науково-практичний 2015/8 [[

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена
Електричні машини та апарати
Електротехнічні комплекси та системи.
Силова електроніка
Техніка сильних електричних та магнітних полів.
Кабельна техніка
Електричні станції, мережі і системи
Ювілеї

За 2013 р. журнал отримав індекс 6,11 від міжнародної наукометричної бази Index Copernicus



"ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ") у 2002 р.

Співзасновник – Державна установа "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України" (ДУ "ІТПМ НАНУ")

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації Серія КВ № 21021-10821ПР від 07.10.2014 р.

ELEKTROTEKHNIKA I ELEKTROMEKHANIKA – ELEKTROTEHNÌKA Ì ELEKTROMEHANÌKA – ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Klymenko B.V. Editor-in-Chief, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Ukraine

Sokol Ye.I. Deputy Editor, Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI", Ukraine

Rozov V.Yu. Deputy Editor, Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute

of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine" (SI "ITPM NASU"), Kharkiv, Ukraine

Batygin Yu.V. Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

Bíró O. Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria

Bolyukh V.F. Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Doležel I. Professor, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic

Féliachi M. Professor, University of Nantes, France

Gurevich V.I. Ph.D., Honorable Professor, Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, Haifa, Israel

Kildishev A.V. Associate Research Professor, Purdue University, USA

Kuznetsov B.I. Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine

Kyrvlenko O.V. Professor, Member of NAS of Ukraine, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Podoltsev A.D. Professor, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Rainin V.E. Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia

Rezynkina M.M. Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine

Rozanov Yu.K. Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia

Shkolnik A.A. Ph.D., Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, member of CIGRE (SC A2 - Transformers), Haifa, Israel

Yuferov V.B. Professor, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Ukraine

Vinitzki Yu.D. Professor, GE EEM, Moscow, Russia

Zagirnyak M.V. Professor, Corresponding member of NAES of Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskyi National University, Ukraine

Zgraja J. Professor, Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology, Poland

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

Клименко Б.В.	головний редактор, професор, НТУ "ХПІ"
Сокол Є.І.	заступник головного редактора,
	член-кор. НАНУ, ректор НТУ "ХПІ"
Розов В.Ю.	заступник головного редактора,
	член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ"

член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ" Гречко О.М. відповідальний секретар, к.т.н., НТУ "ХПІ"

Баранов М.І.Д.Т.н., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"Боєв В.М.професор, НТУ "ХПІ"Веприк Ю.М.професор, НТУ "ХПІ"Гриб О.Г.професор, НТУ "ХПІ"Гурин А.Г.професор, НТУ "ХПІ"Данько В.Г.професор, НТУ "ХПІ"Жемеров Г.Г.професор, НТУ "ХПІ"

Кравченко В.І. професор, директор НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"

 Мілих В.І.
 професор, НТУ "ХПІ"

 Михайлов В.М.
 професор, НТУ "ХПІ"

 Омельяненко В.І.
 професор, НТУ "ХПІ"

 Пуйло Г.В.
 професор, ОНТУ, Одеса

 Резинкін О.Л.
 професор, НТУ "ХПІ"

 Рудаков В.В.
 професор, НТУ "ХПІ"

Сосков А.Г. професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова,

Харків

Ткачук В.І. професор, НУ "Львівська Політехніка" **Шинкаренко В.Ф.** професор, Національний технічний університет

України "Київський політехнічний інститут"

* Члени національної редакційної колегії працюють у провідних українських наукових, освітніх та дослідницьких установах

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

Klymenko B.V.	Editor-in-Chief, professor, NTU "KhPI"
Sokol Ye.l.	Deputy Editor, corresponding member of
	NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI"
Rozov V.Yu.	Deputy Editor, corresponding member of
	NAS of Ukraine, Director of SI "ITPM NASU"
Grechko O.M.	Executive Managing Editor, Ph.D., NTU "KhPI"

Свідоцтво

Baranov M.I. Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI" Boev V.M. Professor, NTU "KhPI" Professor, NTU "KhPI" Vepryk Yu.M. Gryb O.G. Professor, NTU "KhPI" Guryn A.G. Professor, NTU "KhPI" Dan'ko V.G. Professor, NTU "KhPI" Zhemerov G.G. Professor, NTU "KhPI" Kravchenko V.I. Professor, NTU "KhPI" Milykh V.I. Professor, NTU "KhPI" Mikhaylov V.M. Professor, NTU "KhPI"

Omel'yanenko V.I. Professor, NTU "KhPI"

Puilo G.V. Professor, Odessa National Polytechnic University

Rezynkin O.L. Professor, NTU "KhPI" Professor, NTU "KhPI"

Soskov A.G. Professor, O.M. Beketov Kharkiv National

University of Municipal Economy

Tkachuk V.I. Professor, Lviv Polytechnic National University

Shynkarenko V.F. Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Frunze Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +38 057 7076281, +38 067 359 46 96, e-mail: a.m.grechko@mail.ru (Гречко Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X ISSN (online) 2309-3404 © Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2015 © ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2015

Підписано до друку 08.06.2015 р. Формат 60 х 90 $\frac{1}{8}$. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25. Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-03-2015. Ціна договірна.

^{*} Members of National Editorial Board work in leading Ukrainian scientific, educational and research institutions



ENEKTPOTEXHIKA I ENEKTPOMEXAHIKA ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS



Науково-практичний журнал Научно-практический журнал Scientific and practical journal

EIE

Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ "ХПІ", протокол № 6 від 29.05.2015 та Вченою радою ДУ "ІТПМ НАНУ", протокол № 8 від 10.06.2015

2015/3

3MICT

Електротехніка.	Визначні по	дії. Славетні	і імена
-----------------	-------------	---------------	---------

Баранов М.И. Антология выдающихся достижении в науке и технике. Часть 26: 1ри портрета всемирно известных математиков Харьковщины	3
Електричні машини та апарати	
Середа О.Г., Варшамова І.С. Захист асинхронних електродвигунів побутових приладів від струмів	
перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму	. 14
Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Сравнительный анализ массостоимостных показателей асинхронных	
двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором	. 20
Сьомка О.О., Прус В.В. Комп'ютеризований діагностичний комплекс для випробувань електричних машин на надійність	. 27
Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка	
Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Эффективность линейных импульсных электромеханических	
преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей	. 31
Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Волошко А.В. Снижение уровня техногенного магнитного поля	
промышленной частоты внутри заданной области пространства методами активного экранирования	
на основе алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации	41
Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка	
Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кузьминский Е.В., Мысюк Ю.И., Рудаков С.В. Результаты испытаний	
молниеотводов с универсальными зажимами апериодическими импульсами тока искусственной молнии	
с нормированными по международным стандартам амплитудно-временными параметрами	48
Волонцевич Д.О., Барбашова М.В., Радченко Е.С. Расчёт полей в комбинированных индукторных	
системах – инструментах рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов	. 55
Електричні станції, мережі і системи	
Доманский И.В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами	
компенсации реактивной мощности	. 59
Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах	. -
расположения энергообъектов Украины	67
Ювілеї	
Колиушко Георгий Михайлович (к 75-летию со дня рождения)	73
TABLE OF CONTENTS	
Electrical Engineering. Great Events. Famous Names	
Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 26: Three portraits	
of worldwide known mathematicians of Kharkov region	3
Electrical Machines and Apparatus	
Sereda O.G., Varshamova I.S. Protection of household appliances induction motors against overcurrent taking into	
account nonlinear distortion of phase current	. 14
Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Comparative analysis of weight and cost indications of induction motors with	
cylindrical and axial air gaps	
Somka O.O., Prus V.V. A computerized diagnostic complex for reliability testing of electric machines	. 27
Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics	
Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed	
to create impact loads and high speeds	. 31

Kuznetsov B.I. , Nikitina T.B., Voloshko A.V. Power frequency technogenic magnetic field reduction by active	
screening in system synthesis in area based on stochastic multi-agent optimization.	. 41
High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering	
Baranov M.I., Koliushko G.M., Kuzminskiy E.V., Mysyuk Yu.I., Rudakov S.V. Results of tests of lightning-rods with universal clamps by the aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters	
rationed on foreign standards	. 48
Voloncevich D.O., Barbashova M.V., Radchenko E.S. Calculation of fields in a combined inductor system as a tools of straightening of metal coating of car body	. 55
Power Stations, Grids and Systems	
Domanskyi I.V. Modes of operation of the system of traction power AC using reactive power compensation devices Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the	59
vicinity electrical substation of Ukraine	. 67
Anniversaries	
Koliushko Georgii Mikhailovich (on the 75th anniversary of his birth)	. 73
IIIAHORHI UUTAUI!	

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" – передплатне видання. Вартість передплати на 2016 рік — 281,10 грн., на два місяці — 46,85 грн., на чотири місяці — 93,70 грн., на шість місяців — 140,55 грн., на вісім місяців — 187,40 грн., на десять місяців — 234,25 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

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

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

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

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

Журнал "Електротехніка і Електромеханіка" включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory, представлений у загальнодержавній реферативній базі даних "Україніка Наукова", реферативному журналі "Джерело", індексується у міжнародних наукометричних базах даних Index Copernicus, Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, Elektronische Zeitschriftenbibliothek та ін.



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.

