. Kouro, R. Portillo and M. A. M. Prats. "The age of multilevel converters arrives", IEEE Ind. Electron., Mag., vol. 2, Jun. 2008, pp.28-39.
 3. R.D. Klug and Klaassen."High power medium voltage drives – Innovation, portfolio, trends", in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., 2005, p.p. 1-10.
 4. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J.O. Ponu, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drivers", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, Dec. 2007, pp. 2930-2945.
 5. J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, and M.A. Perez. "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications", Proc. IEEE, vol. 97, no. 11, Nov. 2009, pp. 1786-1819.
 6. S. Kouro, M. Malinovski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, J. L. Leon. "Resent advances and industrial applications of multilevel converters", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no.8, Aug. 2010, pp. 2084-2096.
 7. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 43-46.
 8. Шавелкин А.А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения // Электротехника. – 2005. – № 11.
 9. Malinovski M., Gopakumar K., Rodrigues J., Marselo A.P. "A survey on cascaded multilevel inverters". IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, July. 2010, p.p. 2197-2206.
 10. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Титаренко И.Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 2. – С. 32-39.
 11. Жемеров Г.Г., Ивахно В.В., Ковалчук О.И. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 4. – С. 21-28.
- Bibliography (transliterated):** 1. J. Rodriguez, J.S. Lai and F.Z. Peng. "Multilevel inverters: A survey of topologies, control and applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, Aug. 2002, pp. 724-738.
2. L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon S. Kouro, R. Portillo and M. A. M. Prats. "The age of multilevel converters arrives", IEEE Ind. Electron., Mag., vol. 2, Jun. 2008, pp.28-39. 3. R.D. Klug and Klaassen."High power medium voltage drives – Innovation, portfolio, trends", in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., 2005, p.p. 1-10. 4. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J.O. Ponu, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drivers", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, Dec. 2007, pp. 2930-2945.
5. J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, and M.A. Perez. "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications", Proc. IEEE, vol. 97, no. 11, Nov. 2009, pp. 1786-1819. 6. S. Kouro, M. Malinovski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, J. L. Leon. "Resent advances and industrial applications of multilevel converters", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no.8, Aug. 2010, pp. 2084-2096. 7. Donskoj H., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. Mnogourovnye avtonomnye invertory dlya elektroprivoda i elektroenergetiki // Silovaya elektronika. - 2008. - № 1. - S. 43-46. 8. Shavelkin A.A. Variant shemy mnogourovnyego preobrazovatelya chastoty dlya elektroprivoda srednego napryazheniya // Elektrotehnika. - 2005. - № 11. 9. Malinovski M., Gopakumar K., Rodrigues J., Marselo A.P. "A survey on cascaded multilevel inverters". IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, July. 2010, p.p. 2197-2206. 10. Zhemerov G.G., Tugay D.V., Titarenko I.G. Modelirovaniye elektroprivoda peremennogo toka s kaskadnym mnogourovnyem invertorom napryazheniya // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2013. - № 2. - S. 32-39. 11. Zhemerov G.G., Ivahno V.V., Koval'chuk O.I. Raschet moschnosti poter' i temperatury struktury tranzistoro-diodynych modulej pri kompyuternom modelirovaniu preobrazovatelej // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - № 4. - S. 21-28.

Поступила (received) 03.06.2013

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,

Крылов Денис Сергеевич¹, к.т.н., доц.,

Ильина Ольга Владимировна¹, к.т.н., доц.,

Тугай Дмитрий Васильевич², к.т.н., доц.,

Титаренко Игорь Григорьевич³, ст. науч. сотр.

Бару Александр Юрьевич³, к.т.н., ст. науч. сотр.

Шинднес Юрий Львович³, к.т.н., ст. науч. сотр.

¹ Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт",

кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел., факс/phone, fax: +38 057 7076312,

e-mail: zhemerov@gmail.com

² Харьковский национальный университет

городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,

кафедра "Теоретическая и общая электротехника"

61002, Харьков, ул. Революции, 12,

тел./phone: +38 057 7073111, e-mail: tugaydv@yandex.ru

³ Научно-производственное предприятие "ЭОС",

61038, Харьков, ул. Академика Павлова, 82,

тел., факс/phone, fax: +38 057 7380439,

e-mail: inquiry@eos.kharkov.org

Zhemerov G.G.¹, Krylov D.S.¹, Ilyina O.V.¹, Tugay D.V.², Titarenko I.G.³, Baru A.U.³, Shindnes U.L.³

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

² O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy

12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

³ Scientific Production Enterprise EOS Ltd.

82, Ac. Pavlov Str., Kharkiv, 61038, Ukraine

Comparison of converter systems for a high-voltage variable-frequency ac drive.

Matlab-models of two converter systems of an 8 MW AC drive are developed, one based on a self-contained current inverter with cut-off diodes, the other based on a multilevel cascade voltage inverter. By applying virtual simulation, qualitative characteristics of these systems are compared.

Key words – 24-pulses current inverter, cascade multilevel inverter, AC drives, Matlab-model, efficiency.

МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИГНАТУР МАГНИТНОЙ ІНДУКЦІЇ

Розглядаються теоретичні аспекти способу експериментального визначення залишкового та індуктивного магнітних моментів технічного об'єкта. В якості початкових даних використано сигнатури магнітної індукції технічного об'єкта, які отримані при його лінійному переміщенні поблизу пари трьохкомпонентних датчиків. Пропонується спосіб інтегрування магнітних сигнатур, заснований на просторовому гармонічному аналізу магнітного поля, представленого двадцятьма чотирма мультипольними коефіцієнтами.

Рассматриваются теоретические аспекты способа экспериментального определения индуктивного и остаточного магнитных моментов технического объекта. В качестве исходных данных использованы сигнатуры магнитной индукции технического объекта, полученные при его линейном перемещении вблизи пары трехкомпонентных датчиков. Предлагается способ интегрирования магнитных сигнатур, основанный на пространственном гармоническом анализе магнитного поля, представленного двадцатью четырьмя мультипольными коэффициентами.

ВВЕДЕНИЕ

Для различных технических объектов (ТО) величина магнитного момента является их паспортной характеристикой, что обуславливает необходимость ее экспериментального определения. Применение для этих целей магнитометрических методов основано на измерении различных характеристик внешнего магнитного поля ТО: магнитной индукции, магнитного потока, либо градиента магнитной индукции. При этом магнитный момент (ММ) как магнитную характеристику источника поля получают математической обработкой данных измерений характеристик магнитного поля (МП) и геометрических параметров измерительной системы [1-3]. Сложность проведения таких измерений и необходимость использования измерительных систем на специализированных магнитометрических стендах обуславливается существенным отличием распределения МП вблизи большинства ТО от распределения магнитного поля магнитного диполя. Тем самым задача измерения ММ сводится к задаче выделения и определения вклада дипольной составляющей из внешнего МП ТО. С этой целью внешнее МП ТО моделируют таким образом, чтобы используемые в модели параметры, характеризующие дипольный магнитный момент, могли быть выделены и определены с помощью специализированной измерительной системы и последующей математической обработкой полученных результатов.

Подходы, использованные при построении модели магнитного поля ТО и создании измерительных систем, определяют методическую погрешность измерения ММ. Наиболее жесткие требования по точности определения ММ предъявляются к магнитным моментам комплектующих космических аппаратов для межпланетных исследований и геофизических спутников Земли. Это вызвано задачей [3] обеспечения их "магнитной частоты" – исключения влияния МП, созданного космическим аппаратом, на прецизионные бортовые магнитоизмерительные системы. Практика решения таких задач требует постоянного повышения точности измерения ММ, как величины, характеризующей интенсивность источника МП.

Целью работы является разработка метода экспериментального определения индуктивного и остаточного магнитных моментов ТО на основе интегральной обработки сигнатур проекций магнитной индукции.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Примем значение относительной магнитной проницаемости воздуха равным единице, тогда для магнитной индукции в воздухе, упрощается связь с напряженностью магнитного поля [4] и его скалярным потенциалом согласно выражению:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = -\mu_0 g \text{rad}U. \quad (1)$$

Будем использовать самую общую модель внешнего магнитного поля технического объекта, скалярный потенциал U которого описывается суммой мультипольных магнитных моментов [5] в виде:

$$U(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{1}{r^{n+1}} P_n^m(\cos \theta) \begin{cases} g_n^m \cos m\varphi \\ h_n^m \sin m\varphi \end{cases}, \quad (2)$$

где r, θ, φ – сферические координаты точки наблюдения магнитного поля, $P_n^m(\cos \theta)$ – присоединенные функции Лежандра, g_n^m, h_n^m – мультипольные коэффициенты, характеризующие мультипольный магнитный момент порядка n .

Сравнивая (2) с известным выражением [4] скалярного потенциала магнитного момента M магнитного диполя:

$$U(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \left(\vec{M}, \frac{\vec{r}}{r^3} \right), \quad (3)$$

получим простые соотношения для дипольных коэффициентов из (1):

$$g_1^1 = M_x, \quad h_1^1 = M_y, \quad g_1 = M_z. \quad (4)$$

Воспользуемся свойством быстрого убывания при удалении от источника вкладов в сумму из (2) от мультипольных магнитных моментов старших порядков и ограничим количество рассматриваемых в модели мультипольных магнитных моментов четвертым порядком ($n \leq 4$).

ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАТУР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Предлагаемый способ определения магнитного момента основан на измерении сигнатур трех проекций магнитной индукции в двух точках, равноудаленных на расстояние R от пути перемещения ТО (см. рис. 1, 2). При этом трехкомпонентные "точечные" датчики магнитной индукции располагают в плоскости XOZ подвижной системы координат, связанной с центром ТО, перемещаемого в положительном направлении оси аппликат.

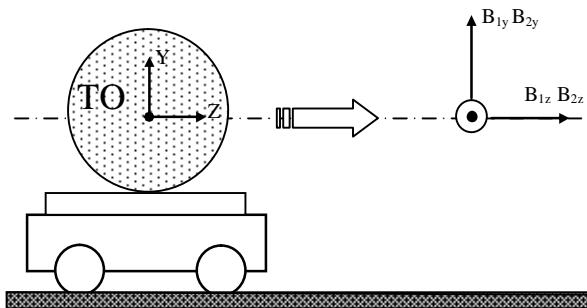


Рис. 1. Схема измерения сигнатур трех проекций магнитной индукции в двух симметричных относительно пути перемещения точках (вид с боку пути перемещения)

Для такого выбора системы отсчета сферические координаты точек 1 и 2 расположения датчиков связаны следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \eta_1 = r_2 = r &= \sqrt{z^2 + (R)^2}; \\ \cos \theta_1 = \cos \theta_2 = \cos \theta &= \frac{z}{r}; \\ \varphi_1 = 0; \varphi_2 &= \pi \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно схеме измерений, исходными данными о магнитном поле объекта являются шесть сигнатур проекций магнитной индукции, полученные в точках 1 и 2 при перемещении ТО по оси аппликат на интервале $z \in [z_{\text{нач}}, z_{\text{кон}}]$.

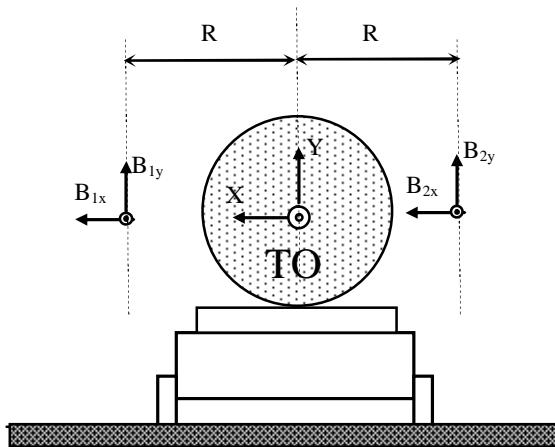


Рис. 2. Схема измерения сигнатур трех проекций магнитной индукции в двух симметричных относительно пути перемещения точках (вид со стороны датчиков)

Используя (1) и известные [4] формулы преобразования декартовых проекций магнитной индукции, получим сигнатуры сферических проекций напряженности $H(z)$ магнитного поля (см. рис. 2) в виде набора данных на основе выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_r(z) = \frac{1}{\mu_0} \left[B_x(z) \sin \theta \cos \varphi + B_y(z) \sin \theta \sin \varphi + B_z(z) \cos \theta \right] \\ H_\varphi(z) = \frac{1}{\mu_0} \left[-B_x(z) \sin \varphi + B_y(z) \cos \varphi \right] \end{array} \right. . \quad (6)$$

Для последующего интегрирования $H(z)$ зависимостей сферических проекций напряженности магнитного поля, полученных в (6), преобразуем их на основании (5) в $H(\theta)$ для интервала θ от 0 до π в которых $H(0)=H(\pi)=0$, интерполируя (рис. 3) недостающие на краях значения поля функциональной зависимостью $k[\sin(\theta)]^3$, аналогично процедуре, описанной в [6].

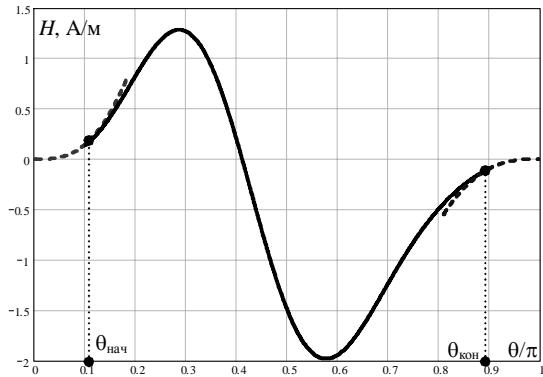


Рис. 3. Интерполяция начала и конца проходной характеристики $H_r(\theta)$

Таким образом, в результате предварительной математической обработки измеренных сигнатур магнитной индукции мы получили функциональные зависимости напряженности магнитного поля от угловой координаты θ , которые используем для нахождения дипольных коэффициентов из (4).

РАСЧЕТ ДИПОЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Рассмотрим способ интегральной обработки сигнатур сферических проекций $H(\theta)$ напряженности магнитного поля, экспериментально полученных и интерполированных на интервале $\theta \in [0, \pi]$. В каждой из точек измерений 1 и 2 согласно (2) будут измерены суммарные значения магнитного поля, состоящего из вкладов от всех двадцати четырех мультипольных коэффициентов, используемых нами в модели МП ТО. Для уменьшения количества членов ряда (2), вносящих свой вклад в сигнатуру МП произведем суммирование и вычитание соответствующих проекций $H(\theta)$ полученных в точках 1 и 2, согласно выражениям:

$$\begin{aligned} H_{1r}(\theta) + H_{2r}(\theta) &= \frac{4(\sin \theta)^3}{R^3} P_1 (\cos \theta) g_1^0 + \\ &+ \frac{6(\sin \theta)^4}{R^4} \left(P_2 (\cos \theta) g_2^0 + P_2^2 (\cos \theta) g_2^2 \right) + \\ &+ \frac{8(\sin \theta)^5}{R^5} \left(P_3 (\cos \theta) g_3^0 + P_3^2 (\cos \theta) g_3^2 \right) + \\ &+ \frac{10(\sin \theta)^6}{R^6} \left(P_4 (\cos \theta) g_4^0 + \right. \\ &\left. + P_4^2 (\cos \theta) g_4^2 + P_4^4 (\cos \theta) g_4^4 \right) \end{aligned} , \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
H_{1r}(\theta) - H_{2r}(\theta) &= \frac{4(\sin \theta)^3}{R^3} P_1^1(\cos \theta) g_1^1 + \\
&+ \frac{6(\sin \theta)^4}{R^4} P_2^1(\cos \theta) g_2^1 + \\
&+ \frac{8(\sin \theta)^5}{R^5} (P_3^1(\cos \theta) g_3^1 + P_3^3(\cos \theta) g_3^3) + , \quad (7) \\
&+ \frac{10(\sin \theta)^6}{R^6} (P_4^1(\cos \theta) g_4^1 + P_4^3(\cos \theta) g_4^3) \\
H_{1\phi}(\theta) - H_{2\phi}(\theta) &= -\frac{2(\sin \theta)^2}{R^3} P_1^1(\cos \theta) h_1^1 - \\
&- \frac{2(\sin \theta)^3}{R^4} P_2^1(\cos \theta) h_2^1 - \frac{2(\sin \theta)^4}{R^5} P_3^1(\cos \theta) h_3^1 - \\
&- \frac{6(\sin \theta)^4}{R^5} P_3^3(\cos \theta) h_3^3 - \frac{2(\sin \theta)^5}{R^6} P_4^1(\cos \theta) h_4^1 - \\
&- \frac{6(\sin \theta)^5}{R^6} P_4^3(\cos \theta) h_4^3 . \quad (8)
\end{aligned}$$

Как видно из (6-8), суммирование сигнатур, полученных в точках 1 и 2, приводит к исключению мультипольных коэффициентов с нечетными значениями m , а соответствующая разница проходных характеристик не содержит вклады от мультипольных коэффициентов с четными m . Это позволяет воспользоваться свойством частичной ортогональности [7-9] произведений полиномов Лежандра и функции от θ на интервале $\theta \in [0, \pi]$. Для чего обозначим через G_1 , G_2 , G_3 значения интегралов от произведения суммарной сигнатуры (6) для проекций $H(\theta)$, полученных в точках 1 и 2, и предлагаемых селектирующих функций:

$$\frac{P_1^0(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2}; \quad \frac{P_3^0(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2}; \quad \frac{P_3^2(\cos \theta)}{(\sin \theta)^4} . \quad (9)$$

Тем самым выделим вклады мультипольных g -коэффициентов с нечетными значениями n и четными значениями m .

Тогда три интеграла G_1 , G_2 , G_3 примут вид:

$$G_1 = \int_0^\pi (H_{1r}(\theta) + H_{2r}(\theta)) \frac{P_1^0(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2} d\theta , \quad (10)$$

$$G_2 = \int_0^\pi (H_{1r}(\theta) + H_{2r}(\theta)) \frac{P_3^0(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2} d\theta , \quad (11)$$

$$G_3 = \int_0^\pi (H_{1r}(\theta) + H_{2r}(\theta)) \frac{P_3^2(\cos \theta)}{(\sin \theta)^4} d\theta . \quad (12)$$

Произведя расчет (10-12) для нахождения коэффициента g_1 получим выражение:

$$g_1^0 = \frac{3R^3}{88} \left(-5G_1 + 9G_2 - \frac{16}{15} G_3 \right) . \quad (13)$$

Поступим аналогичным образом для нахождения коэффициента g_1^1 . Для чего найдем значения интегра-

лов G_1^1 , G_2^1 , G_3^1 от произведения разностной сигнатуры (7) для проекций $H(\theta)$, полученных в точках 1 и 2, и предлагаемых селектирующих функций:

$$\frac{P_1^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)^4}; \quad \frac{P_3^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2}; \quad \frac{P_3^3(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2} . \quad (14)$$

При этом будут выделены вклады мультипольных g -коэффициентов с нечетными значениями n и нечетными значениями m .

Получим три выражения для G_1^1 , G_2^1 , G_3^1 :

$$G_1^1 = \int_0^\pi (H_{1r}(\theta) - H_{2r}(\theta)) \frac{P_1^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)^4} d\theta , \quad (15)$$

$$G_2^1 = \int_0^\pi (H_{1r}(\theta) - H_{2r}(\theta)) \frac{P_3^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2} d\theta , \quad (16)$$

$$G_3^1 = \int_0^\pi (H_{1r}(\theta) - H_{2r}(\theta)) \frac{P_3^3(\cos \theta)}{(\sin \theta)^2} d\theta . \quad (17)$$

Найдя значения G_1^1 , G_2^1 , G_3^1 в (15-17), получим выражение для g_1^1 :

$$g_1^1 = \frac{5R^3}{32} \left(-12G_1^1 + 7G_2^1 - \frac{7}{5} G_3^1 \right) . \quad (18)$$

Для нахождения коэффициента h_1^1 воспользуемся разностной сигнатурой (8) и предлагаемыми селектирующими функциями:

$$\frac{P_1^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)^3}; \quad \frac{P_3^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)}; \quad \frac{P_3^3(\cos \theta)}{(\sin \theta)} . \quad (19)$$

Интегрирование оставит в результатах вклады от мультипольных h -коэффициентов с нечетными значениями n и нечетными значениями m .

При этом тройка интегралов I_1 , I_2 , I_3 будет иметь вид:

$$I_1 = \int_0^\pi (H_{1\phi}(\theta) - H_{2\phi}(\theta)) \frac{P_1^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)^3} d\theta , \quad (20)$$

$$I_2 = \int_0^\pi (H_{1\phi}(\theta) - H_{2\phi}(\theta)) \frac{P_3^1(\cos \theta)}{(\sin \theta)} d\theta , \quad (21)$$

$$I_3 = \int_0^\pi (H_{1\phi}(\theta) - H_{2\phi}(\theta)) \frac{P_3^3(\cos \theta)}{(\sin \theta)} d\theta . \quad (22)$$

Для расчета значения коэффициента h_1^1 воспользуемся представлением:

$$h_1^1 = \frac{R^3}{16} \left(60I_1 - 35I_2 + 7I_3 \right) . \quad (23)$$

Таким образом, предложенный способ получения и интегрирования шести проходных характеристик магнитной индукции позволяет определять по (13), (14) и (23) все три дипольных коэффициента в (4) из двадцати четырех мультипольных коэффициентов в (2), описывающих МП ТО с помощью модели, для которой $n \leq 4$.

Следует иметь в виду, что найденные таким способом проекции магнитного диполя соответствуют суммарному (индуктивному и остаточному) магнитному моменту ТО, если измерения сигнатур магнит-

ной индукции проводились в ненулевом внешнем магнитном поле (например, в магнитном поле Земли).

Для разделения вкладов индуктивного и остаточного магнитных моментов необходимо произвести дополнительные измерения сигнатур магнитной индукции ТО в нулевом внешнем магнитном поле, что требует использования специализированного магнитоизмерительного стенда. После чего разность результатов для дипольного момента при наличии внешнего поля с соответствующими проекциями остаточного магнитного момента, непосредственно получаемого в нулевом поле, даст значения индуктивного магнитного момента.

Альтернативным подходом, не требующим использования магнитоизмерительного стендса, может быть применение рекомендаций стандарта [1]. Согласно стандарту Европейского космического агентства индуктивный и остаточный магнитные моменты ТО могут быть получены дополнительными измерениями в том же внешнем магнитном поле, но при переориентированном на 180° градусов положении объекта. Переориентацию производят таким образом, чтобы для каждой из пространственных осей объекта производилась пара измерений: при сонаправленном положении и противонаправленном. Тогда три декартовые проекции индуктивного магнитного момента находят как полусуммы результатов измерений соответствующих проекций, а проекции остаточного магнитного момента находят как их полуразность.

ВЫВОДЫ

Проверка предлагаемого метода с помощью компьютерного моделирования показала целесообразность выбора значений для расстояния R от пути перемещения до точек установки датчиков магнитной индукции в пределах одного габаритного размера исследуемого объекта. При этом удлинение пути перемещения до значений более десяти R не приводит к заметному повышению точности расчета магнитного момента технического объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ECSS-E-HB-20-07A "Space engineering: Electromagnetic compatibility handbook" ESA-ESTEC. Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands. – 2012. – 28 p.
2. Kildishev A.V., Volokhov S.A., Saltykov J.D. Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters // IEEE SYSTEMS READINESS TECHNOLOGY CONFERENCE (AUTOTESTCON'97). – Anaheim (California). – 1997. – P. 669-675.
3. Розов В., Гетьман А., Петров С., Ерисов А., Меланченко А., Хорошилов В., Шмидт И. Магнетизм космических аппаратов // Техническая электродинамика. – 2010. – Тематический выпуск. Ч.2. Проблемы сучасної електротехніки. – С. 144-147.

4. Smythe W. Static and Dynamic Electricity., Publisher: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p.
5. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 774 с.
6. Гетьман А.В. Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта // Электричество. – 2005. – №1. – С. 55-60.
7. Гобсон Е.В. Теория сферических и эллипсоидальных функций. – М.: Наука, 1952. – 476 с.
8. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.
9. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Дополнительные главы. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 800 с.

Bibliography (transliterated): 1. ECSS-E-HB-20-07A "Space engineering: Electromagnetic compatibility handbook" ESA-ESTEC. Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands. – 2012. – 228 p. 2. Kildishev A.V., Volokhov S.A., Saltykov J.D. Measurement of the Spacecraft Main Magnetic Parameters // IEEE SYSTEMS READINESS TECHNOLOGY CONFERENCE (AUTOTESTCON'97). – Anaheim (California). – 1997. – P. 669-675. 3. Rozov V., Getman A., Petrov S., Ericov A., Melanchenko A., Horoshilov V., Shmidt I. Magnetizm kosmicheskikh apparatov // Tehnicheskaya elektrodinamika. – 2010. – Tematicheskiy vypusk. Ch.2. Problemy suchsnoi elektrotehniki. – S. 144-147. 4. Smythe W. Static and Dynamic Electricity, Publisher: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p. 5. Shimon K. Teoreticheskaiia elektritehnika. – M.: Mir, 1964. – 774 s. 6. Getman A.V. Opredelenie prostranstvennyh garmonik magnitnogo polia vblizi poverhnosti tekhnicheskogo obekta // Elektrichestvo. – 2005. – № 1. – S. 55-60. 7. Gobson E.V. Teoria sfericheskikh i ellipsoidalnyh funkciy. – M.: Nauka, 1952. – 476 s. 8. Gradshtein I.S., Ryjik I.M. Tablitsy integralov summ, riadov i proizvedeniij. – M.: Fizmatgiz, 1963. – 1100 s. 9. Prudnikov A.P. Integraly i riady. Dopolnitelnye glavy. – M.: Nayka, Glavnaia redakcia fiziko-matematicheskoi literatury, 1986. – 800 s.

Поступила (received) 20.06.2013

Гетьман Андрей Владимирович, к.т.н., с.н.с.

Научно-технический центр магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины,
61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,
тел/phone: +38 0572 991175, e-mail: ntcmtu@ukrpost.ua

Getman A.V.

Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects
of National Academy of Sciences of Ukraine
19, Industrialna Str., Kharkiv-106, 61106, Ukraine

An experimental magnetic moment determination method based on spatial harmonic analysis of magnetic flux density signatures.

Theoretical aspects of an experimental determination method for residual and inductive magnetic moments of a technical object are considered. As input data, the technical object magnetic induction signatures obtained under its linear movement near a pair of three-component sensors are used. A magnetic signature integration technique based on spatial harmonic analysis of the magnetic field represented by twenty-four multipole coefficients is introduced.

Key words – magnetic field, spatial harmonic analysis, magnetic moment, magnetic signature.

ВИЗУАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Запропонованій метод візуального визначення коефіцієнтів характеристичних рівнянь переходних процесів в лінійних електрических колах за допомогою часткових схем. Метод заснований на взаємному зв'язку між корінням алгебраїчного полінома і його коефіцієнтами. Метод проілюстрований на прикладі лінійного електричного кола третього порядку.