УДК 621.3:537.311:910.4

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 26: ТРИ ПОРТРЕТА ВСЕМИРНО ИЗВЕСТНЫХ МАТЕМАТИКОВ ХАРЬКОВЩИНЫ

Наведено короткий науково-історичний нарис про трьох найбільш відомих математиків Харківщини— академіках Погорілові О.В., Марченко В.О. і Садовнічем В.А. і їх видатних внесках в світову науку. Портрети даних учених-математиків розглянуті на тлі минулого і сучасного стану розвитку математичної науки в Харкові. Бібл. 30, рис. 14. Ключові слова: історія, математика, Харківщина, видатні наукові досягнення.

Приведен краткий научно-исторический очерк о трех наиболее известных математиках Харьковщины — академиках Погорелове А.В., Марченко В.А. и Садовничем В.А. и их выдающихся вкладах в мировую науку. Портреты данных ученых-математиков рассмотрены на фоне прошлого и современного состояния развития математической науки в Харькове. Библ. 30, рис. 14.

Ключевые слова: история, математика, Харьковщина, выдающиеся научные достижения.

«...В каждой естественной науке заключено столько истины, сколько в ней есть математики». Философ 18-19 веков И. Кант

Введение. Математика как наука занимается, как известно, описанием количественных отношений и пространственных форм окружающего нас мира [1]. С учетом ее единого внутреннего существа математика была, есть и будет всегда у землян основой всего точного естествознания. В свое время выдающийся английский математик Давид Гильберт в своем докладе на Международном математическом конгрессе (г. Париж, 1900 г.) о подобном предназначении математики как науки сказал следующее [2]: «...Для того чтобы в совершенстве выполнить это высокое назначение, пусть в грядущем столетии она (математика) обретёт гениальных мастеров и многочисленных пылающих благородным рвением приверженцев». Необходимо сразу объективно сказать о том, что мне, как, наверное, и другим популяризаторам науки, было достаточно трудно делать достойные словесные портреты «больших» ученых - людей планетарного масштаба. Применительно к предмету нашего рассмотрения под понятием «портрет» (происходит от франц. слова «portrait» - «изображение человека или группы людей» [1]) будем понимать многостороннее описание образа того или иного персонажа (нашего героя) в сфере его научно-технической деятельности и быту. А что было и есть с математикой в г. Харькове? Что насчет достойных приверженцев этой великой науки, находящейся в фундаментальной основе всех известных нам наук, на Харьковщине? Постараемся ниже вкратце в меру своих ограниченных возможностей и знаний раскрыть эту местную научную проблематику.

1. Истоки математической науки на Харьковщине. Начнем с того, что в созданном на юге Российской империи Харьковском университете им. В.Н. Каразина (учрежден 17 ноября 1804 г., открыт 29 января 1805 г. [2]) основным учебным подразделением было отделение физических и математических наук. С самого начала преподавание математики на этом учебном отделении университета было на достаточно высоком уровне. Харьковский университет со временем становится крупным математическим центром тогдашней России — вторым после столичного. В 1879 г. было

создано Харьковское математическое общество. Уже во второй половине XIX века и в начале XX века в г. Харькове работали такие выдающиеся личности и математические светила мирового масштаба как: А.М. Ляпунов [3], В.Г. Имшенецкий, В.А. Стеклов и С.Н. Бернштейн [4-6]. Именно эти известные всему миру украинско-российские учёные-математики и механики и начали формировать образ развитого в промышленном отношении г. Харькова как города высокой математической культуры. Именно с них и началось формирование Харьковской научной математической школы. Здесь нам для полноты картины следует вспомнить и тот один интересный исторический факт, что в 1900 г. на Международном математическом конгрессе в г. Париже русская математика была представлена единственным сообщением харьковского математика М.А. Тихомандрицкого [4, 7].

Важной точкой отсчета в жизни Харьковской математической школы является создание научноисследовательского института (НИИ) математики и механики при Харьковском государственном университете (ХГУ) [7]. В период 1935-1950 гг. руководителем этого НИИ при ХГУ был д.ф.-м.н., проф., академик АН УССР Наум Ильич Ахиезер. Харьковчане еще долго будут чтить память о д.ф.-м.н. этого НИИ -Антоне Казимировиче Сушкевиче, являвшимся известным специалистом в области теории групп. Считается, что именно А.К. Сушкевич практически спас в период оккупации г. Харькова немцами библиотеку НИИ математики и механики, которая и поныне функционирует в ХГУ [7]. В указанном НИИ успешно трудилось до нескольких десятков харьковских математиков. В 1951 г. данный институт математики и механики по указанию из г. Киева был закрыт. У его сотрудников начались «диффузионные» и «центробежные» процессы: кто-то уехал из г. Харькова, а ктото трудоустроился в другой институт. В конце 1950-х годов в г. Харькове по линии АН УССР создается новый физико-технический институт низких температур (ФТИНТ), директор которого Борис Иеремиевич Веркин проявляет мудрость и приглашает на работу в свой институт бывших сотрудников НИИ математики и механики при ХГУ [7]. Так во ФТИНТе АН УССР стали появляться математические отделы. Теперь для

© М.И. Баранов

меня становится более понятным тот факт, что именно ФТИНТ АН УССР в советское время стал в г. Харькове обладателем наиболее крупной вычислительной электронно-вычислительной машины типа БЦВМ-6, на которой многие ученые Харьковского политехнического института (ХПИ) осуществляли численные решения своих научно-технических задач.

В середине XX века математический г. Харьков ассоциируется с такими известными отечественными учёными-математиками высочайшего уровня как: Н.И. Ахиезер, Б.Я. Левин, А.В. Погорелов и В.А. Марченко [2, 4-6]. На протяжении последнего столетия на Харьковщине сложились следующие три известные во всем научном мире математические школы [2]: геометрии, математической физики и теории функций. Геометры всего мира высоко ценят «теоремы Погорелова в теории выпуклых поверхностей». В области математической физики специалисты нашей планеты хорошо знают «*уравнение Марченко*». В области теории функций работы «Ахиезера по теории аппроксимации и теории операторов» и труды «Левина по теории целых функций» стали классикой в мировой математической литературе [2, 4]. Вкратце указав основные истоки основных математических *школ Харьковщины*, перейдем к описанию портретов нескольких представителей этих научных школ [2].

2. Портрет первый - академик Погорелов Алексей Васильевич. Родился Погорелов А.В. 3 марта 1919 г. в российском г. Короча (районном центре Белгородской области) в семье рабочего. Математические способности у него проявились уже в средней школе. Одноклассники из-за этого называли его «Паскаль». В 1937 г. Алексей стал студентом физикоматематического факультета ХГУ. В этом университете он успел проучиться лишь четыре года - до начала войны с Германией. В 1941 г. его призвали в армию и направили учиться в Московскую Военновоздушную академию им. Н.Е. Жуковского, которую он окончил с отличием в 1945 г. [8]. После войны он в течение двух лет работал инженером-конструктором в Центральном аэрогидродинамическом институте (г. Жуковский, Московской обл.) и одновременно учился на механико-математическом факультете Московского государственного университета (МГУ) им. М.В. Ломоносова. Делал он это для того, чтобы окончить последний вузовский курс. Именно в эти годы сформировался редкий сплав «рафинированного математика», изучающего абстрактные проблемы геометрии «в целом», и инженера-конструктора, имеющего дело с конкретным «железом» [8]. После он пошел учиться в заочную аспирантуру при МГУ по специальности «геометрия и топология» (его научный руководитель - д.ф.-м.н., проф. М.В. Ефимов, являвшийся геометром с мировым именем). В 1947 г. Погорелов А.В. защитил кандидатскую диссертацию по геометрии общих выпуклых поверхностей и переехал на постоянное жительство в г. Харьков. С 1947 г. Погорелов А.В. начал преподавательскую деятельность в ХГУ. В 1948 г. он, работая старшим научным сотрудником НИИ математики и механики при ХГУ и развивая выбранную им тематику в области выпуклой и дифференциальной геометрии, защитил докторскую диссертацию [8]. Исследовав «зависимости свойств регулярности выпуклых поверхностей от регулярности их метрики» и решив проблему «однозначной определенности для обширного класса незамкнутых выпуклых поверхностей», Погорелов А.В. становится одним из ведущих геометров мира [4, 8]. За научную монографию по этой математической тематике он в 1950 г. становится самым молодым в СССР лауреатом Сталинской (Государственной) премии второй степени (рис. 1) [9].



Рис. 1. Молодой лауреат Сталинской (Государственной) премии СССР, математик-геометр Погорелов А.В. (1950 г.)

Учитывая изложенные выше данные, авторитетный московский журнал «Огонек» после правительственного сообщения о лауреатах Сталинских (Государственных) премий СССР за 1950 г. помещает его фотографию на свою обложку. С этого момента он становится широко известным общественности ученым-математиком. На денежное лауреатское вознаграждение Погорелов А.В. родителям покупает под г. Харьковом дачу, а себе — легковой автомобиль «Победу», с которым был неразлучен более 40 лет [9].

В 1951 г. Погорелов А.В. был избран член.-корр. АН Украины, а в 1960 г. – академиком АН Украины и член-корр. АН СССР. С 1960 г. и по 2000 г. он беспрерывно проработал во ФТИНТе АН УССР (НАНУ), занимая там должность заведующего отделом геометрии (рис. 2). С 1976 г. Алексей Васильевич – академик АН СССР, а в 1991 г. он был избран академиком Российской АН (РАН) [9]. В 2000 г. он, после получения гражданства Российской Федерации (РФ) специальным указом Президента РФ Б.Н. Ельцина и смерти в г. Харькове своей любимой жены Тамары Ивановны, переехал в г. Москву (поближе к семье своего единственного сына Леонида, проработавшего, кстати, не один год научным сотрудником во ФТИНТе АН УССР) и работал в Математическом институте им. В.А. Стеклова РАН в отделе геометрии и топологии.

Чем же все-таки прославился в научном мире наш знаменитый земляк-математик? Постараемся ниже вкратце сформулировать полученные им основные результаты в области *геометрии* (это математическое понятие происходит от греч. слова «*geōmetria*» — «*зем-лемерие*» [1]) — древнейшей на нашей планете науке, являющейся частью *математики* и изучающей пространственные отношения и формы для физических

и виртуальных (мысленных или логических) тел, и смежных с ней научно-технических областях [4-12]:

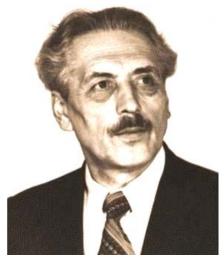


Рис. 2. Выдающийся математик современности, академик НАНУ, академик РАН, лауреат Ленинской премии, Государственных премий СССР и УССР, заслуженный деятель науки и техники Украины Погорелов А.В. (1919-2002 гг.)

- Решение проблемы однозначной определенности общих выпуклых поверхностей их метрикой;
- Создание внешней геометрии выпуклых поверхностей как отдельного раздела классической дифференциальной геометрии;
- Построение геометрической теории поверхностей ограниченной внешней кривизны;
- Получение общего решения четвертой проблемы Гильберта, позволяющего определять с точностью до изоморфизма все реализации тех систем из аксиом классических геометрий Евклида и Лобачевского, в которых опущены аксиомы конгруэнтности (последнее геометрическое понятие происходит от лат. слова «congruentis» «совмещение» [1]);
- Результаты аналитических решений по проблеме Кристоффеля о нахождении замкнутой выпуклой поверхности с заданной суммой главных кривизн как функций ее нормали;
- Применение разработанных методов синтетической геометрии к нахождению аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений;
- Разработка в механике на основе результатов геометрических исследований выпуклых поверхностей нелинейной теории тонких упругих оболочек;
- Решение так называемой многомерной проблемы Минковского о существовании замкнутой выпуклой гиперповерхности, гауссова кривизна которой является заданной функцией внешней нормали;
- Разработка оригинального геометрического подхода к теоретическому решению в области механики проблемы устойчивости тонких оболочек;
- Определение жесткости тонкостенных оболочек с выпуклыми поверхностями и получение формул для расчета внешних нагрузок при обеспечении устойчивости оболочек тонкостенных конструкций (расчетные данные о критических и закритических нагрузках тонких оболочек нашли свое опытное подтверждение при лабораторных испытаниях [10]);

- Получение решений известных дифференциальных многомерных уравнений Монжа-Ампера эллиптического типа с вытекающими из них геометрическими результатами, а также разработка теоретических основ положений и теорем о существовании, устойчивости и степени гладкости этих решений;
 - Расширение теории G-пространств Буземана;
- Создание учебника геометрии для средней школы, написанного для подрастающего поколения ясным и доступным языком, построенного на строгой и прозрачной системе аксиом и выпущенного 22 изданиями за десятки лет многомиллионным тиражом;
- Пионерская разработка оригинальной геометрии построения конструкции криогенного турбогенератора со сверхпроводящей обмоткой возбуждения.

На рис. 3 приведены друзья-академики Погорелов А.В. и Веркин Б.И., обсуждающие на уличной прогулке насущные научные задачи, возникшие перед трудовым коллективом их академического института.



Рис. 3. Академик АН СССР Погорелов А.В. (справа) и директор ФТИНТ АН УССР, академик АН УССР Веркин Б.И. (слева) за обсуждением одного из текущих вопросов по научно-технической проблематике института (1980-е гг.) [4]

Вышеуказанные геометрические результаты Погорелова А.В. получили высокую оценку математиков-геометров всего мира. Они были также отмечены:

- Государственными премиями СССР (1950 г.) и УССР (1974 г.);
- Международной премией им. Н.И. Лобачевского (1959 г.);
 - Ленинской премией (1962 г.);
- Премиями им. Н.М. Крылова АН УССР (1973 г.), им. Н.Н. Боголюбова НАНУ (1998 г.) и почетным званием «Заслуженный деятель науки и техники Украины»;
- Высокими государственными наградами СССР и УССР (двумя орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени; орденом Отечественной войны второй степени; Почетной грамотой Президиума Верховного Совета УССР).

В 2001 г. ему было присвоено звание почетного гражданина г. Харькова (рис. 4). В 2012 г. ученые Крымской астрофизической обсерватории присвоили его имя малой планете 19919 (*«планета Погорелова»*), продолжающей свой бесконечный «бег» в космическом пространстве между Марсом и Юпитером [13].

5

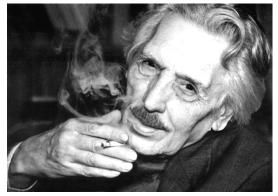


Рис. 4. Одна из последних прижизненных фотографий академика Погорелова А.В. – всемирно признанного научной общественностью выдающегося геометра XX века [4]

«...Едва ли можно сегодня назвать второго математика, который обогатил бы науку таким количеством сильных глубоких конкретных результатов в области геометрии» говорил в конце 20-го столетия один из учителей и близких по духу друзей Погорелова А.В. академик АН СССР и РАН Александр Данилович Александров о нашем герое-математике [10].

На рис. 5 запечатлен момент торжественного открытия в 2005 г. мемориальной доски академика Погорелова А.В. на здании ФТИНТа им. Б.И. Веркина НАНУ, в котором он проработал целых 40 лет.



Рис. 5. Торжественный момент открытия мемориальной доски академика Погорелова А.В. на здании ФТИНТ НАНУ (слева – академик НАНУ и РАН Марченко В.А., справа – академик НАНУ Еременко В.В., г. Харьков, 2005 г.) [4]

На рис. 6 крупным планом приведена данная мемориальная бронзовая доска академика Погорелова А.В. – выдающегося математика-геометра XX века.

Что можно сказать о Погорелове А.В. как о человеке вне его математической науки? Секрет его научного успеха не только в необычайном таланте, но и в необыкновенной трудоспособности. Он был напорист и не боялся трудностей [10]. Это был «настоящий самородок, ограненный неустанным трудом» [10]. Он был человеком широкого жизненного кругозора, с добрейшей душой, способным внимательно и спокойно выслушать как незнакомого собеседника на любую житейскую тему, так и знакомого по работе докладчика научного материала. Всегда подтянутый, красивый высокий мужчина с глубоким сосредоточенным взглядом и короткими усами, заметно выделяющийся в многолюдном потоке уличных прохожих.

Велика его роль была в создании творческой и доброжелательной атмосферы в коллективе института, в котором он проработал десятки лет. Это был увлеченный человек со многими своими хобби, начиная от вождения автомобиля, усовершенствования фотоаппаратуры и заканчивая охотой и рыбалкой [9]. Кстати, он является изобретателем безинерционной спиннинговой катушки [10]. Это был признанный ученыйпедагог, оказавший большое влияние не только на формирование Харьковской научной школы геометрии, но и молодое поколение харьковчан, стремящееся найти свое место в области математической науки.



Рис. 6. Внешний укрупненный вид мемориальной бронзовой доски академика Погорелова А.В. у центрального входа во ФТИНТ НАНУ (г. Харьков, 2005 г.) [4]

Прожил академик Алексей Васильевич Погорелов свою долгую, яркую и богатую на творческие успехи жизнь практически по талмуду, в котором написано следующее [11]: «...жизнь не наслаждение и не страдание, а дело, которое надо довести до конца».

Умер академик Погорелов А.В. 17 декабря 2002 г. в г. Москве и был с большими почестями похоронен на Николо-Архангельском кладбище (рис. 7) [9].



Рис. 7. Надгробие великого математика-геометра 20-го столетия, академика Погорелова А.В. (1919-2002 гг.) [9]

3. Портрет второй - академик Марченко Владимир Александрович. Родился Марченко В.А. 7 июля 1922 г. в г. Харькове в семье профессора сельскохозяйственного института, занимающегося лесоводством [14]. Окончив среднюю школу в 1939 г., поступил учиться в Ленинградский государственный университет (ЛГУ) на физический факультет. Одновременно он поступил на заочное отделение механико-математического факультета ЛГУ и к лету 1941 г. закончил два курса физического факультета и три курса - математического. Тяжелые годы войны с Германией и немецкой оккупации прошли для него в г. Харькове вместе с матерью и сестрой (в Красную армию его не призвали из-за близорукости, а отец умер в 1940 г.) [15]. В эти годы выживания ему и его ближайшим родственникам сильно помогли университетские знания по химии - кустарное изготовление в подвале дома бертолетовой соли и с ее помощью спичек для оккупированного населения не раз спасало их от голода [6]. После освобождения г. Харькова в 1943 г. он продолжил обучение в ХГУ. В 1945 г. после окончания университета поступил в аспирантуру и в 1948 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы суммирования обобщенных рядов Фурье», а в 1951 г. – уже докторскую диссертацию на тему «Некоторые вопросы теории одномерных линейных дифференциальных операторов второго порядка» [14]. Продолжая свою педагогическую деятельность в ХГУ, в 1950 г. он становится доцентом, а в 1952 г. – профессором кафедры математической физики этого учебного заведения. С 1961 г. у него начинается новый этап в жизни и научной работе - он становится заведующим отдела математической физики в недавно созданном ФТИНТе АН УССР (по совместительству продолжает работать профессором кафедры вычислительной математики ХГУ). Нам следует подчеркнуть, что этим отделом он успешно руководил до 2001 г. [15]. За эти 40 лет неустанного труда он стал общепризнанным крупнейшим ученымматематиком нашего времени (рис. 8).