Предложен метод визуального определения коэффициентов характеристических уравнений переходных процессов в линейных электрических цепях с помощью частичных схем. Метод основан на взаимной связи между корнями алгебраического полинома и его коэффициентами. Метод проиллюстрирован на примере линейной электрической цепи третьего порядка.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенные требования к точности анализа переходных процессов в электротехнических системах оправдывают необходимость разработки и совершенствования их расчетов. При определенной идеализации электротехнических систем анализ переходных процессов удается свести к задаче составления и решения совокупности линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Для решения подобных задач применяются классический и операторный методы, метод переменных состояния и др. [1, 2].

Наиболее наглядным является классический метод, главное содержание которого составляет формирование и решение линейного дифференциального уравнения относительно исследуемой переменной. В последнее время классический метод получил дальнейшее развитие в направлении численно – аналитического определения постоянных интегрирования [3], что еще больше расширило возможность его применения для исследования переходных процессов.

Вместе с тем одной из трудоемких особенностей классического метода является необходимость составления дифференциального, а, следовательно, и характеристического уравнения цепи. Непосредственное применение законов Кирхгофа и дифференциальных соотношений между напряжениями и токами в реактивных элементах для практически значимых схем громоздко. Чаще применяется формальная алгебраизация с заменой реактивных элементов их формальными сопротивлениями pL и $1/pC$. Корни характеристического уравнения совпадают с корнями определителя матрицы контурных сопротивлений или узловых проводимостей формальной схемы замещения [1, 2]. Однако в случае разветвленных цепей получение характеристического полинома также требует громоздких алгебраических преобразований.

В последнее время проводятся исследования по совершенствованию методики составления уравнений электрических цепей. В работах Курганова С.А. [4] предлагается метод схемных определителей, направленный на автоматизацию составления уравнений в стационарных режимах постоянного и синусоидального тока. Шакиров М.А. предложил формулы прямого решения цепей второго порядка [5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является дальнейшее развитие метода нахождения коэффициентов характеристических уравнений непосредственно по виду исследуемых линейных электрических цепей в направлении сокращения алгебраических преобразований.

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристическое уравнение линейной электрической цепи n -го порядка, соответствующее дифференциальному уравнению переходного процесса, имеет вид полинома степени n

$$p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (1)$$

с корнями p_1, p_2, \dots, p_n . Математически предлагаемый метод может быть обоснован наличием связи между корнями и коэффициентами a_1, a_2, \dots, a_n уравнения (1) [6]:

$$a_1 = - \sum_{i=1}^n p_i ; a_2 = \sum_{i,j=1}^n p_i p_j ; \\ a_3 = - \sum_{i,j,k=1}^n p_i p_j p_k ; a_n \cdot (-1)^n = p_1 p_2 \dots p_n ; i < j < k .$$

Для целей исследования нормируем уравнение (1), разделив все его слагаемые на a_n , что соответствует появлению в дифференциальном уравнении слагаемого, представляющего исследуемую переменную с единичным коэффициентом. После нормировки уравнение (1) принимает вид

$$b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + 1 = 0 . \quad (2)$$

В предлагаемом методе определяющим понятием является частичная схема электрической цепи [7, 8], которая содержит только один реактивный элемент из имеющихся в исходной цепи. Остальные реактивные элементы заменяются или коротким замыканием, или разрывом в зависимости от того, какой коэффициент уравнения (2) определяется. Резисторы, имеющиеся в цепи, остаются неизменными, а независимые источники энергии заменяются их внутренними сопротивлениями.

В каждой частичной схеме относительно реактивного элемента определяется эквивалентное активное сопротивление $r_{\text{экв}}$. В результате каждая частичная схема представляется элементарным контуром,

включающим в себя два элемента: $r_{\text{экв}}$ и индуктивность L или емкость C , с постоянной времени $\tau = L/r_{\text{экв}}$ или $\tau = r_{\text{экв}}C$.

Для получения коэффициента b_1 при первой производной составляем частичные схемы относительно каждого реактивного элемента цепи. В этих схемах оставшиеся индуктивности закорачиваются, а емкости заменяются разрывом. Назовем такие состояния индуктивности и емкости естественными, имея в виду поведение указанных реактивных элементов в режиме постоянного тока. Состояние же реактивных элементов, соответствующее замене индуктивности разрывом, а емкости – коротким замыканием, назовем инверсным. Тогда сумма постоянных времени τ_i всех частичных схем при естественном состоянии всех не i -х реактивных элементов в i -й схеме оказывается равной коэффициенту b_1 в уравнении (2)

$$b_1 = \sum_{i=1}^n \tau_i. \quad (3)$$

Сообразуясь с размерностью слагаемых уравнения (2), заключаем, что коэффициент b_2 при второй производной должен иметь размерность c^2 . Поэтому b_2 должен представляться суммой попарных произведений постоянных времени частичных схем вида $\tau_i \cdot \tau_j$, $i = 1, 2, \dots, n-1$; $j = i+1, i+2, \dots, n$. Постоянные с одним индексом τ_i такие же, что используются для определения b_1 , т.е. определяются по частичной схеме для i -го реактивного элемента при естественном состоянии остальных не i -х реактивных элементов по (3).

Постоянная времени с двойным индексом ji определяется из частичной схемы, построенной для j -го реактивного элемента при инверсном состоянии i -го реактивного элемента и естественном состоянии остальных не i -х реактивных элементов. Таким образом, для коэффициента b_2 получаем формулу

$$b_2 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \tau_i \tau_{ji}. \quad (4)$$

Аналогичные построения могут быть распространены и для получения остальных коэффициентов b_i уравнения (2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для иллюстрации рассмотрим определение коэффициентов характеристического уравнения электрической цепи третьего порядка, изображенной на рис. 1,а. Характеристическое уравнение, полученное для контроля на основе входного сопротивления в рассечке любой ветви в формальной схеме замещения, после нормировки имеет вид

$$\frac{L_1 L_3 C_2}{R_3} p^3 + ((R_2 + R_3)L_1 + R_2 L_3) \frac{C_2}{R_3} p^2 + \\ + \left(\frac{L_1 + L_3}{R_3} + C_2 R_2 \right) p + 1 = 0. \quad (5)$$

Найдем коэффициент при первой производной, как сумму постоянных времени частичных схем (3). Частичная схема для индуктивности L_1 изображена на рис. 1,б, где емкость C_2 заменена разрывом, а индуктивность L_3 – коротким замыканием (естественные

состояния). Постоянная времени $\tau_1 = L_1/R_3$. Частичная схема для емкости C_2 изображена на рис. 1,в, где индуктивности L_1 и L_3 заменены короткими замыканиями (естественные состояния). Постоянная времени $\tau_2 = C_2 R_2$. Частичная схема для индуктивности L_3 изображена на рис. 1,г, где емкость C_2 заменена разрывом, а индуктивность L_1 – коротким замыканием (естественные состояния). Постоянная времени $\tau_3 = L_3/R_3$. Сумма $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ по (3) дает коэффициент b_1 при первой производной $b_1 = C_2 R_2 + (L_1 + L_3)/R_3$.

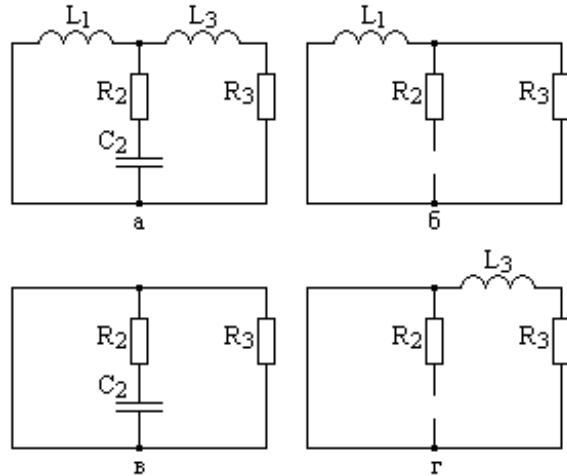


Рис. 1. Электрическая цепь третьего порядка:
а) исходная схема; б) частичная схема для τ_1 ;
в) частичная схема для τ_2 ; г) частичная схема для τ_3

Найдем коэффициент при второй производной как сумму попарных произведений постоянных времени частичных схем по (4)

$$b_2 = \tau_1 \cdot \tau_{21} + \tau_1 \cdot \tau_{31} + \tau_2 \cdot \tau_{32}. \quad (6)$$

Выше уже найдены постоянные времени τ_1 , τ_2 . Построим частичные схемы для постоянных с двойными индексами. Для определения τ_{21} частичная схема по емкости C_2 изображена на рис. 2,а, где индуктивность L_1 заменена разрывом (инверсное состояние), а индуктивность L_3 – коротким замыканием (естественное состояние). Постоянная времени $\tau_{21} = C_2(R_2 + R_3)$.

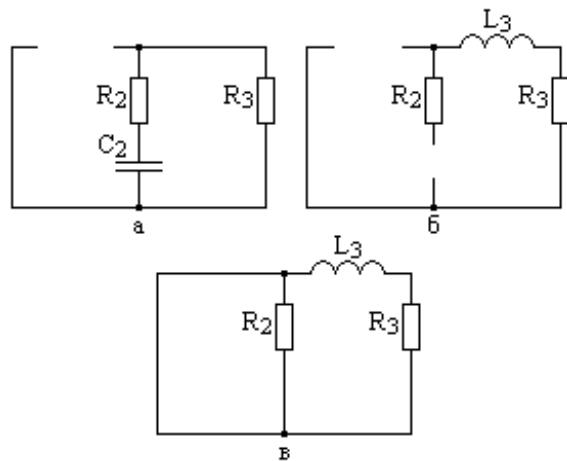


Рис. 2. Частичные схемы для определения коэффициента при второй производной: а) частичная схема для τ_{21} ;
б) частичная схема для τ_{31} ; в) частичная схема для τ_{32}

Для определения τ_{31} частичная схема по индуктивности L_3 изображена на рис. 2,б, где емкость C_2 заменена разрывом (естественное состояние), и индуктивность L_1 – также разрывом (инверсное состояние). Постоянная времени $\tau_{31} = L_3/\infty=0$.

Для определения τ_{32} частичная схема по индуктивности L_3 изображена на рис. 2,в, где индуктивность L_1 заменена коротким замыканием (естественное состояние) и емкость C_2 – также коротким замыканием (инверсное состояние). Постоянная времени $\tau_{32} = L_3/R_3$.

Поэтому коэффициент при второй производной определяется выражением (6)

$$b_2 = \frac{L_1}{R_3}(R_2 + R_3)C_2 + \frac{L_1}{R_3} \cdot 0 + R_2 C_2 \frac{L_3}{R_3},$$

что совпадает с коэффициентом при второй производной в (5).

ВЫВОДЫ

Предложенный метод позволяет находить все или отдельные коэффициенты характеристического уравнения, причем они приобретают определенный физический смысл. Определение коэффициентов предложенным методом исключает громоздкие алгебраические преобразования и заменяет их определением эквивалентных сопротивлений в элементарных схемах постоянного тока. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка методики получения коэффициентов при более высоких производных и математическое и физическое обоснование метода на основе взаимной связи между корнями алгебраического полинома и его коэффициентами, а также на теории графов электрических цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Л.А.Бессонов. – М.: "Юрайт", 2012. – 701 с.
- Демирчян К.С. Моделирование и машинный расчет электрических цепей / К.С. Демирчян, П.А. Бутырин. – М.: Высшая школа, 1988. – 335 с.
- Костюков В.В. Численно-аналитическое моделирование переходных процессов в электротехнических системах / В.В. Костюков, Л.Н. Канов // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 52-56.
- Курганов С.А. Неявный принцип наложения в линейных электрических цепях / С.А. Курганов, В.В. Филаретов // Электричество. – 2005. – № 1. – С. 32-43.
- Практикум по ТОЭ. Часть 2 / М.А. Шакиров, Р.П. Киятин, В.С. Лопатин, В.Н. Воронин [и др.]. – С-Пб.: Изд-во С-Пб ГТУ, 2000. – 152 с.
- Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

7. Костюков В.В. Схемное получение коэффициентов характеристического уравнения в электрических цепях / В.В. Костюков // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: Матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 17-20 сентября 2012 г. – Севастополь: изд-во СевНТУ. – 2012. – С. 183-184.

8. Костюков В.В. Метод визуального построения характеристических уравнений линейных электрических цепей / В.В. Костюков // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2013. – Вып. 139. – С. 91-94.

Bibliography (transliterated): 1. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy `elektrotehniki. Linejnye `elektricheskie celi / L.A.Bessonov. - M.: "Yurajt", 2012. - 701 s. 2. Demirchyan K.S. Modelirovaniye i mashinnyy raschet `elektricheskikh cipej / K.S. Demirchyan, P.A. Butyrin. - M.: Vysshaya shkola, 1988. - 335 s. 3. Kostyukov V.V. Chislenno-analiticheskoe modelirovaniye perehodnyh processov v `elektrotehnicheskikh sistemah / V.V. Kostyukov, L.N. Kanov // Elektrotehnika ta elektroenergetika. - 2007. - № 1. - S. 52-56. 4. Kurganov S.A. Neyavnyj princip nalozheniya v linejnyh `elektricheskikh cipej / S.A. Kurganov, V.V. Filaretov // `Elektrичество. - 2005. - № 1. - S. 32-43. 5. Praktikum po TO`E. Chast' 2 / M.A. Shakirov, R.P. Kiyatin, V.S. Lopatin, V.N. Voronin [i dr.]. - S-Pb.: Izd-vo S-Pb GTU, 2000. - 152 s. 6. Korn G. Spravochnik po matematike / G. Korn, T. Korn. - M.: Nauka, 1968. - 720 s. 7. Kostyukov V.V. Shemnoe poluchenie ko`efficentov harakteristicheskogo uravneniya v `elektricheskikh ciperah / V.V. Kostyukov // Problemy povysheniya effektivnosti `elektromehanicheskikh preobrazovatelej v `elektro`energeticheskikh sistemah: Mater. mezhdunar. nauch.-tehn. konf., Sevastopol', 17-20 sentyabrya 2012 g. - Sevastopol': izd-vo SevNTU. - 2012. - S. 183-184. 8. Kostyukov V.V. Metod vizual'nogo postroeniya harakteristicheskikh uravnenij linejnyh `elektricheskikh cipej / V.V. Kostyukov // Vestnik SevNTU. Ser. Mehanika, `energetika, `ekologiya: Sb. nauch. tr. - Sevastopol', 2013. - Vyp. 139. - S. 91-94.

Поступила (received) 01.07.2013

Костюков Валентин Викторович, к.т.н., доц.,
Канов Лев Николаевич, к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет
кафедра судовых и промышленных электромеханических
систем,
99053, Севастополь, ул. Университетская, 33,
тел/phone: +38 0692 435272, e-mail: lnkanov48@mail.ru

Kostyukov V.V., Kanov L.N.

Sevastopol National Technical University
33, University Str., Sevastopol, Crimea, 99053, Ukraine

Visual construction of characteristic equations of linear electric circuits.

A visual identification method with application of partial circuits is developed for characteristic equation coefficients of transients in linear electric circuits. The method is based on interrelationship between the roots of algebraic polynomial and its coefficients. The method is illustrated with an example of a third-order linear electric circuit.

Key words – a linear electric circuit, characteristic equation, partial circuit, inductance, capacity, time constant.

АКТИВНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Розроблена методика експериментального дослідження макета системи активного екраниування створені магнітного поля промислової частоти поблизу генераторних струмопроводів електростанцій за допомогою керованих джерел магнітного поля. Приведені результати експериментальних досліджень макета системи активного екраниування із різними алгоритмами керування.

Разработана методика экспериментального исследования макета системы активного экранирования искажений магнитного поля промышленной частоты вблизи генераторных токопроводов электростанций с помощью управляемых источников магнитного поля. Приведены результаты экспериментальных исследований макета системы активного экранирования с различными алгоритмами управления.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗЬ С НАУЧНЫМИ И ПРАКТИЧЕСКИМИ ЗАДАЧАМИ

Магнитное поле техногенного происхождения является одним из экологических факторов, негативно влияющих на биологические объекты. Отклонение геомагнитного поля от его естественного значения оказывает негативное влияние на организм человека. Особенно опасными является снижение геомагнитного поля в зонах длительного пребывания человека. Магнитное поле промышленной частоты является канцерогенным и приводит к раковым заболеваниям. В связи с этим во всем мире проводятся интенсивные исследования и комплекс мероприятий по поддержанию параметров внутреннего магнитного поля на уровне магнитного поля Земли для выполнения экологических норм внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов, а также для создания комфортных условий жизни и работы. Рассмотрим синтез такой системы управления магнитным полем с помощью системы специальных управляемых источников магнитного поля – обмоток с регулируемым током, установленных в зоне, где необходимо поддерживать параметры внутреннего магнитного поля в заданных пределах.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ ПО ДАННОЙ ПРОБЛЕМЕ

Для уменьшения уровня техногенного магнитного поля разрабатываются системы пассивного и активного экранирования. Существующие системы активного экранирования техногенного магнитного поля, как правило, являются разомкнутыми. В работах [1-3] рассмотрены вопросы построения замкнутых систем компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей, а в работах [4-5] рассмотрены вопросы синтеза систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты.

Однако в работах [4-5] не проведены экспериментальные исследования эффективности систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты. Рассмотрим экспериментальные исследования эффективности макета такой системы управления магнитным полем с помощью системы специальных управляемых источников магнитного поля – обмоток с регулируемым током, установленных в зоне, где необходимо поддерживать параметры внутреннего магнитного поля в заданных пределах.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является разработка методики синтеза и экспериментальных исследований макета системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты вблизи генераторных токопроводов электростанций. Задачей работы является проведение экспериментальных исследований макета системы активного экранирования магнитного поля промышленной вблизи генераторных токопроводов электростанций с различными алгоритмами управления и оценка эффективности системы активного экранирования магнитного поля.

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В Научно-техническом центре магнетизма технических объектов НАН Украины проведены теоретические и экспериментальные исследования внешнего магнитного поля электроэнергетического оборудования отечественных электростанций.

Показано, что основными источниками магнитного поля частотой 50 Гц является генераторные токопроводы энергоблоков мощностью более 100 МВт, которые создают техногенное магнитное поле в 3-5 раз превышающее предельно-допустимый уровень современных санитарных норм и представляет опасность для здоровья персонала.

В частности, на основании результатов проведенных экспериментальных исследований магнитного поля на рабочем месте вблизи генераторных токопроводов турбогенератора при номинальном токе турбогенератора электростанции в 15 кА установлено, что индукция магнитного поля в объеме базового рабочего места достигает 420 мкТл, в то время как санитарные нормы ограничивают уровень индукции магнитного поля в объеме базового рабочего места до 100 мкТл.

Для проведения экспериментальных исследований систем активного экранирования магнитного поля на рабочем месте вблизи генераторных токопровода электростанции в Научно-техническом центре магнетизма технических объектов НАН Украины изготовлен физический макет трехфазного токопровода для макетирования распределения магнитного поля на рабочем месте вблизи токопровода электростанции. Внешний вид макета трехфазного токопровода показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид макета трехфазного токопровода

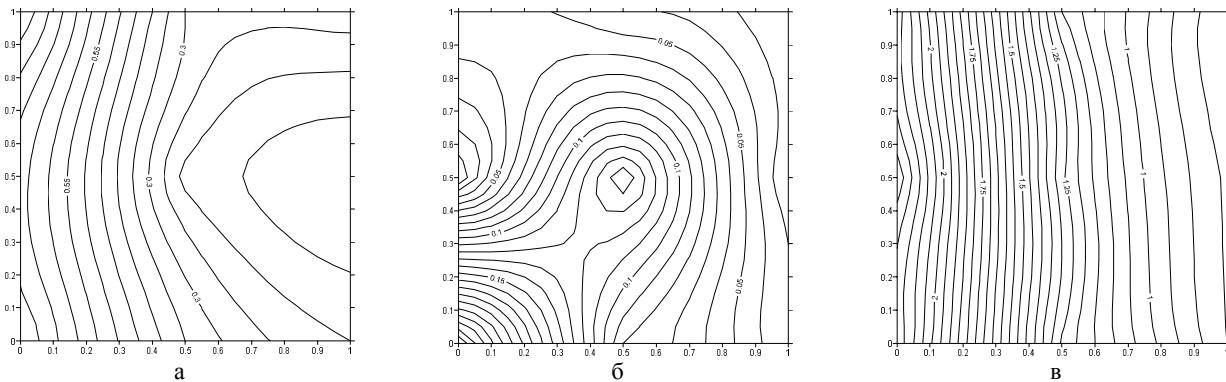


Рис. 2. Линии равного уровня распределения индукции магнитного поля z по трем координатам: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z при включенном токопроводе

Сравнение результатов экспериментальных исследований распределения индукции магнитного поля, проведенных на рабочем месте вблизи токопровода турбогенератора и результатов экспериментальных исследований распределения индукции магнитного поля макета позволяет сделать вывод о том, что с учетом масштабного коэффициента макета относительная погрешность распределения индукции магнитного поля в рассматриваемой области рабочей зоны составляет не более 10 %.

СХЕМА СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В Научно-техническом центре магнетизма технических объектов НАН Украины изготовлен физический макет системы активного экранирования магнитного поля на рабочем месте вблизи токопровода электростанции. В зоне компенсации искажения магнитного поля размещены управляемые источники магнитного поля, ориентированные определенным образом в пространстве.

Первым этапом синтеза системы активного экранирования магнитного поля промышленной вблизи токопроводов электростанций является синтез самих источников управляющего магнитного поля, с помощью которых потенциально можно создать магнитное поле с требуемой пространственно-временной структурой.

Схема расположения токопровода и управляющих обмоток макета системы активного экранирования магнитного поля показана на рис. 3.

Макет системы активного экранирования состоит из пяти компенсационных обмоток, охватывающих рабочее место и формирующих компенсирующее магнитное поле.

Следующим этапом синтеза системы активного экранирования магнитного поля является проектирование такого динамического блока, входом которого яв-

ляется измеряемые переменные, а выходом являются задания источникам управляющего магнитного поля.

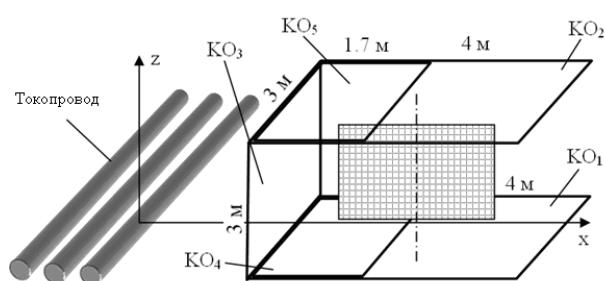


Рис. 3. Схема расположения токопровода и управляющих обмоток макета системы активного экранирования магнитного поля

Схема макета системы активного экранирования магнитного поля на рабочем месте вблизи токопровода электростанции показана на рис. 4. Секционные обмотки в вертикальной и горизонтальной плоскостях запитываются от соответствующих источников питания (ИП) и содержат внутренние контуры тока с датчиками тока (ДТ) и регуляторами тока (РТ). Внешний вид системы управления показан на рис. 5.

Макет системы активного экранирования состоит из пяти компенсационных обмоток (КО), охватывающих рабочее место и формирующих компенсирующее магнитное поле. Секционные обмотки в вертикальной и горизонтальной плоскостях запитываются от соответствующих источников питания (ИП) и содержат внутренние контуры тока с датчиками тока (ДТ) и регуляторами тока (РТ). Внешний вид системы управления показан на рис. 5.

Для работы системы используется информация об индукции магнитного поля внутри и вне изучаемого пространства, измеряемых с помощью датчиков поля ДП.

Для построения системы активного экранирования в изучаемом пространстве установлены две системы обмоток, создающие поле по координатам x и z . Естественно, что обмотки, создающие поле по ко-

ординате z , создают также поле и по координате x и y , а обмотки, создающие поле по координате x , создают также поле и по координате z и y .

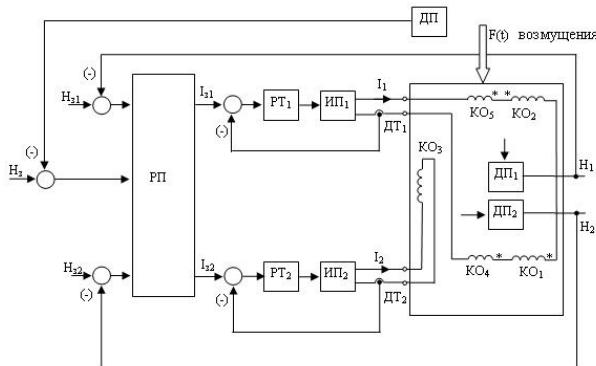


Рис. 4. Схема системы активного экранирования магнитного поля



Рис. 5. Внешний вид системы управления

Вначале были проведены исследования эффективности обмоток отдельных каналов управления. С этой целью на вход усилителя соответствующего канала подавалось напряжение частотой 50 Гц от отдельного источника и измерялась индукция магнитного поля во всем изучаемом пространстве по трем координатам x , y и z .

В частности, исполнительное устройство канала по координате x создает индукцию магнитного поля в центре равную 1,02 мкТл по координате x , 0,16 мкТл по координате y и 0,81 мкТл по координате z . А исполнительное устройство канала по координате z создает индукцию магнитного поля в центре, равную 0,42 мкТл по координате x , 0,1 мкТл по координате y и 4,9 мкТл по координате z .

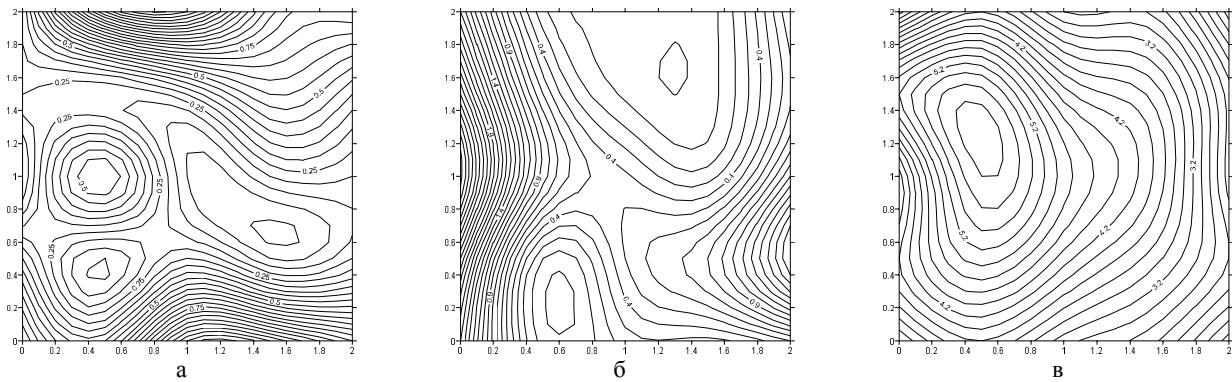


Рис. 6. Линии равного уровня распределения индукции магнитного поля по трем координатам: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z при включенном канале по координате z

В качестве примера на рис. 6 показаны линии равного уровня распределения индукции магнитного поля в центральном сечении ортогонально оси z по трем координатам x , y и z при включении обмотки по каналу z .

Таким образом, исполнительные устройства обоих каналов создают индукцию магнитного поля как в направлении "своих" координат, так и в направлении "чужих" координат.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Наиболее простой является разомкнутая система, схема которой показана на рис. 7.