Рис. 8. Выдающийся украинский математик, академик НАНУ, академик РАН, лауреат Ленинской премии, Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины Марченко В.А. (1922 г. рождения)

Фундаментальные исследования академика Марченко В.А. и его многочисленных ученых-учеников — д.ф.-м.н. и академиков (рис. 9) в различных областях математики приобрели в настоящее время мировую известность и признание. Его работы в области математической физики, математического анализа, теории дифференциальных уравнений в частных производных и операторов останутся в науке на многие годы.



Рис. 9. Сотрудники ФТИНТ НАНУ чествуют одного из своих юбиляров, а академики Марченко В.А. (слева) и Пастур Л.А. (справа) продолжают размышлять за праздничным столом об очередной интересной и пока не решенной никем физико-математической задаче (г. Харьков, 2006 г.) [6]

Постараемся ниже на основе ряда литературных источников [14-23] сформулировать основные фундаментальные научные результаты, полученные академиком Марченко В.А. (рис. 10) за многие десятилетия его неустанного труда в области ряда разделов математики и принесшие ему мировую известность:

- Решена обратная задача квантовой теории рассеяния физическими полями атомов, молекул, ионов и элементарных частиц и получено фундаментальное линейное интегральное уравнение, названное специалистами «уравнением Марченко» и ставшее в мире основным инструментом исследования при решении как задач рассеяния, так и нелинейных уравнений;
- Математически строго обоснован метод обратной задачи теории рассеяния, позволивший свести решение нелинейных уравнений математической физики к решению линейных спектральных задач;
- Сформулирован и решен обширный класс задач из области спектральной теории одномерных дифференциальных операторов Шредингера;
- Доказано, что банаховы алгебры, порожденные обобщенным сдвигом, изоморфны (взаимнооднозначны [1]) алгебрам с обычной сверткой;
- Разработаны новые подходы при решении задач в области гармонического анализа и развита теория почти периодических функций;
- Получена асимптотическая формула для спектральных функций и математически доказано, что спектральные функции однозначно определяют дифференциальные операторы;
- Развита спектральная теория дифференциальных и конечно-разностных операторов со случайными возмущениями (коэффициентами);

- Разработана теория обратных задач спектрального анализа для матриц Якоби;
- Разработан новый подход к решению обратной задачи спектрального анализа оператора Шредингера для уравнения Хилла с периодическим потенциалом (в соавторстве с И.В. Островским);
- Изучена устойчивость решения обратных задач спектрального анализа дифференциальных операторов;
- Решена обратная задача рассеяния для оператора Штурма-Лиувилля на всей оси с точной характеризацией полного набора независимых данных рассеяния в классе потенциалов, имеющих первый суммируемый момент;
- Предложен метод решения периодической задачи Коши для уравнения Кортевега-де Фриза;
- Получены точные оценки погрешности восстановления потенциала и собственных функций оператора Штурма-Лиувилля на полуоси в зависимости от длины интервала, на котором известна функция рассеяния;
- Создана общая теория обратных задач математической физики, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных;
- Решена обратная задача для операторов с периодическими потенциалами (в соавторстве с И.В. Островским);
- Строго описаны характеристические свойства известных решений Вейля для операторов Шредингера и Дирака с неубывающими потенциалами;
- Разработана *теория дифракции электромагнитных воли* на периодических структурах (в соавторстве с З.С. Аграновичем и В.П. Шестопаловым), основанная на задаче Римана-Гильберта и сыгравшая заметную роль в развитии прикладных вопросов радиоэлектроники (в частности, она была использована в ИРЭ им. А.Я. Усикова АН УССР при расчете генераторов субмиллиметровых радиоволн [24]);
- Разработана теория усреднения дифференциальных уравнений в частных производных, нашедшая широкое применение при построении макроскопических моделей различных физических процессов, протекающих в микронеоднородных средах;
- Построена асимптотическая теория краевых задач с мелкозернистой границей (в соавторстве с Е.Я. Хрусловым), позволяющая находить пределы, к которым сходятся решения подобных задач при неограниченном измельчении границы и оценивать скорость их сходимости;
- Разработана теория усреднения краевых задач математической физики в областях сложной микроструктуры (она нашла свою реализацию в технологии получения новых композиционных материалов [25]);
- Найдены пределы интегральных плотностей распределения собственных значений ансамблей случайных матриц (в соавторстве с Л.А. Пастуром), когда их размерность стремится к бесконечности. Эта пионерская работа сыграла важную роль в дальнейшей разработке теории широко распространенных в природе неупорядоченных систем;
- Разработана спектральная теория случайных матриц и случайных операторов (в соавторстве с Л.А. Пастуром);

• Развит новый метод решения интегрируемых нелинейных эволюционных уравнений, позволяющий решать нелинейные задачи Коши с нестабилизирующимися на бесконечности начальными данными.



Рис. 10. Академик Марченко В.А. в канун своего 90-летия на своем рабочем месте за решением новой актуальной научно-технической задачи (ФТИНТ НАНУ, 2012 г.) [5]

Указанные выше научные заслуги математика Марченко В.А. получили широкое общественное признание, о чем свидетельствует то, что он стал [14, 15]:

- член-корр. АН УССР (1961 г.) и академиком АН УССР (1969 г.); академиком АН СССР (1987 г.);
 - лауреатом Ленинской премии (1962 г.);
- лауреатом премий им. Н.М. Крылова (1983 г.), им. Н.Н. Боголюбова (1996 г.) и им. М.А. Лаврентьева НАН Украины (2007 г.); был награжден Золотой медалью им. В.И. Вернадского НАН Украины (2010 г.);
- лауреатом Государственной премии Украины в области науки и техники (1989 г.);
- Заслуженным деятелем науки и техники Украины (1992 г.);
- за исключительные научные достижения ему были присуждены звания Почетного доктора Парижского университета (1997 г.) и Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина (2002 г.); он был избран членом Норвежского Королевского общества наук и литературы (2001 г.);
- был награжден высокими государственными наградами СССР и Украины: двумя орденами Трудового Красного знамени (1967 и 1982 гг.); орденами Ярослава Мудрого V (2002 г.) и IV (2007 г.) степеней;
- был удостоен звания «Почетный гражданин Харьковской области» (2007 г.).

А что насчет личных качеств и образа жизни вне математики у нашего очередного знаменитого харьковского героя-ученого? Известно, что в свое время Владимир Александрович серьезно увлекался байдарочными походами и лыжными прогулками [15]. Эти спортивные занятия способствовали поддержанию его физической формы и желанию активно заниматься математикой. В опубликованных материалах о нем содержатся сведения о том, что он много внимания ранее уделял своей семье, воспитанию сына и дочери, которые, так же как и отец, получили математическое образование [14]. Отмечается, что общение с друзьями

и научными коллегами всегда доставляет ему огромное удовольствие, а его доброжелательность и уважительное отношение к людям, в свою очередь, находят благодарный отклик у многих окружающих.

Подытоживая, можно уверенно говорить о том, что для Владимира Александровича Марченко *математика* была и осталась смыслом его долгой жизни.

4. Портрет третий – академик Садовничий Виктор Антонович. Родился Садовничий В.А. 3 апреля 1939 г. в с. (ныне пгт.) Краснопавловка (Лозовской район, Харьковской обл.) в семье рабочего и колхозницы. После окончания сельской средней школы в период 1957-1958 гг. работал на Донбассе рабочим-крепильщиком в забое на шахте «Комсомолец». В 1958 г. он поступил на механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова и осознанно избрал делом своей жизни математику [26]. В 1963 г. с отличием окончил указанный факультет МГУ по специальности «Математика», а в 1966 г. досрочно – аспирантуру МГУ и защитил кандидатскую диссертацию (научный руководитель - проф. А.Г. Костюченко). Докторскую диссертацию защитил в 1975 г. [26]. С 1975 г. – профессор МГУ. В период 1981-1982 гг. возглавлял кафедру функционального анализа и его приложений на факультете вычислительной математики и кибернетики МГУ. С 1982 г. и по сей день является заведующим кафедры математического анализа на механико-математическом факультете МГУ. Работал заместителем декана механикоматематического факультета МГУ по научной работе, заместителем проректора, проректором (1982-1984 гг.) и первым проректором МГУ (1984-1992 гг.). Ректором МГУ Садовничий В.А. (рис. 11) был избран 23 марта 1992 г. на альтернативной основе. Переизбирался ректором МГУ в 1996, 2001 и 2005 гг. уже на безальтернативной основе. До сих пор возглавляет Российский Союз ректоров [27].



Рис. 11. Академик РАН Садовничий В.А. на церемонии награждения в московском Кремле российским орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени (20 мая 2009 г.) [26]

В 1994 г. д.ф.-м.н. Садовничий В.А. стал членкорр. РАН, а в 1997 г. – действительным членом (академиком) РАН по Отделению математических наук (секция прикладной математики и информатики). С 1995 г. он возглавляет Институт математических исследований сложных систем при МГУ [27]. В период 2008-2013 гг. избирался вице-президентом РАН. Удостоен звания почётного доктора многих университе-

тов мира. Под научным руководством Садовничего В.А. было подготовлено 65 кандидатских и 15 докторских диссертаций. В 2004 г. Садовничий В.А. был назван в России «Человеком года» в номинации «Образование и наука» [26]. Опубликовал 25 учебников и монографий, в том числе: фундаментальные учебники «Теория операторов» и «Математический анализ» (в 2-х т.); монографии «Спектральный анализ многочастичного оператора Шредингера» (1988 г.), «Математические задачи динамической имитации полета» (1986 г.), «Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией» (2005 г.) и др. [26, 27]. Академик РАН Садовничий В.А. стал широко известным в Украине и России специалистом в области математики, механики и информатики. Основными направлениями в его научной деятельности стали: математическое моделирование и математические методы обработки информации. Ниже вкратце сформулируем основные научные результаты, полученные нашим землякомакадемиком за многие годы его плодотворной работы в МГУ в области математики и информатики [26-28]:

- Внесен существенный вклад в разработку спектральной теории дифференциальных операторов;
- Получены окончательные результаты в теории «следов» дифференциальных операторов, вошедшие в соответствующие разделы современного функционального анализа;
- Разработаны математические методы обработки космической информации, позволившие существенно продвинуться в разрешении проблемы оперативной расшифровки (распознавания образов) космических съемок (Государственная премия СССР в области науки и техники за 1989 г.);
- Получены существенные результаты по математическому обоснованию некоторых новых подходов в релятивистской теории гравитации;
- Разработано новое направление в математическом анализе сложных процессов динамическая имитация управляемых полетов и движений различных объектов и, в частности, управление движением космического корабля и летательного аппарата;
- Осуществлены уникальные разработки математического обеспечения тренажеров, благодаря которым впервые в практике мировой космонавтики удалось осуществить сквозное имитационное моделирование последовательно всех этапов аэрокосмического полета, включая и невесомость;
- Существенно развил математическую теорию сложных систем, ставшую основой одного из самых актуальных и одновременно одного из самых трудных в математическом отношении направлений современного естествознания;
- Разработаны математические основы управления движением при сенсорных нарушениях в условиях микрогравитации и информационного обеспечения максиминного контроля качества визуальной стабилизации космических объектов (Государственная премия России в области науки и техники за 2001 г.).

Ректор МГУ им. М.В. Ломоносова, академик РАН Садовничий В.А. (рис. 12) известен своим критическим отношением к вопросу о вступлении России

в Болонский процесс [26]. Он говорил [27]: «...Я не отношусь к тем людям, которые перечеркивают свое прошлое. С прошлого нужно брать лучшее. Надо уважать свою историю и любить свою страну».



Рис. 12. Ректор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова — академик РАН Садовничий В.А. с символическим «ключом знаний» этого ведущего и крупнейшего учебного заведения-флагмана России [27]

Да, простое и ясное высказывание нашего герояматематика, содержащее мудрые мысли, с которыми трудно не согласиться. 25 января 2015 г. академик РАН Садовничий В.А. возглавлял церемонию празднования 260-летия МГУ им. М.В. Ломоносова, прошедшую в РФ на государственном уровне (рис. 13).

Приведем и другое не менее важное для всех нас высказывание российского академика-математика Садовничего В.А., имеющего крепкие родовые связи с близкой ему Харьковщиной [27]: «...Образование не может быть услугой – «заплатил – получил – ушёл». Образование должно быть главным приоритетом для руководства страны. От того, каким оно будет, зависит и благополучие нашего общества. Только образованный человек может быть успешным и обеспеченным». Ректор МГУ им. М.В. Ломоносова, академик РАН Садовничий В.А. за личный вклад в развитие научно-технического и экономического сотрудничества между Украиной и Российской Федерацией в течение 1999-2002 гг. стал полным кавалером украинского ордена «За заслуги» І-ІІІ степеней [26]. За свою научноорганизационную и общественную деятельность и выдающийся личный вклад в науку и образование он был удостоен высоких государственных наград СССР, России и ряда других стран [26, 27]:

- двух орденов Трудового Красного Знамени (1980 и 1986 гг.);
- трех орденов «За заслуги перед Отечеством» II-IV степеней (1999, 2005 и 2009 гг.);
 - ордена Александра Невского (2014 г.);
 - ордена Почётного легиона (Франция, 2005 г.);
- ордена Франциска Скорины (Республика Беларусь, 2007 г.);
- ордена «Восходящего солнца» II степени (Япония, 2008 г.);
 - ордена «Достык» (Казахстан, 1998 г.);
 - ордена «Данакер» (Киргизия, 2003 г.);
- золотой медали им. М.В. Келдыша РАН (за цикл работ по спектральной теории операторов);
- стал лауреатом премии им. М.В. Ломоносова АН СССР (1973 г.);

- стал лауреатом Государственных премий СССР (1989 г.) и Российской Федерации (2001 г.) в области науки и техники;
- стал лауреатом премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2011 г.);
- стал лауреатом национальной премии «Россиянин года» (2006 г.);
 - стал Почетным гражданином г. Москвы (2008 г.);
- стал Почетным гражданином Харьковской области (2010 г.).

Что касается жизни Садовничего В.А. вне его научно-организационной деятельности, то отметим, что он женат (с 1963 г.) на своей однокурснице по МГУ Наталье Сапрыкиной [26]. У них есть сын Юрий (д.ф.-м.н., профессор на одной из кафедр механикоматематического факультета МГУ) и две дочери — Инна и Анна. Все его дети окончили родной ему механико-математический факультет МГУ. Дочь Инна преподает на факультете вычислительной математики и кибернетики МГУ, а дочь Анна — на экономическом факультете МГУ [26]. Поэтому можно говорить о том, что известный ученый-математик Виктор Антонович Садовничий дома воспитал достойных продолжателей своего любимого дела — увлечения математикой.

5. Современные харьковские ученые - продолжатели известных в научном мире математических традиций. В первую очередь, среди последуюшего за описанными нами выше прославившимися представителями «старой гвардии» математических школ Харьковщины поколения учёных-математиков г. Харькова нам следует назвать: академиков НАНУ Л.А. Пастура (рис. 9, 13) и Е.Я. Хруслова (рис. 14), а также член-корреспондентов НАНУ И.В. Островского (с 1986 г. и по 2001 г. он возглавлял отдел теории функций) и В.Г. Дринфельда (в 1998 г. переехал на работу в США) [6]. Работая во ФТИНТе АН УССР, Владимир Гершонович Дринфельд выполнил целый ряд важных работ по общей теории интегрируемых систем и заложил основы теории квантовых групп [25]. Укажем, что молодой харьковский математик В.Г. Дринфельд в свое время являлся единственным в Украине лауреатом Филдсовской премии. Для выдающихся математиков мира эта награда является аналогом всемирно известной Нобелевской премии. Эта международная научная награда присуждается математикам лишь возрастом до 40 лет один раз в четыре года и торжественно вручается на Всемирных математических конгрессах.

Отметим, что Леонид Андреевич Пастур (выпускник родного также и автору этого краткого очерка инженерно-физического факультета ХПИ, 1961 г.) с 1988 г. занимал высокие должности заместителя директора по науке ФТИНТ УССР (НАНУ) и руководителя Математического отделения этого института (до 1998 г.), с 1986 г. по 2003 г. был заведующим отдела статистических методов в математической физике, а с 2006 г. возглавил более близкий ему по духу и научным интересам отдел теоретической физики [25, 29]. В 1964 г. во ФТИНТе АН УССР он защитил кандидатскую, а в 1975 г. – докторскую диссертации. В этот период он занимался математическими вопросами

статистической физики и квантовой теории твердого тела. В 1982 г. за научную монографию «Введение в теорию неупорядоченных систем» (соавторы И.М. Лифшиц и С.А. Гредескул) он был удостоен Государственной премии Украины в области науки и техники. Среди полученных Л.А. Пастуром важных научных результатов, кроме указанных выше в разделе 3, нам следует выделить его доказательство сходимости нормированной считающей меры собственных значений матриц ансамбля Вигнера к полукруговому закону при минимальных условиях типа Линдеберга [25].



Рис. 13. Академик НАНУ Пастур Л.А. (1937 г. рождения) за своим рабочим столом в поисках решения новой физикоматематической задачи (ФТИНТ НАНУ, 2006 г.) [6]

Кроме того, Л.А. Пастур и В.А. Ткаченко построили спектральную теорию операторов Шредингера с предельно-периодическими в метрике Степанова потенциалами, допускающими сверхэкспоненциально быструю аппроксимацию периодическими функциями. Необходимо сказать здесь и о методе, развитом Л.А. Пастуром и А.М. Хорунжим и основанном на идее написания уравнений типа Кирквуда-Зальцбурга для моментов резольвент случайных матриц с последующим доказательством факторизации их решений [25]. Академик АН УССР Л.А. Пастур одним из первых понял перспективность нового класса случайных матриц и базирующихся на них матричных моделях. Его работы с д.ф.-м.н. М.В. Щербиной о глобальном распределении собственных значений этих моделей стали пионерскими в этой математической области. Они дали определенный толчок бурному развитию математической теории унитарно-инвариантных матричных моделей [25]. В этой актуальной области Л.А. Пастуром и М.В. Щербиной были получены основополагающие научные результаты об универсальности локального распределения собственных значений унитарно-инвариантных матричных моделей. Относительно новым направлением в теории случайных матриц является теория так называемых разреженных матриц, связанных со случайными графами больших размерностей. В последнее время результаты исследования таких матриц в Математическом отделении ФТИНТа НАНУ представлены в научных работах таких известных ученых отдела статистических методов в математической физике института как [25, 30]: В.В. Венгеровского, А.М. Хорунжего и М.В. Щербины.