Система активного экранирования построена по разомкнутому принципу и работает по датчику тока токопровода (ДТ). Заданные значения токов в компенсирующих обмотках формируются с помощью регулятора поля (РП), содержащего соответствующие усилители и фазовращатели, с помощью которых и настраивается система активного экранирования магнитного поля на рабочем месте вблизи токопровода электростанции.

Рассмотрим работу системы активного экранирования по каналу z . Магнитометр расположен в некоторой точке объема рабочего места. При отключенном токопроводе и системе активного экранирования магнитометр фиксирует наведенное магнитное поле, которое составляет 0,03 мкТл.

Подадим в токопровод ток величиной 20 А. При этом индукция магнитного поля составляет 1,2 мкТл. Включим систему активного экранирования. При этом уровень магнитного поля составляет 0,3 мкТл. Таким образом, с помощью системы компенсации уровень магнитного поля уменьшен с величины 1,2 мкТл до 0,3 мкТл, т.е. в 4 раза.

Рассмотрим теперь работу системы активного экранирования при большем значении тока в токопроводе, равным 50 А. При выключенной системе компенсации уровень магнитного поля составляет 2,8 мкТл. При включении системы компенсации уровень магнитного поля уменьшается до 0,7 мкТл. Таким образом, при увеличении тока в токопроводе с 20 А до 50 А уровень магнитного поля увеличился в 2,5 раза как без системы активного экранирования, так и с системой активного экранирования. Однако эффективность системы активного экранирования магнитного поля практически не изменился и составляет около 4 единиц.

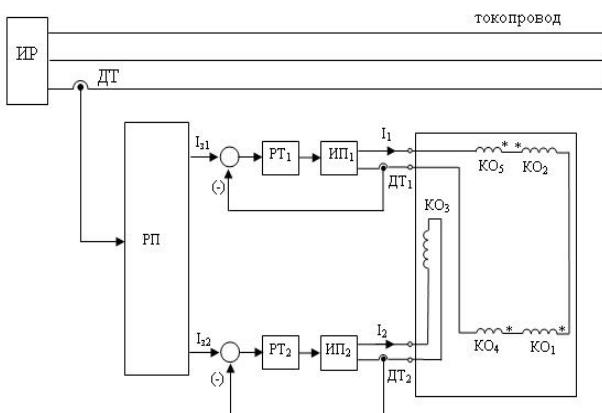


Рис. 7. Схема разомкнутой системы активного экранирования магнитного поля

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим теперь систему активного экранирования, построенную по замкнутому принципу, схема которой показана на рис. 8. Для формирования обратных связей и замыкания системы по полю в центре изучаемого пространства установлены два датчика поля ДП, ориентированные по координатам x и z и измеряющие индукцию магнитного поля в направлении координат x и z . Заданные значения токов в компенсирующих обмотках формируются с помощью регулятора поля (РП), с помощью которого и настраивается система активного экранирования магнитного поля на рабочем месте вблизи токопровода электростанции.

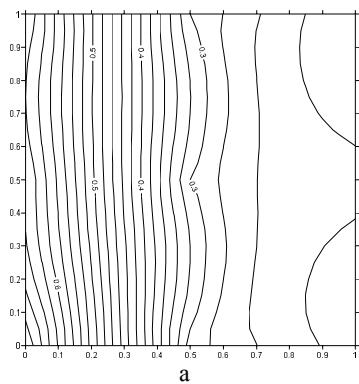


Рис. 9. Линии равного уровня распределения индукции магнитного поля по трем координатам: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z при работе одного канала по координате z

При включении только одного канала по координате x уровень индукции поля по этой же координате x уменьшился в 1,8 раза с 0,18 мкТл до 0,1 мкТл; по координате y уменьшился в 2,5 раз с 0,15 мкТл до 0,06 мкТл; по координате z уменьшился в 1,2 раза с 1,15 мкТл до 0,95 мкТл. Таким образом, включение только одного канала по координате z приводит к возрастанию индукции по координате x , а включение только одного канала по координате x приводит к некоторому уменьшению индукции по координате z .

При включении одного канала по координате z значение индукции в точке измерения изменяется следующим образом: по координате x увеличился в 1,7 раз с 0,18 мкТл до 0,3 мкТл; по координате y уменьшился в 15 раз с 0,15 мкТл до 0,01 мкТл; по координате z уменьшился в 11 раз – с 1,26 мкТл до 0,11 мкТл. На рис. 9 показаны линии равного уровня распределения индукции магнитного поля в центральном сечении ортогонально оси z по трем координатам x , y и z в системе, замкнутой по координате z .

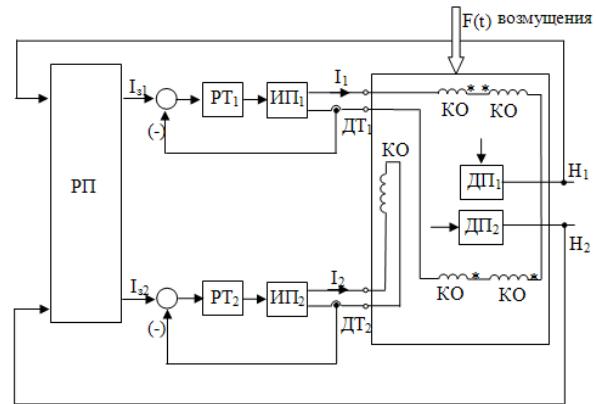
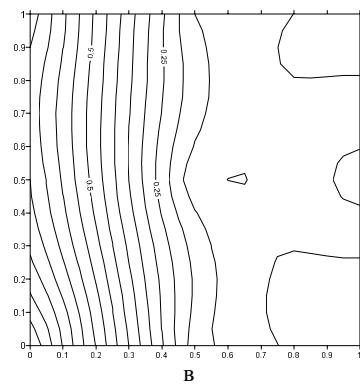
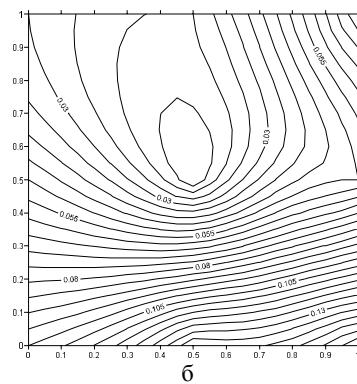


Рис. 8. Схема замкнутой системы активного экранирования магнитного поля

Таким образом, при включении только одного канала по координате z уровень индукции поля по этой же координате z в точке измерения уменьшился более чем в десять раз.



При включении обоих каналов уровень индукции магнитного поля в центре рассмотренного пространства, где расположены датчики поля, уменьшился: по координате x в четыре раза с 0,18 мкТл до 0,04 мкТл; по координате y в три раза с 0,15 до 0,05 мкТл и по координате z в пять раз с 1,26 мкТл до 0,25 мкТл. На рис. 10 показаны линии равного уровня распределения индукции магнитного поля в центральном сечении ортогонально оси z по трем координатам x , y и z при работе двух каналов.

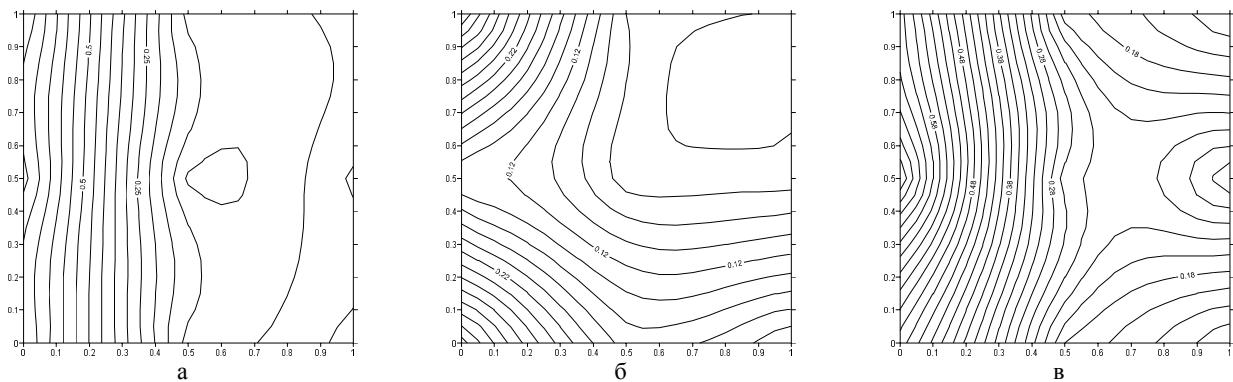


Рис. 10. Линии равного уровня распределения индукции магнитного поля по трем координатам: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z при работе двух каналов

Таким образом, одновременное замыкание каналов по координатам x и z приводит к увеличению напряженности поля по координате z в два раза по сравнению с уровнем индукции при работе только одного канала по координате z .

Слабая эффективность компенсации индукции по координате x с помощью канала объясняется достаточно слабым сигналом датчика и тем, что система практически работает на уровне шумов датчика. Для повышения эффективности работы канала по координате x сместим датчик поля ближе к линии, там, где индукция магнитного поля по координате x существенно больше, чем в

центре и составляет 0,67 мкТл против 0,18 мкТл.

При таком положении датчика поля включение канала по координате x приводит к уменьшению уровня индукции магнитного поля в точке установки датчика поля в 16 раз с 0,67 мкТл до 0,04 мкТл, однако в центре уровень индукции магнитного поля практически не изменился и составляет около 0,18 мкТл. На рис. 11 показаны линии равного уровня распределения индукции магнитного поля в центральном сечении ортогонально оси z по трем координатам x , y и z при замыкании системы по каналу x при смещении датчика поля ближе к токопроводу.

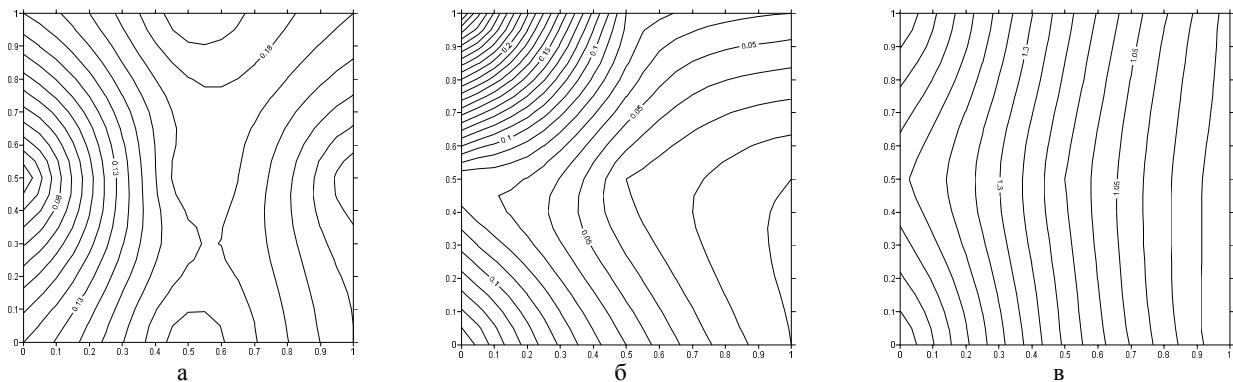


Рис. 11. Линии равного уровня распределения индукции магнитного поля по трем координатам: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z при замыкании системы по каналу x и при смещенном датчике поля ближе к токопроводу

При замыкании канала z при таком положении датчика наблюдается уменьшение уровня индукции магнитного поля по координате z в точке установки датчика в 3 раза, однако в центре рассматриваемого пространства уровень индукции магнитного поля по

координате z изменяется незначительно.

На рис. 12 показаны линии равного уровня распределения индукции магнитного поля в центральном сечении ортогонально оси z по трем координатам x , y и z .

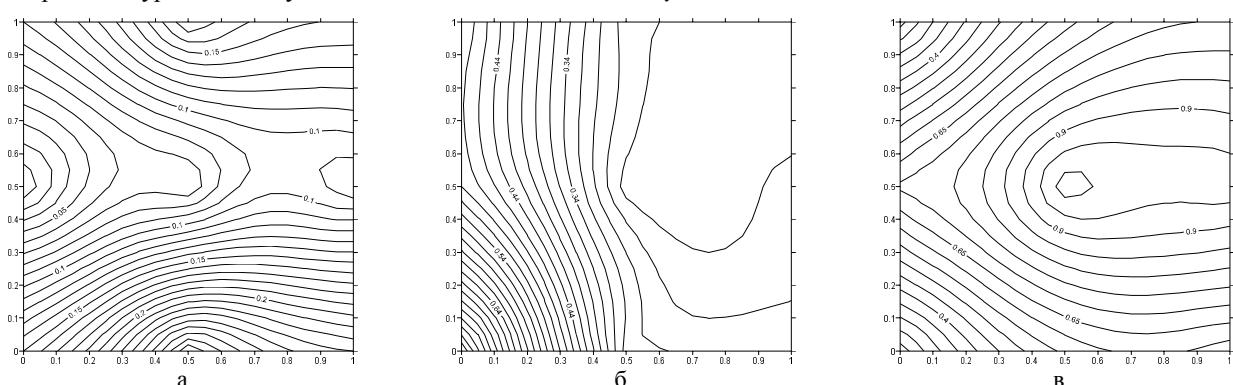


Рис. 12. Линии равного уровня распределения индукции магнитного по трем координатам: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z при замыкании системы по каналу z и при смещенном датчике поля ближе к токопроводу

Таким образом, при изменении положения датчика поля в пространстве канала системы уменьшают уровень индукции магнитного поля по соответствующим координатам только в области установки датчика.