Укажем, что Евгений Яковлевич Хруслов (выпускник электромашиностроительного факультета ХПИ, 1959 г.), начиная с 1961 г. и учебы в аспирантуре ФТИНТа АН УССР (его научный руководитель академик Марченко В.А.), стал заниматься вопросами рассеяния электромагнитных волн и краевыми задачами для уравнений в частных производных в областях сложной структуры. После защиты кандидатской (1965 г.) и докторской (1973 г.) диссертаций по этой научной проблематике пришлось заниматься по наставнической просьбе своего шефа исследованием асимптотического поведения решений дифференциальных уравнений в частных производных в областях с мелкозернистой границей [15, 20]. В результате с участием Е.Я. Хруслова было исследовано асимптотическое поведение решения задачи Дирихле при измельчении границы исследуемой области и получены усредненное уравнение и граничное условие, описывающее главный член асимптотики [20]. Затем для будущего академика последовало рассмотрение интересной задачи Коши для уравнения Кортевега-де Фриза (уравнения с начальными данными типа ступеньки) методом обратной задачи рассеяния с целью анализа вопроса о рождении солитонов (уединенных волн в средах различной природы, сохраняющих форму и скорость при своем распространении) в асимптотике ее решения при больших временах [25].

Развивая научные идеи своего знаменитого учителя и дважды академика В.А. Марченко, академик НАНУ Е.Я. Хруслов построил в своих дальнейших исследованиях операторы преобразования с ядрами, линейно зависящими от спектрального параметра [6, 25]. С помощью этих операторов позже им были решены важные задачи об определении электромагнитных параметров той или иной среды (например, земной коры по результатам измерения компонент поля на поверхности Земли). В последующих работах Д.Г. Шепельского данные идеи развивались в направлении решения многопараметрических обратных задач теории электромагнетизма, которые интерпретировались как обратные задачи рассеяния для матричных дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими сложным образом от спектрального параметра и пространственной переменной [6, 25].



Рис. 14. Академик НАНУ Хруслов Е.Я. (заведующий Математическим отделением института с 1998 г., 1937 г. рождения) накануне своего 70-летия (ФТИНТ НАНУ, 2006 г.) [6]

Во вторую очередь, в качестве достойных продолжателей известных математических традиций во ФТИНТе НАНУ следует назвать ныне активно и плодотворно работающих на его физико-математической «ниве» следующих харьковских ученых-математиков:

- д.ф.-м.н., проф. Аминова Ю.А., возглавляющего с 2000 г. отдел геометрии;
- д.ф.-м.н., проф. Котлярова В.П., заведующего отделом математической физики с 2002 г.;
- д.ф.-м.н., проф. Фельдмана Г.М., заведующего отделом теории функций с 2001 г.;
- д.ф.-м.н., проф. Щербину М.В., возглавляющую отдел статистических методов в математической физике с 2003 г.

Кроме того, укажем, что за работы по развитию теории динамических систем ведущим научным сотрудникам Математического отделения ФТИНТа НАНУ д.ф.-м.н. Безуглому С.И. и д.ф.-м.н. Даниленко А.И. была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники за 2010 г. [30]. Так что с полным основанием о математиках ФТИНТа НАНУ можно с пафосом говорить: «Знай наших!».

В последующих статьях в этой рубрике автор постарается раскрыть важную роль в развитии отечественной математической науки и других выдающихся математиков Харьковщины, включая чл.-корр. АН УССР Наума Ильича Ахиезера и академика АН УССР (НАНУ) Владимира Логвиновича Рвачева, проживавших в г. Харькове и плодотворно занимавшихся в 20-м столетии учебной и научной деятельностью в ведущих харьковских ВУЗах – ХГУ и ХПИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1.** Большой иллюстрированный словарь иностранных слов.— М.: Русские словари, 2004. 957 с.
- 2. http://kharkov.vbelous.net/mathemat.htm.
- 3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. X.: HTMT, 2011. 311 с.
- *4.* http://scientists-academia-ussr.blogspot.com/2013/03/blogpost_27.html.
- 5. https://www.google.com.ua/webhp?gws_rd=ssl#q=AXИE3EP.
- 6. http://kharkov.vbelous.net/vam/biograph.htm.
- 7. http://gazeta.zn.ua/SCIENCE/abstraktnyy_mir_v_realnosti.htm.
- 8. http://intellect-invest.org.ua/rus/pedagog_personalias_ pogorelov_ov.
- http://ru.wikipedia.org/wiki/Погорелов_Алексей_Васильевич.
 http://math4school.ru/pogorelov.html.
- 11. http://scientists-academia-ussr.blogspot.com/2013/03/blogpost_27.html.
- 12. Погорелов А.В. Внешняя геометрия выпуклых поверхностей. М.: Наука, 1969. 760 с.
- 13. http://uvovki.obychnogo.net/cont/v-chest-vydayushchikhsya-uchenykh-kharkova-nazyvayut-asteroidy.
- 14. http://uk.wikipedia.org/wiki/Марченко_Володимир_Олекс андрович.
- **15.** НАН Украины. Биобиблиография ученых Украины / Марченко Владимир Александрович. Киев: Академпериодика, 2012. 56 с.
- 16. http://www.mathnet.ru/php/person.phtml?option_lang=rus&personid=15243.
- 17. Марченко В.А. Некоторые вопросы теории одномерных линейных дифференциальных операторов второго порядка // Труды Московского математического общества. 1951. т.1. С. 328-420.

- **18.** Марченко В.А. Восстановление потенциальной энергии по фазам рассеянных волн // Доклады АН СССР. 1955. \pm 7.72. №3. С. 695-698.
- **19.** Марченко В.А., Агранович З.С. Восстановление потенциальной энергии по матрице рассеяния // Успехи математических наук. -1957. т.12. №1(73). С. 143-145.
- **20.** Марченко В.А., Хруслов Е.Я. Краевые задачи с мелкозернистой границей // Математический сборник. — 1964. т.65(107). — №3. — С. 458-472.
- 21. Марченко В.А., Пастур Л.А. Распределение собственных значений в некоторых ансамблях случайных матриц // Математический сборник. 1967. т.72. №114. С. 507-536.
- 22. Марченко В.А., Маслов К.В. Устойчивость задачи восстановления оператора Штурма-Лиувилля по спектральной функции // Математический сборник. 1970. т.81. №4.— С. 525-551.
- **23.** Марченко В.А., Любарский Ю.И. Прямая и обратная задачи многоканального рассеяния // Функциональный анализ и его приложения. -2007. т.41. №2. С. 58-77.
- **24.** Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. 50 лет / Под ред. В.М. Яковенко. Х.: ИРЭ, 2005.-612 с.
- **25.** Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины. 50 лет / Под ред. С.Л. Гнатченко. Киев: Наукова думка, 2010. 542 с.
- **26.** https://ru.wikipedia.org/wiki/Садовничий_Виктор_Антонович. **27.** http://top.rbc.ru/society/18/12/2014/5491a2a79a79474d1b0e 4c1c.
- 28. http://www.kremlin.ru/news/47481.
- **29.** Храмов Ю.А. История физики. Киев: Феникс, 2006. 1176 с.
- 30. http://gazeta.zn.ua/SCIENCE/abstraktnyy_mir_v_realnosti.html.

REFERENCES

- 1. Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
- 2. Available at: http://kharkov.vbelous.net/mathemat.htm (accessed 10 April 2014). (Rus).
- 3. Baranov M.I. Antologiia vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1. [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
- 4. Available at: http://scientists-academia-ussr.blogspot.com/2013/03/blog-post_27.html (accessed 12 May 2011). (Rus).
- 5. Available at: https://www.google.com.ua/webhp?gws-rd=ssl#q=AXHE3EP (accessed 23 July 2013). (Rus).
- Available at: http://kharkov.vbelous.net/vam/biograph.htm.
 (accessed 06 December 2013). (Rus).
- 7. Available at: http://gazeta.zn.ua/SCIENCE/abstraktnyymir_v_realnosti.htm. (accessed 21 May 2012). (Rus).
- 8. Available at: http://intellect-invest.org.ua/rus/pedagog_personalias_pogorelov_ov/ (accessed 11 April 2013). (Rus).
- **9.** Pogorelov Aleksei Vasil'evich (Pogorelov Aleksey Vasilevich) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Погорелов_Алексей Васильевич (accessed 15 June 2012). (Rus).
- 10. Available at: http://math4school.ru/pogorelov.html (accessed 18 September 2013). (Rus).
- 11. Available at: http://scientists-academia-ussr.blogs-pot.com/2013/03/blog-post_27.html (accessed 02 May 2011). (Rus).
- 12. Pogorelov A.V. *Vneshnjaja geometrija vypuklyh poverhnostej* [Extrinsic geometry of convex surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 760 p. (Rus).
- 13. Available at: http://uvovki.obychnogo.net/cont/v-chest-vydayushchikhsya-uchenykh-kharkova-nazyvayut-asteroidy (accessed 11 August 2013). (Rus).