ВЫВОДЫ ИЗ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ ЭТОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Разработан общий подход к решению задачи активного экранирования магнитного поля на рабочих местах вблизи генераторных токопроводов электростанций. Для решения задачи активного экранирования магнитного поля необходимо определить принципы управления этими источниками и синтезировать управляющую часть системы активного экранирования магнитного поля. Разработаны и изготовлены физические макеты трехфазного токопровода и систем активного экранирования магнитного поля и проведены их экспериментальные исследования. При заданной конфигурации обмоток уровень активного экранирования искажений магнитного поля в макете системы активного экранирования во всем пространстве рабочего места составляет около 3.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность достижения необходимой эффективности экранирования для обеспечения требований санитарных норм на рабочем месте вблизи генераторных токопроводов электростанций.

Для дальнейшего повышения эффективности активного экранирования магнитного поля до заданного уровня необходимо синтезировать дополнительные обмотки активного экранирования, с помощью которых потенциально можно достигнуть заданного уровня экранирования магнитного поля с помощью системы активного экранирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов / Технічна електродинаміка. – 2006. – № 3. – С. 13-16.
2. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реукій С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей / Технічна електродинаміка. – 2008. – Ч. 4. – С. 97-100.
3. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Пелевін Д.Е. Принципы построения систем автоматической компенсации биотропных искажений геомагнитного поля на рабочих местах оперативного персонала / Технічна електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 51-54.
4. Кузнецов Б.И., Пелевин Д.Е., Бовдуй И.В., Коломиец В.В., Котлярев Д.А. Компенсация искажений магнитного поля промышленной частоты / Електротехнічні і енергозбе-

рігаючі системи. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – 2012 – №03(19). – С. 135-136.

5. Кузнецов Б.И., Пелевин Д.Е., Бовдуй И.В. Синтез системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты / Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 131-132.

Bibliography (transliterated): 1. Rozov V.Yu., Assuirov D.A. Metod aktivnogo `ekranirovaniya vneshnego magnitnogo polya tehnicheskikh ob`ektov / Tehnichna elektrodinamika. - 2006. - № 3. - S. 13-16. 2. Rozov V.Yu., Assuirov D.A., Reuckij S.Yu. Zamknutye sistemy kompensacii magnitnogo polya tehnicheskikh ob`ektov s razlichnymi sposobami formirovaniya obratnyh svyazey / Tehnichna elektrodinamika. - 2008. - Ch. 4. - S. 97-100. 3. Rozov V.Yu., Assuirov D.A., Pelevin D.E. Principy postroeniya sistem avtomaticheskoy kompensacii biotropnyh iskazhenij geomagnitnogo polya na rabochih mestah operativnogo personala / Tehnichna elektrodinamika. - 2009. - №1. - S. 51-54. 4. Kuznecov B.I., Pelevin D.E., Bovduj I.V., Kolomiec V.V., Kotlyarov D.A. Kompensaciya iskazhenij magnitnogo polya promyshlennoj chasty / Elektrotehnichni i energozberigayuchi sistemi. Tematichnij vypusk "Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika". - 2012 - №03(19). - S. 135-136. 5. Kuznecov B.I., Pelevin D.E., Bovduj I.V. Sintez sistemy aktivnogo `ekranirovaniya magnitnogo polya promyshlennoj chasty / Tehnichna elektrodinamika. - 2012. - № 2. - S. 131-132.

Поступила (received) 20.06.2013

Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф.,
Никитина Татьяна Борисовна, д.т.н., проф.,
Бовдуй Игорь Валентинович, к.т.н.,
Волошко Александр Валерьевич, к.т.н., м.н.с.,
Винichenko Елена Владимировна, м.н.с.,
Котлярев Денис Александрович
Научно-технический центр магнетизма
технических объектов НАН Украины,
отдел проблем управления магнитным полем,
61106, Харьков ул. Индустріальна, 19,
тел/phone: +38 050 5766900, e-mail: bikuznetsov@mail.ru

Kuznetsov B.I., Nikitina N.B., Bovdyj I.V., Voloshko A.V., Vinichenko T.V., Kotlyarov D.A.
Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects
of National Academy of Sciences of Ukraine
19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine
Active screening of magnetic field near power station generator buses.

An experimental study technique for a prototyping system of active screening of power-frequency magnetic field distortions near power station generator buses via controllable magnetic field sources is presented. Results of experimental research on a prototyping active screening system with different control algorithms are given.

Key words – power frequency magnetic field, power station generator bus, prototyping active screening system, experimental research.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Представлені методика та результати експериментальних досліджень індукції геомагнітного поля (ГМП) в 195 різних приміщеннях навчальних закладів, житлових будинків, торговельно-розважальних центрів, метрополітену. Показано, що у всіх приміщеннях спостерігається явище ослаблення природного ГМП, проте в більшості приміщень ослаблення ГМП незначне і не представляє небезпеки для здоров'я населення. Виняток становлять приміщення висотних каркасно-монолітних житлових будинків, приміщення офісів і торговельно-розважальних центрів зі сталевими каркасами, а також платформи підземних станцій метрополітену, де ГМП може бути ослаблене до небезпечноного рівня (менше 25 мкТл), що вимагає вживання заходів щодо його нормалізації.

Представлены методика и результаты экспериментальных исследований индукции геомагнитного поля (ГМП) в 195 различных помещениях учебных заведений, жилых домов, торгово-развлекательных центров, метрополитена. Показано, что во всех помещениях наблюдается явление ослабления естественного ГМП, однако в большинстве помещений ослабление ГМП незначительно и не представляет опасности для здоровья населения. Исключение составляют помещения высотных каркасно-монолитных жилых домов, помещения офисов и торгово-развлекательных центров со стальными каркасами, а также платформы подземных станций метрополитена, где ГМП может быть ослаблено до опасного уровня (менее 25 мкТл), что требует принятия мер по его нормализации.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ослабленное статическое геомагнитное поле (гипогеомагнитное поле), создаваемое в помещениях современных зданий стальными элементами строительных конструкций, отрицательно воздействует на здоровье людей [1-4]. Так, при ослаблении естественного для Украины статического геомагнитного поля (ГМП) с индукцией 48-50 мкТл более чем в два раза (до 25 мкТл и менее), наблюдаются негативные эффекты в нервной и иммунной системах человека, а при четырехкратном ослаблении (13 мкТл и менее) и в сердечнососудистой системе [5].

Поэтому в ряде стран, например в России, приняты государственные санитарные нормы по предельно допустимым уровням ослабления статического ГМП для жилых, производственных и общественных помещений [6]. Они характеризуются коэффициентом ослабления уровня ГМП, составляющим не более 1,5 для жилых и общественных помещений (без ограничения времени пребывания) и не более 2 для рабочих мест (8 часов в сутки).

Аналогичные ограничения по экстремальному отклонению статического магнитного поля от естественного в жилых помещениях (не более чем на 20 мкТл) рекомендованы международным стандартом SBM-2008 [7]. Этот стандарт содержит руководящие принципы по биологическим рискам, возникающим в спальных районах, и широко используется в качестве руководящего документа при независимом тестировании домов в Европе, США, Канаде, Австралии.

Работы по исследованию, санитарному нормированию и нормализации уровня ослабления ГМП ведутся и в Украине [3-5, 8, 9]. На их основе проведена разработка проекта санитарных норм Украины в части ГМП (табл. 1).

Однако явление ослабления ГМП в помещениях пока исследовано недостаточно, как в части изучения физики этого явления, так и в части накопления экспериментальных данных по реальным уровням ослабления ГМП в жилых и общественных помещениях Украины, что необходимо для принятия целенаправленных мер по его нормализации.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования явления ослабления ГМП в помещениях жилых и общественных зданий и сооружений Украины.

Таблица 1

Допустимый уровень ослабления ГМП в проекте санитарных норм Украины

Нормативный документ	Допустимый уровень магнитной индукции в помещении, не менее	Условия применения
Проект державних санітарних норм і правил "Захист населення від впливу електромагнітних випромінювань", розділ 4 "Тимчасові гігієнічні нормативи та вимоги до стану геомагнітного поля в приміщеннях"	30 мкТл	Без обмеження часу
	25 мкТл	Не більше 8 годин в сутки
	15 мкТл	Не більше 2 годин в сутки

ЯВЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ГМП

Основной причиной техногенного ослабления индукции естественного ГМП в помещениях является индуктивное намагничивание под действием ГМП стальных элементов каркаса здания, что вызывает эффект магнитостатического экранирования ГМП внутри помещений [3,8]. Упрощенная физическая модель каркаса здания как источника ослабления ГМП в отдельном помещении представлена на рис.1. Проведенный анализ [3] показывает, что в общем случае, уровень ослабления ГМП определяется объемом и магнитной проницаемостью ферромагнитных конструкций каркаса, формой их граничных поверхностей, а также их пространственной ориентацией относительно вектора индукции ГМП.

Колонны и балки (рис. 1) являются несущими конструктивными элементами каркаса здания, содержат большой объем стальных ферромагнитных элементов и наиболее существенно влияют на ГМП в помещениях. Для иллюстрации этого влияния на рис. 2 показаны результаты численного эксперимента в программной среде Comsol по исследованию явления ослабления ГМП стальной колонной и балкой.

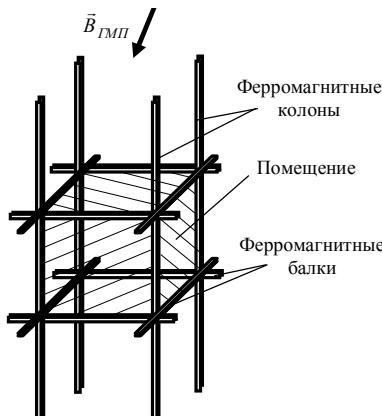


Рис. 1. Упрощенная физическая модель ферромагнитного каркаса здания, охватывающего исследуемое помещение

При анализе предполагалось, что колонны и балки имеют цилиндрическую форму, одинаковые габаритные размеры (диаметр d и протяженность $10d$), выполнены из конструкционной стали (начальная магнитная проницаемость $\mu=100$) и не имеют остаточной намагниченности. Вектор индукции намагничивающего поля (естественного ГМП для г. Харькова) имеет вертикальную составляющую $46,6 \text{ мкТл}$, горизонтальную составляющую $18,1 \text{ мкТл}$ и модуль 50 мкТл , при которой нелинейность кривой намагничивания конструкционной стали может не учитываться.

Наиболее полно явление ослабления ГМП проявляется вблизи колонны (рис. 2,а). При этом зона ослабления ГМП прилегает к ее боковым поверхностям и распространяется перпендикулярно вектору индукции намагничивающего поля. Максимальное ослабление наблюдается на поверхности колонны и составляет 19 мкТл , а протяженность зоны ослабления ГМП приближается к высоте колонны.

Кроме зоны ослабления (рис. 2,а), на торцах колонны имеется и зона усиления ГМП. Однако усиление ГМП гигиенически не нормировано (табл. 1) и в дальнейшем не рассматривается.

Ослабление ГМП балкой иллюстрируется на рис.2б и характеризуется максимальным ослаблением на поверхности балки в 40 мкТл . Однако как уровень, так и зона ослабления ГМП, формируемая горизонтальными балками, существенно меньше, чем у колонн. Это объясняется существенно меньшей горизонтальной составляющей вектора индукции ГМП, направленной по оси балки, по сравнению с его вертикальной составляющей, которая направлена по оси колонны. На практике влияние балок еще меньше в связи со случайной ориентацией зданий относительно магнитного меридиана.

Очевидно, что при решении задачи моделирования ГМП в помещении должно также оцениваться взаимное магнитное влияние колонн, балок и других элементов каркаса здания. При этом упрощенная физическая модель каркаса (рис. 1) может уточняться с учетом особенностей конструкции здания и вносимой при этом погрешности моделирования, что является предметом отдельных исследований.

Таким образом, зона ослабления ГМП в помещениях формируется основными ферромагнитными элементами каркаса здания – балками и колоннами. Ослабление ГМП максимально при совпадении направления вектора ГМП, либо его пространственных составляющих, с осью колон (балок). Определяющее влияние на уровень ослабления ГМП в помещениях оказывают колонны, что связано с существенно (почти в три раза)

большим значением вертикальной составляющей ГМП, которая всегда направлена по оси колонн.

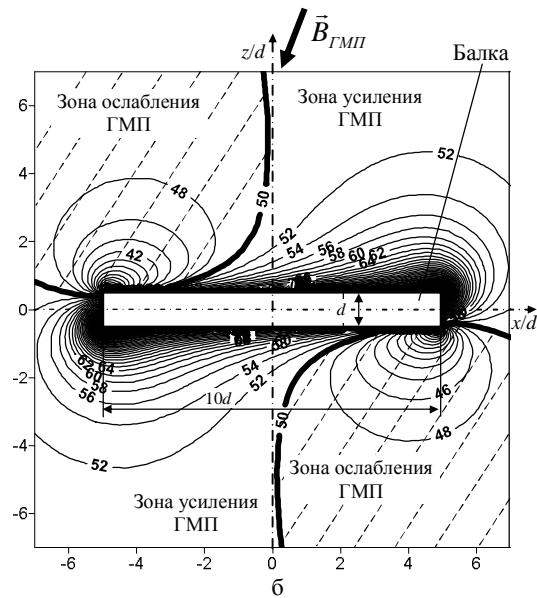
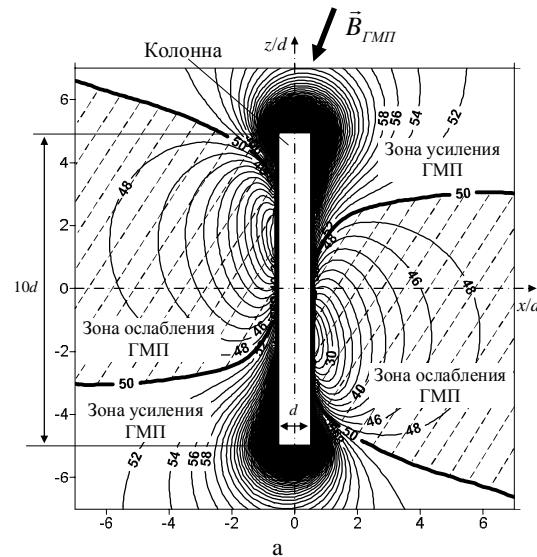


Рис. 2. Распределение модуля вектора индукции магнитного поля вблизи вертикальной ферромагнитной колонны (а) и горизонтальной балки (б), имеющих цилиндрическую форму и одинаковые размеры, находящихся в естественном ГМП (индукция 50 мкТл) для случая совпадения оси балки с направлением магнитного меридиана

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования выполнены в 195 помещениях жилых и общественных зданий и сооружений г. Харькова, Харьковской области и г. Киева. Исследованы: 63 помещения 2-х больниц; 64 помещения 2-х школ и университета; 53 помещения 7 кирпичных, 8 панельных и 3 каркасно-монолитных жилых домов; 9 помещений офисных и торгово-развлекательных центров; 6 платформ подземных станций Киевского метрополитена.