- 14. Marchenko Volodymyr Oleksandrovych (Marchenko Volodymyr Oleksandrovych) Available at: http://uk.wikipedia.org/wiki/Mapченко_Володимир_Олександрович (accessed 10 July 2012). (Ukr).
- 15. NAN Ukrainy. Biobibliografija uchenyh Ukraine. Marchenko Vladimir Aleksandrovich [National Academy of Sciences of Ukraine. Bibliography of Ukrainian scientists. Marchenko Vladimir Alexandrovich]. Kiev, Akademperiodika Publ., 2012. 56 p. (Rus).
- 16. Available at: http://www.mathnet.ru/php/person.pht-ml?option_lang=rus & personid = 15243 (accessed 11 May 2014). (Rus).
- 17. Marchenko V.A. Some problems in the theory of onedimensional linear differential operators of second order. *Trudy Moskovskogo matematicheskogo obshhestva – Proceedings of the Moscow Mathematical Society*, 1951, vol.1, pp. 328-420. (Rus).
- 18. Marchenko V.A. Reconstruction of the potential energy of the phases of the scattered waves. *Doklady AN SSSR Lectures of Academy of sciences of the USSR*, 1955, vol.72, no.3, pp.695-698. (Rus).
- 19. Marchenko V.A., Agranovich Z.S. Restoring potential energy from the scattering matrix. *Uspehi matematicheskih nauk Successes of mathematical sciences*, 1957, vol.12, no.1(73), pp. 143-145. (Rus).
- 20. Marchenko V.A., Hruslov E.Ja. Boundary value problems with fine-grained boundary. *Matematicheskij sbornik Mathematical proceeding*, 1964, vol.65(107), no.3, pp. 458-472. (Rus).
- 21. Marchenko V.A., Pastur L.A. Distribution of eigenvalues for some sets of random matrices. *Matematicheskij sbornik Mathematical proceeding*, 1967, vol.72, no.114, pp. 507-536. (Rus).
- 22. Marchenko V.A., Maslov K.V. Stability of the problem of formation of Sturm-Liouville operator from the spectral function. *Matematicheskij sbornik Mathematical proceeding*, 1970, vol.81, no.4, pp. 525-551. (Rus).
- 23. Marchenko V.A., Ljubarskij Ju.I. Direct and inverse problems of multichannel scattering. Funkcional'nyj analiz i ego prilozhenija Function analysis and its applications, 2007, vol.41, no.2, pp. 58-77. (Rus).
- 24. Yakovenko V.M. *Institut radiofiziki i elektroniki im. A.Ja. Usikova NAN Ukrainy. 50 let* [Institute of Radio Physics and Electronics of the name A.Ya. Usikov NAS Ukraine. 50 years]. Kharkov, Institute of Radio Physics and Electronics Publ., 2005. 612 p. (Rus).
- 25. Gnatchenko S.L. *Fiziko-tehnicheskij institut nizkih temperatur im. B.I. Verkina NAN Ukrainy. 50 let* [Physico-Technical Institute of Low Temperature Physics. B.I. Verkin NAS Ukraine. 50 years]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2010. 542 p. (Rus).
- **26.** Sadovnichii Viktor Antonovich (Sadovnichiy Viktor Antonovich) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Caдовничий Виктор Антонович (accessed 28 February 2013). (Rus).
- 27. Available at: http://top.rbc.ru/society/18/12/2014/5491a2a79a79474d1b0e4c1c (accessed 08 October 2013). (Rus).

- 28. Available at: http://www.kremlin.ru/news/47481 (accessed 20 August 2012). (Rus).
- 29. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
- 30. Available at: http://gazeta.zn.ua/SCIENCE/abstraktnyymir-v-realnosti.html (accessed 12 March 2014). (Rus).

Поступила (received) 05.02.2015

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с., НИПКИ «Молния» Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya» National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 26: Three portraits of worldwide known mathematicians of Kharkov region.

Purpose. Short description basic confessedly in the world of scientific achievements and vital fascinations of three prominent mathematicians of modern Kharkov region - Academicians of Pogorelov A.V., Marchenko V.A. and Sadovnichiy V.A. Methodology. Scientific methods of receipt, treatment and systematization of mathematical knowledges. Methods of historical investigations of development in human society of different sections of modern mathematics. Results. Short information is resulted about basic fundamental scientific achievements in the period of 20-21 centuries of the mentioned worldwide known domestic scientistsmathematicians in area of geometry, mathematical physics, theory of partial differential equations, operators, numerical mathematics, mathematical building of complicated processes and mathematical methods of treatment of information. These achievements are considered as a background of past and modern development of mathematical science state in Kharkov. Originality. For the first time in the form of a short scientifically-historical essay by a scientist-electrophysicist using accessible for the wide circle of readers language is present important for a world association scientific achievements in the complicated area of row of modern sections of mathematics, being in basis of practically all of the sciences known us. Practical value. Scientific popularization of modern topical knowledges of humanity in the area of special sections of mathematics, opening of role of personality in development of mathematical science and expansion for the large number of people of the scientific mathematical range of interests. References 30, figures 14.

Key words: history, mathematics, Kharkov region, distinguished scientific achievements.

УДК 621.316.91: 621.316.573

О.Г. Середа, І.С. Варшамова

ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОБУТОВИХ ПРИЛАДІВ ВІЛ СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ФАЗНОГО СТРУМУ

Теоретично досліджена можливість розширення переліку реалізованих захистів в електронних реле максимального струму на основі результатів цифрової обробки сигналів від датчиків струму шляхом гармонійного аналізу спектру фазного струму за наявності нелінійних спотворень. Розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегрівання обмоток при струмах перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, мікропроцесорний пристрій захисту, електроні реле максимального струму.

Теоретически исследована возможность расширения перечня реализуемых защит в электронных реле максимального тока на основе результатов цифровой обработки сигналов от датчиков тока путем гармонического анализа спектра фазного тока при наличии нелинейных искажений. Разработан алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты асинхронных электродвигателей от недопустимого перегрева обмоток при токах перегрузки с учетом нелинейных искажений фазного тока. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, микропроцессорное устройство защиты, электронные реле максимального тока.

Постановка проблеми. В електропобутових приладах, таких як холодильники, кондиціонери, побутові вентилятори, настільні свердлильні й точильні верстати, соковижималки тощо, застосовуються однофазні асинхронні електродвигуни (ЕД) з пусковою обмоткою, що відключається й використовується тільки при пуску ЕД [1, 2].

Застосування в електричних мережах тиристорних перетворювачів частоти та інших нелінійних навантажень призводить до виникнення вищих гармонійних складових напруги [3-5]. При частотному регулюванні швидкості обертання асинхронного ЕД найбільш значущими за величиною будуть 3-а та 5-а гармоніки струму. Зростають втрати в обмотках за рахунок поверхневого ефекту й ефекту близькості [3]. Хоч і меншою мірою, виникає додаткове нагрівання від додаткових втрат в сталі.

Таким чином, підвищення чутливості теплового захисту від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень є важливим засобом забезпечення тривалого терміну служби асинхронних ЕД.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі [6] способи теплового захисту однофазних асинхронних електричних двигунів від теплових впливів струмів перевантаження I_L , в яких формується захисна часострумова характеристика, що забезпечує зворотну залежність часу спрацьовування захисного пристрою t_L від величини фазного струму $I_{
m ph}$: $t_L = f\!\left(I_{
m ph}\right) \; , \label{eq:tL}$

де $I_{\rm ph}$ – середньоквадратичне (діюче) значення фазного струму, t_L – час спрацьовування захисту при струмах перевантаження.

Оптимальним способом теплового захисту ЕД від перегріву обмоток і феромагнітних елементів при протіканні надструму та створених ним електромагнітних полів є формування такої залежності (1), яка б повторювала перевантажувальну часострумову характеристику ЕД та при поданні її в координатах струму $I_{\rm ph}$ й часу t проходила б дещо нижче перевантажувальної характеристики ЕД [6].

Таким захисним пристроєм, що реалізує описаний спосіб формування необхідної захисної часострумової характеристики, є реле максимального струму [1]. Часострумова характеристика (1) реле має дві зони, в яких характер залежності часу спрацювання захисту t_L від величини $I_{\rm ph}$ істотно відрізняються. Перша зона L (зона перевантаження) – діапазон зміни струму від величини $I_{\rm ph}=1,1I_{\rm r},$ де $I_{\rm r}-$ номінальний струм ЕД, до величини $I_{sd} = (3-12)I_r$ уставки струму короткого замикання (КЗ). В цій зоні залежність часу спрацювання t_L від струму $I_{\rm ph}$ повторює перевантажувальну характеристику ЕД. При цьому «інтегральна» уставка $Q_L = I_{\rm ph}^2 t_L = {\rm const}$ забезпечує зворотну залежність $t_L = f(I_{\rm ph})$ часу спрацьовування захисту t_L від величини фазного струму $I_{\rm ph}$.

Використовуваний в реле спосіб захисту ЕД від струмів перевантаження є загальновідомим і широко застосовуваним. Згідно з (1) визначається діюче значення $I_{\rm ph}$ фазного струму фази методом інтегрування квадратів миттєвих значень i^2 струму і формується час спрацьовування захисту t_L у відповідність із заданою залежністю часу t_L від діючого значення $I_{\rm ph}$ синусоїдального струму.

Недоліком розглянутого способу захисту ЕД від струмів перевантаження є той факт, що надійний захист гарантується лише за відсутності нелінійних спотворень синусоїдальної форми зміни фазного струму. Тобто відсутні гармоніки струму крім 1-ої основної. У нормативно-технічній документації на електронні реле теплового захисту зазначено, що реле призначене для захисту трифазних ЕД від теплових впливів синусоїдальних струмів, що не містять вищих гармонійних складових.

У той же час в схемах живлення електропобутової техніки все більш широкого поширення набувають системи плавного регулювання швидкості обертання асинхронних ЕД за допомогою тиристорних перетворювачів. Також присутні й інші нелінійні навантаження, що спотворюють синусоїдальний характер зміни фазної напруги: люмінесцентні енергозберігаючі лампи, феромагнітні матеріали. Тому нехтування впливом на нагрівання ЕД вищих гармонік напруги знижує надійність захисту.