Методика экспериментальных исследований ГМП в помещениях основана измерении 3-х пространственных компонент вектора индукции статического магнитного поля в ограниченном количестве точек помещения с помощью стандартного феррозондового векторного магнитометра. Точки измерений

$p(x_i, y_j, z)$ располагались в узлах сетки измерений, параллельной стенам помещения (рис. 3).

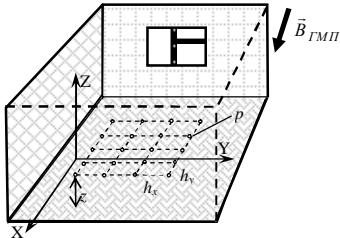


Рис. 3. Расположение сетки измерений в помещении

Шаг сетки (h_x, h_y) выбирался исходя из допустимой погрешности измерений и, при необходимости, варьировался.

Результаты измерений пространственных компонент вектора индукции в узлах сетки измерений группировались по сечениям и представлялись как распределение компонент вектора индукции магнитного поля на плоскости.

Для аппроксимации значений функции в точках между узлами сетки измерений и построения карт измерений, представляющих собой линии равного уровня магнитной индукции, использовался метод интерполяции на основе двумерных кубических сплайн-функций [10], имеющий низкую чувствительность к случайному ошибкам.

Двумерный интерполяционный кубический сплайн $S(x, y)$ в окрестности узла сетки (x_i, y_j) является полиномом третьей степени двух переменных:

$$S(x, y) = \sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^3 a_{\alpha, \beta}^{i, j} (x - x_i)^\alpha (y - y_j)^\beta$$

Неизвестные коэффициенты $a_{\alpha, \beta}^{i, j}$ определяются из условия равенства сплайна в узлах сетки измеряемой величине

$$S_q(x_i, y_j) = B_{q, i, j}, q = x, y, z \quad (1)$$

и из условия непрерывности сплайна и его производных между узлами сетки измерений.

Расчет пространственных компонент вектора индукции магнитного поля B_q в точках (x, y) между узлами сетки выполнялся по формуле [10]

$$B_q(x, y) = S_q(x, y), \quad (2)$$

а модуль вектора индукции магнитного поля как

$$B(x, y) = \sqrt{B_x(x, y)^2 + B_y(x, y)^2 + B_z(x, y)^2}. \quad (3)$$

Погрешность аппроксимации магнитного поля сплайн-функцией пропорциональна величине отношения шага сетки измерения h к расстоянию до его источника [11], что позволяет в процессе измерений оценить текущую величину погрешности аппроксимации для базовой сетки и варьировать размер сетки на участках с высоким градиентом ГМП для ограничения погрешности аппроксимации на допустимом уровне.

С учетом изложенного, методика экспериментальных исследований ГМП в помещениях предусматривает выполнение следующих операций: выбор базовой сетки измерений в помещении; измерение компонент индукции магнитного поля $B_{q, i, j}$ в узлах сетки; уточнение шага сетки измерений на участках высоким градиентом ГМП; измерение компонент индукции магнитного поля в новых узлах сетки; определение кубической сплайн-функции по результатам измерений $B_{q, i, j}$ и соотношению (1); построение карт распределения искажений ГМП по (2, 3).

При исследовании помещений базовая сетка измерений имела шаг 0,5 м и располагалась на горизонтальной плоскости на уровне 1 м от пола. При измерении участков с высоким градиентом ГМП, шаг сетки измерений уменьшался. Измерения проводились переносным векторным феррозондовым магнитометром типа Magnetoscop 1.069 фирмы Foerster с рабочим диапазоном измерений 10 нТл–2000 мкТл и относительной погрешностью 2,5 %. Данные измерений заносились в память магнитометра. Затем осуществлялась их компьютерная обработка по рассмотренной выше методике с определением распределения модуля вектора индукции ГМП на плоскости измерений, а также фиксацией его стабильных минимальных и максимальных значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты выполненных экспериментальных исследований обобщены и представлены на рис. 4. Их анализ показывает, что в большинстве помещений уровень ослабления ГМП не превышает граничных значений. Исключение составляют высотные каркасно-монолитные жилые дома, торгово-развлекательные центры с каркасами зданий из стальных труб (швеллеров) и подземные платформы метрополитена.

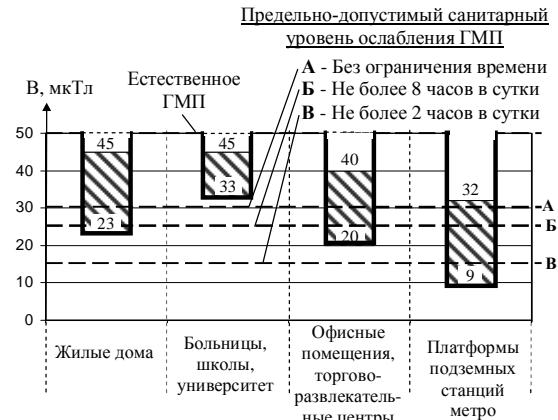


Рис. 4. Обобщенные результаты экспериментальных исследований индукции статического магнитного поля в жилых и общественных помещениях

Так, жилые дома можно разбить на 4 категории, имеющие принципиальные отличия в несущих конструкциях и объеме ферромагнитных элементов: 1 – малоэтажные деревянные (кирпичные) дома (коттеджи) с деревянными перекрытиями; 2 – многоэтажные кирпичные дома с железобетонными перекрытиями; 3 – многоэтажные дома из железобетонных панелей; 4 – высотные (18 этажей и более) современные каркасно-монолитные дома со стальным либо железобетонным каркасом.

В соответствии с рис. 5 в помещениях домов 1-й категории значение ГМП не ниже 40 мкТл, что хорошо согласуется с результатами исследований, проведенных в Великобритании (56 домов) и США (697 домов) [12], а также с результатами исследований кирпичного коттеджа в Чехии [13]. Типичная карта распределения ГМП, построенная по результатам эксперимента в помещении одного из этих домов, представлена на рис. 6а. Такие дома наиболее комфортны для проживания.

Дома 2-й и 3-й категорий, как правило, имеют ГМП не ниже 30 мкТл, что соответствует безопасному уровню проживания. Указанный уровень ГМП для таких домов подтверждается и российскими исследо-

вателями [14]. Типичные карты распределения ГМП в помещениях этих домов представлены на рис. 6,б-в.

Дома 4-й категории (рис. 5) характеризуются существенным ослаблением ГМП – до индукции 23 мкТл, при гигиеническом нормативе для проживания 30 мкТл, что может представлять опасность для здоровья их жильцов. Причиной существенного ослабления ГМП в этих домах является более массивный, чем в домах других категорий, ферромагнитный каркас, а также особенности технологии монтажа каркаса, приводящие к дополнительному намагничиванию его ферромагнитных конструкций [15, 16]. Типичная карта распределения ГМП в помещениях этих домов представлена на рис.6г.

Уровень ГМП на платформах подземных станций Киевского метрополитена (рис.7) колеблется от 32 мкТл (станция "Осокорки") до 9-12 мкТл (станции Арсенальная, "Дорогожичи") и может представлять опасность для здоровья людей, пребывающих на платформах более 2-х часов.

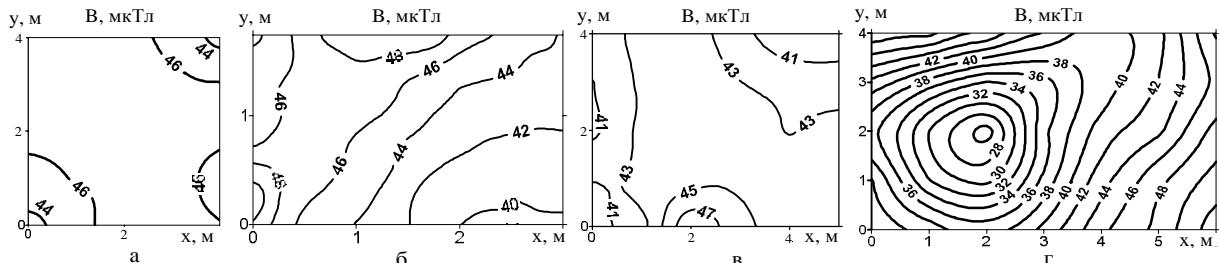


Рис. 6. Характерные карты распределения индукции ГМП на высоте 1 м от пола в жилых зонах помещений жилых домов различных конструкций в г. Харькове (индукция естественного ГМП 50 мкТл):
а) кирпичный коттедж; б) 9-этажный кирпичный дом; в) 9-этажный панельный дом; г) 24-этажный каркасно-монолитный дом



Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований индукции ГМП на платформах подземных станций Киевского метрополитена

Для обеспечения защиты здоровья людей в помещениях, характеризуемых превышением предельно допустимого уровня ослабления ГМП, могут быть использованы методы нормализации ГМП [3], теоретические основы которых требуют дальнейшего развития.

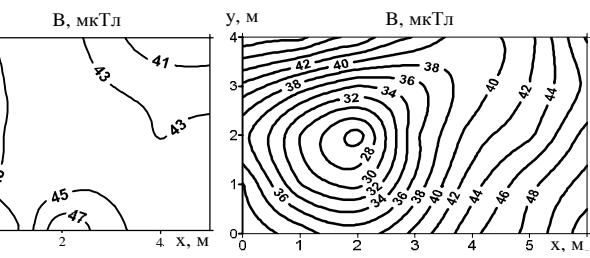
ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная физическая модель ферромагнитного каркаса здания, состоящая из колонн и балок, охватывающих исследуемое помещение, и обосновано определяющее влияние колонн на уровень ослабления ГМП в помещениях.

2. Разработана и реализована методика измерений уровня ослабления ГМП, которая предусматривает выполнение таких операций, как выбор базовой сетки измерений, выполнение измерений пространственных компонент индукции магнитного поля в узлах сетки с фиксацией максимальных и минимальных значений, уточнение шага сетки измерений на участках высоким градиентом ГМП и проведение измерений в узлах новой сетки, вычисление кубической сплайн-функции по



Рис. 5. Обобщенные результаты экспериментальных исследований индукции статического магнитного поля в жилых домах различных категорий



результатам измерений, построение карт распределения индукции ГМП в помещениях.

3. Экспериментально обосновано, что явление технологического ослабления индукции естественного геомагнитного поля наблюдается во всех 195 исследованных помещениях жилых и общественных зданий, однако в большинстве помещений оно незначительно (индукция ГМП не ниже 30 мкТл) и соответствует безопасным условиям проживания (работы) людей.

4. Выявлены жилые, офисные и общественные помещения, в которых наблюдается существенное ослабление ГМП. К ним относятся отдельные помещения современных высотных (20 этажей и выше) каркасно-монолитных жилых домов (ослабление до 23 мкТл при допустимом уровне 30 мкТл), помещения офисных и торгово-развлекательных центров со стальными каркасами зданий (ослабление до 20 мкТл при допустимом уровне 25 мкТл), отдельные платформы метрополитена (ослабление до 9 мкТл при допустимом уровне для пассажиров 15 мкТл и для обслуживающего персонала 25 мкТл). Отличительной особенностью этих помещений является повышенный объем ферромагнитных масс охватывающих их несущих строительных конструкций.

5. Подтверждена актуальность развития методов моделирования явления ослабления ГМП стальными строительными конструкциями для разработки на их основе методов и средств нормализации геомагнитного поля в жилых и общественных помещениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Холодов Ю.А. Организм и магнитные поля. // Успехи физиологических наук. – 1982. – Т.13, № 2. – С. 48-64.
- Походзей Л.В. Гипогеомагнитные условия как неблагоприятный фактор производственной среды: дис. ... доктора мед. наук : 14.00.50 / Походзей Л.В. – М., 2004. – 190 с.
- Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Гвозденко Л.А. Исследование техногенных искажений геомагнитного

- поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня. // Техническая электродинамика. Тематический выпуск "Проблемы современной электротехники". – 2008. – Ч. 2. – С. 3-8.
4. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Биткин С.В. Анализ техногенных искажений геомагнитного поля в помещениях и нормирование их допустимых уровней. // Гигиена населенных місць: зб. наук. пр. – К.: ДУ "ГГМЕ АМНУ", 2008. – № 55. – С. 98-104.
5. Сердюк А.М., Григор'єв П.Є., Акіменко В.Я., Протас С.В. Екологічна значущість геомагнітного поля та медично-біологічні передумови гігієнічної регламентації його ослаблення в умовах України // Довкілля і здоров'я. – 2010. – № 3. – С. 8-11.
6. Гипогеомагнитные поля в производственных, жилых и общественных зданиях и сооружениях: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.8/2.2.4.2489-09 / утв. гл. гос. санитарным врачом РФ 02.03.2009. – Бюллетьнь нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – М.: Юридическая литература, 2009. – № 17. – С. 157-161. (Нормативные документы РФ).
7. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 – [acting from July 2008]. – Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. – 5 р. (<http://www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf>).
8. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Пелевин Д.Е. Пути нормализации техногенных искажений геомагнитного поля в среде длительного пребывания людей // Гигиена населенных місць: зб. наук. пр. – К.: ДУ "ГГМЕ АМНУ", 2007. – № 50. – С. 232 – 242.
9. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Реуцкий С.Ю. Оптимизация параметров систем компенсации стационарных искажений геомагнитного поля в помещениях // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 5. – С. 11-16.
10. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М: Наука, 1980. – 352 с.
11. Пелевин Д.Е. Определение исходных данных для электромагнитных устройств управления магнитным полем в помещениях. // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 3. – С. 73-76.
12. Static Magnetic Fields: report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation: [Documents of the Health Protection Agency Radiation / Chairman: Prof. A. J. Swerdlow]. – Chemical and Environmental Hazards, 2008. – 143 р.
13. Čermáková E. Magnetization of Steel Building Materials and Structures in the Natural Geomagnetic Field. // Acta Polytechnica. – 2005. – № 6. – С. 47-52.
14. Кузнецов А.В., Карапуш С.А. Влияние строительных конструкций и этажности зданий на геомагнитное поле внутри помещений в г. Томске. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 1. – С. 80-85.
15. Резинкина М.М., Ерисов А.В., Пелевин Д.Е., Лобжанидзе Л.Э. Экспериментальное исследование влияния индуцированной и остаточной намагниченности ферромагнитных конструкций на ослабление геомагнитного поля в жилых помещениях. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2009. – № 41. – С. 111-120.
16. Резинкина М.М., Пелевин Д.Е., Думанский Ю.Д., Биткин С.В. Ослабление геомагнитного поля в многоквартирных домах различных проектов. // Гигиена населенных місць: зб. наук. пр. – К.: ДУ "ГГМЕ АМНУ", 2009. – № 54 – С. 209-216.
17. Hanada E., Takano K., Mishima H., Kodama K., Antoku Y., Watanabe Y., Nose Y. Possibility of electromagnetic interference with electric medical equipment by residual magnetization in a building with a steel structure. // IEEE EMC Soc. Newsletter. – 2001. – No. 189. – P. 15-19.
- Bibliography (transliterated):**
1. Holodov Yu.A. Organizm i magnitnye polya. // Uspehi fiziologicheskikh nauk. - 1982. - T.13, № 2. - S. 48-64.
 2. Pohodzej L.V. Gipogeomagnitnye usloviya kak neblagopriyatnyj faktor proizvodstvennoj sredy: dis. ... doktora med. nauk : 14.00.50 / Pohodzej L.V. - M., 2004. - 190 s.
 3. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskij Yu.D., Gvozdenko L.A. Issledovanie tehnogennyykh iskazhenij geomagnitnogo polya v zhilyh i proizvodstvennyh pomescheniyah i opredelenie putej ih snizheniya do bezopasnogo urovnya. // Tehnicheskaya elektrodinamika. Tematicheskiy vypusk "Problemy sovremennoj elektrotehniki". - 2008. - Ch. 2. - S. 3-8.
 4. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskij Yu.D., Bitkin S.V. Analiz tehnogennyykh iskazhenij geomagnitnogo polya v pomescheniyah i normirovanie ih dopustimyh urovnej. // Gigiena naselenih misc': zb. nauk. pr. - K.: DU "IGME AMNU", 2008. - № 55. - S. 98-104.
 5. Serdyuk A.M., Grigor'ev P.C., Akimenko V.Ya., Protas S.V. Ekologichna znachusnist' geomagnitnogo polya ta medichno-biologichni peredumovi gigienichnoi reglamentacii joho oslablennya v umovah Ukrayini // Dovkillya i zdorov'ya. - 2010. - № 3. - S. 8-11.
 6. Gipogeomagnitnye polya v proizvodstvennyh, zhilyh i obshchestvennyh zdaniyah i sooruzheniyah: Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy. SaNPiN 2.1.8/2.2.4.2489-09 / utv. gl. gos. sanitarnym vrachom RF 02.03.2009. - Byulleten' normativnyh aktov federal'nyh organov ispolnitel'noj vlasti. - M.: Juridicheskaya literatura, 2009. - № 17. - S. 157-161. (Normativnye dokumenty RF).
 7. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 - [acting from July 2008]. - Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. - 5 p. (www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf).
 8. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Pelevin D.E. Puti normalizacii tehnogennyykh iskazhenij geomagnitnogo polya v srede dlitel'nogo prebyvaniya lyudej // Gigiena naselenih misc': Zb. nauk. pr. - K.: DU "IGME AMNU", 2007. - № 50. - S. 232 - 242.
 9. Rozov V.Yu., Pelevin D.E., Reuckij S.Yu. Optimizaciya parametrov sistem kompensacii stacionarnyh iskazhenij geomagnitnogo polya v pomescheniyah // Tehnichna elektrodinamika. - 2009. - № 5. - S. 11-16.
 10. Zav'yalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. Metody splajn-funkcij. - M: Nauka, 1980. - 352 c.
 11. Pelevin D.E. Opredelenie ishodnyh dannyh dlya elekromagnitnyh ustrojstv upravleniya magnitnym polem v pomescheniyah. // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2007. - № 3. - S. 73-76.
 12. Static Magnetic Fields: report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation: [Documents of the Health Protection Agency Radiation / Chairman: Prof. A. J. Swerdlow]. - Chemical and Environmental Hazards, 2008. - 143 r.
 13. Čermáková E. Magnetization of Steel Building Materials and Structures in the Natural Geomagnetic Field. // Acta Polytechnica. - 2005. - № 6. - S. 47-52.
 14. Kuznetsov A.V., Karaush S.A. Vliyanie stroitel'nyh konstrukcij i etazhnosti zdanij na geomagnitnoe pole vnutri pomeschenij v g. Tomskie. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. - 2012. - № 1. - S. 80-85.
 15. Rezinkina M.M., Erisov A.V., Pelevin D.E., Lobzhaniidze L.E. 'Eksperimental'noe issledovanie vliyanija inducirovannoj i ostanochnoj namagnichennosti ferromagnitnyh konstrukcij na oslablenie geomagnitnogo polya v mnogokvartirnyh domah razlichnyh proektorov. // Gigiena naselenih misc': Zb. nauk. pr. - K.: DU "IGME AMNU", 2009. - № 54 - S. 209-216.
 16. Rezinkina M.M., Pelevin D.E., Dumanskij Yu.D., Bitkin S.V. Oslablenie geomagnitnogo polya v mnogokvartirnyh domah razlichnyh proektorov. // Gigiena naselenih misc': Zb. nauk. pr. - K.: DU "IGME AMNU", 2009. - № 54 - S. 209-216.
 17. Hanada E., Takano K., Mishima H., Kodama K., Antoku Y., Watanabe Y., Nose Y. Possibility of electromagnetic interference with electric medical equipment by residual magnetization in a building with a steel structure. // IEEE EMC Soc. Newsletter. - 2001. - No. 189. - R. 15-19.

Поступила (received) 20.06.2013

Розов Владимир Юрьевич, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины,
Пелевин Дмитрий Евгеньевич, к.т.н.,
Левина Светлана Владимировна
Научно-технический центр магнетизма технических
объектов НАН Украины (НТЦ МТО НАН Украины),
61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,
тел., факс/phone, fax: +38 0572 992162,
e-mail: ntcmto@nas.gov.ua.

Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., Levina S.V.
Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects
of National Academy of Sciences of Ukraine
19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine

Experimental research into indoor static geomagnetic field weakening phenomenon.

A technique and results of experimental studies of geomagnetic field (GMF) induction in 195 different rooms in educational institutions, residential buildings, shopping malls and subway are presented. It is shown that in all the buildings there is weakening of the natural GMF. However, the GMF weakening is slight in the most areas and not dangerous to public health. Exceptions are areas of high-rise frame-cast-in-place residential blocks, offices and premises of shopping centers with steel frames and platforms of underground stations. Here, the GMF can be weakened to a dangerous level (less than 25 μ T), which requires measures for its normalization.

Key words – static geomagnetic field, steel building construction, residential areas, geomagnetic field weakening, sanitary norms.

БЕЛИКОВ ВІКТОР ТРИФОНОВИЧ

(к 80-тилію со дня народження)

24 січня 1934 року в місті Кременчуці родився відомий український електромеханік – Заслужений ізобретатель України Віктор Трифонович Беликов. Його батько був флотським офіцером, тому ранні роки ювіляра пройшли в приморських містах – Владивостоці та Одесі. В 1950 році, закінчивши середню школу з медаллю, В.Т. Беликов поступив на електротехнічний факультет Одеського політехнічного інституту (ОПІ), який закінчив у 1955 році також з відмінною оцінкою, отримавши спеціальність інженера-електрика по електрообладнанню промислових підприємств. Інженерна діяльність В.Т. Беликова почалася в посаді головного інженера енергограйону Одеської Воєнно-Морської бази. Учёбу в школі та інституті він совміщав з інтенсивними заняттями спортивної гімнастики. В перші роки інженерної роботи це юношеске увлеченьня взяло верх, і в початку 1957 року В.Т. Беликов перейшов до спортивних тренувань на професійній основі, временево залишивши роботу по інженерній спеціальності. В 1957 році він виконав норматив майстра спорту. В 1958-59 роках був включений в склад збірної команди України по спортивній гімнастиці, членами якої в то час вже були прославлені українські чемпіони-олімпійці Лариса Латыніна, Борис Шахлін та Юрій Титов.

В 1960 році В.Т. Беликов повернувся до інженерної діяльності – він був призначений на роботу інженером НІС на кафедру електрических машин ОПІ, де в повній мірі розкрилися його способності дослідника та ізобретача в області теорії та практики спеціальних електрических машин. В 1967 році він успішно захистив кандидатську диссертацію, присвячену проблемам дослідження теорії та практики плавного регулювання швидкості асинхронного двигуна предложеній им авторською конструкцією. В 1971 році йому було присвоєно ученоє звання доцента кафедри «Електрическі машини».

В 1968 році В.Т. Беликов по порадію Одеського СКБ спеціальних станків став його науковим консультантом та керівником тематики по промисловому внедренню широкорегульованих прецизійних лінійних приводів постійного струму. На кафедрі електрических машин ОПІ були розвернуті інтенсивні дослідження з питань створення систем прямого електропривода на базі форсуючих лінійних двигунах постійного струму. Науково-дослідницьку роботу цього напрямлення ювіляр вів проводив впродовж більше двадцяти наступних років. На протяженні короткого періоду часу лично В.Т. Беликовим та його науковими колегами були запропоновані та реалізовані практично нові в цій області технічні рішення. На їх основі були вперше виготовлені, випробовані та передані в промислову експлуатацію приводи на лінійних двигунах. Була створена та введена в промислову експлуатацію транспортна система на Білгород-Дністровському медико-інструментальному заводі. Принципально

новим техніческим рішенням, розробленим лично В.Т. Беликовим, явилися електрическі двигуни з винтобразним статором. На основі таких двигунів були розроблені та внедрені в промислову виробництво прецизійні станочні механізми на Казанському авіазаводі. Робота в ОПІ, ювіляр стала автором та соавтором 53 авторських свідчення, 15 зарубежних патентів та 42 наукових праць. В це ж час він впродовж одинадцяти років працював як секретар Совету ОПІ.

В 1997 році доцент В.Т. Беликов був запрошений на роботу в систему вищих військових навчальних заведень Міністерства оборони України в статусі професора – наукового керівника ад'юнктів Одеського інституту Сухопутних військ, де він продовжує працювати і зараз. Тут він відновив свою активну науково-дослідницьку та ізобретачську діяльність, організував нове наукове напрямлення з питань застосування лінійних та дугових електрических двигунів в військовій техніці.

В співпраці з колегами з роботами в Науковому центрі боевого застосування Сухопутних військ та науково-дослідницької лабораторії Військової академії (г. Одеса) він отримав 36 патентів України по тематиці, пов'язаній з підвищенням техніческих характеристик зброї та військової техніки, в тому числі п'ять – по спеціальній тематиці. Особливу актуальність мали розробки В.Т. Беликова з питань створення модульних наземних роботів. Патентні розробки, виконані під його науковим керівництвом, були представлена на Всеармейських конкурсах «Лучше ізобретение року» та регулярно отмечались прізовими дипломами. Внедрення його ізобретень в промисловість було відмінено Почесним знаком «Ізобретатель ССР». В 2003 та 2010 роках В.Т. Беликов був нагороджений Почесними грамотами Міністра оборони України за активну ізобретачську діяльність. К настоящому моменту на рахунку В.Т. Беликова 105 вітчизняних та зарубежних патентів. Общее число його наукових праць перевищує 166. Під науковим керівництвом ювіляра захищено 9 кандидатських дисертацій. Серед його учнів, яких він привів до наукової та ізобретачської роботи в їх студентські роки, три доктори техніческих наук та декілька професорів.

В грудні 2010 року Віктор Трифонович був удостоєний Почесного звання «Заслужений ізобретатель України» за великий личний вклад у підтримку обороноспроможності Українського держави, образований виконання воїнського обов'язку та високий професіоналізм. Друзі, колеги та учні Віктора Трифоновича іскренно поздравляють його з ювілем, хочуть йому добре здоров'я та дальніших успіхів в його науковій та ізобретачській діяльності.

Редакційна колегія журналу «Електротехніка та Електромеханіка» присоединяється до теплих пожелань.