© О.Г. Середа, І.С. Варшамова

Мета. Теоретичне обгрунтування, розробка та реалізації у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму, який враховує додаткове нагрівання внаслідок наявності вищих гармонійних складових у фазному струмі і, тим самим, підвищує надійність теплового захисту.

Матеріали дослідження. Причинами появи вищих гармонік ϵ підключення до електромережі споживачів, які мають нелінійні вхідні кола і внаслідок цього споживають імпульсний струм. Нелінійний характер кола визначається наявністю в ньому напівпровідникових нелінійних елементів — тиристорів. Частотно-регульований тиристорний електропривод ϵ нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення синусоїди фазних напруг в мережі живлення [3-5]. Крива зміни напруги в часі містить увесь спектр непарних гармонік, з яких найбільш значущими, з точки зору побудови мережевих захистів, ϵ перша (основна) та дві вищі — третя та п'ята. Тому з'являється необхідність в гармонійному аналізі спектру фазного струму.

З метою врахування впливу 3-ої і 5-ої гармоніки струму на додаткове нагрівання ЕД необхідне коригування вихідної захисної часострумової характеристики (1), яка відповідає синусоїдальному фазному струму і не враховує додаткових втрат і нагрівання ЕД від струмів вищих гармонік, зокрема, струмів 3-ої і 5-ої гармоніки. Обгрунтуємо необхідність зазначеного коригування.

При роботі асинхронних електродвигунів в умовах несинусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності в обмотках статора і ротора, зумовлені вищими гармоніками струму. З'являються також додаткові втрати в сталі статора і ротора, однак ці втрати малі і ними можна знехтувати [3]. Якщо виразити струм n-ої гармоніки через номінальний струм ЕД та кратність $k_{\rm st}$ пускового струму, то формула для визначення потужності сумарних втрат $\Delta P_{\Sigma k}$ від вищих гармонік виглядає так [3]:

$$\Delta P_{\sum k} = \Delta P_r k_{\rm st}^2 \sum_{n=2}^k \left(\frac{U_n}{nU_1} \right)^2 \left(\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1} \right) = \Delta P_r k_{\rm st}^2 \sum_{n=2}^k k_{\rm dn}, (2)$$

де ΔP_r — номінальні втрати в обмотках статора при синусоїдальному фазному струмі; k — порядок (номер) останньої з врахованих вищих гармонік; U_1 — напруга першої (основної) гармоніки; U_n — напруга n-ої гармоніки; $k_{\rm dn}$ — коефіцієнт, що враховує зростання втрат в обмотках від n-ої гармоніки:

$$k_{\rm dn} = \left(\frac{U_n}{nU_1}\right)^2 \left(\sqrt{n} + \sqrt{n\pm 1}\right) = \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2 \frac{\sqrt{n} + \sqrt{n\pm 1}}{n^2} \ . \tag{3}$$

Величина $n\pm1$ дозволяє враховувати напрямок обертання вектору n-ої гармоніки напруги в порівнянні з напрямом обертання вектору 1-ої основної гармоніки напруги. Знак «—» відповідає однаковому напрямку обертання, знак «+» — протилежному. Для розглянутого випадку, коли враховуються додаткові втрати від 3-ої і 5-ої гармонік струму, вирази для додаткових втрат в обмотках ЕД матимуть вигляд:

$$\Delta P_{3} = \Delta P_{r} \cdot k_{d3} = \Delta P_{r} \left(\frac{U_{3}}{U_{1}}\right)^{2} \frac{\sqrt{3} + \sqrt{3 - 1}}{9} =$$

$$= 0.3496 \cdot \Delta P_{r} \left(\frac{U_{3}}{U_{1}}\right)^{2} \approx 0.35 \cdot \Delta P_{r} \left(\frac{U_{3}}{U_{1}}\right)^{2};$$
(4)

$$\Delta P_5 = \Delta P_r \cdot k_{d5} = \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1}\right)^2 \frac{\sqrt{5} + \sqrt{5+1}}{25} =$$

$$= 0.1874 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1}\right)^2 \approx 0.2 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1}\right)^2. \tag{5}$$

При побудові струмового захисту ЕД, що працюють в електропобутовій техніці, величини напруг використовувати важко. Тому рівняння (4), (5) доцільно перетворити таким чином, щоб у ньому використовувалися значення струмів. Для такого перетворення приймаємо наступні припущення. Коефіцієнт потужності соѕф електричних кіл навантажених асинхронними електродвигунами з нормальним коефіцієнтом корисної дії дорівнює 0.8 ($\cos \varphi = 0.8$) [7]. Збільшення індуктивного опору Х обмотки ЕД на частоті 3-ї гармоніки струму становить 300%: $X_3 = 3\omega L$, а на частоті 5-ї гармоніки — 500%: $X_5 = 5\omega L$, де ω — кутова частота 1-ої основної гармоніки струму; L – індуктивність обмотки. Збільшення активного опору *R* обмотки ЕД від впливу поверхневого ефекту на частоті 3-ої та 5-ої гармоніки струму становить близько 20%. Тому збільшення повного опору Z обмотки ЕД на частоті 3-ої та 5-ої гармоніки буде визначатися реактивною складовою, а збільшенням R за рахунок поверхневого ефекту та ефекту близькості можна знехтувати.

3 урахуванням прийнятих припущень визначається залежність підвищувальних коефіцієнтів $k_{\rm d3}$ і $k_{\rm d5}$ залежно від величин струмів 3-ої і 5-ої гармонік, тобто залежність $k_{\rm dn}$ у функції співвідношення I_n/I_1 :

$$k_{\rm d3} = f(I_3/I_1),\tag{6}$$

$$k_{d5} = f(I_5/I_1),$$
 (7)

де I_1 – діюче значення струму 1-ої гармоніки; I_3 – діюче значення струму 3-ої гармоніки; I_5 – діюче значення струму 5-ої гармоніки.

Рівняння (3) перетворюється наступним чином:

$$U_1 = I_1 \cdot Z_1 = I_1 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$
; (8)

$$U_3 = I_3 \cdot Z_3 = I_3 \sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}$$
; (9)

$$U_5 = I_5 \cdot Z_5 = I_5 \sqrt{R^2 + (5\omega L)^2}$$
; (10)

$$k_{\rm d3} = 0.35 \cdot \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 = 0.35 \cdot \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 \cdot \frac{R^2 + 9\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2};$$
 (11)

$$k_{\rm d5} = 0.2 \cdot \left(\frac{U_5}{U_1}\right)^2 = 0.2 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1}\right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2};$$
 (12)

$$\omega L = R \cdot \mathsf{tg}\,\varphi \; ; \tag{13}$$

$$k_{\rm d3} = 0.35 \cdot \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 \cdot \frac{R^2 + 9R^2 tg^2 \varphi}{R^2 + R^2 tg^2 \varphi} = 0.35 \cdot \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 \cdot \frac{1 + 9tg^2 \varphi}{1 + tg^2 \varphi};$$
 (14)

$$k_{d5} = 0.2 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1}\right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25R^2 \text{tg}^2 \varphi}{R^2 + R^2 \text{tg}^2 \varphi} = 0.2 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1}\right)^2 \cdot \frac{1 + 25 \text{tg}^2 \varphi}{1 + \text{tg}^2 \varphi}, (15)$$

де Z_1 , Z_3 та Z_5 — опори обмотки ЕД на частоті 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонік відповідно.

При $\cos \varphi = 0.8$ отримуємо:

$$k_{\rm dn}|_{\cos\varphi=0.8} = 1.27 \cdot (I_3/I_1)^2 + 1.74 \cdot (I_5/I_1)^2$$
. (16)

Додаткові втрати ΔP_n , зумовлені наявністю гармонік струму, визначаються підвищувальним коефіцієнтом $k_{\rm dn}$, на який слід помножити номінальні втрати

 ΔP_r (4). Якщо знайдено підвищувальний коефіцієнт $k_{
m dn}$, то еквівалентний фазний струм $I_{
m ph}^{/}$, що враховує додаткове нагрівання ЕД від впливу гармонік струму визначається з виразу:

$$I_{\rm ph}^{\prime} = I_{\rm ph} \sqrt{1 + k_{\rm d3} + k_{\rm d5}} \ . \tag{17}$$

Діюче значення $I_{\rm ph}$ фазного струму визначаються методом інтегрування квадратів миттєвих значень i^2 ;

$$I_{\rm ph} = \sqrt{\sum_{j=1}^{p} i_j^2 \Delta t_j / T_1} , \qquad (18)$$

де $p = T_1/\Delta t_j$; $T_1 = 20$ мс — період зміни 1-ої основної гармоніки струму для робочої частоти мережі 50 Гц; Δt_j — інтервал дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{\rm ph} = f(t)$ фазного струму $i_{\rm ph}$ в часі t.

Принцип визначення діючих значень струмів 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонік [8] з аналізу суми квадратів дискретних значень струмів i_{j3}^2 , i_{j5}^2 , пояснюється діаграмами, наведеними на рис. 1. На рис. 1 подана аналогова залежності $i_{\rm ph} = f(t)$ фазного струму $i_{\rm ph}$ в часі t і що входять до складу $i_{\rm ph}$ перша $i_1 = f(t)$, третя $i_3 = f(t)$ та п'ята $i_5 = f(t)$ гармоніки.

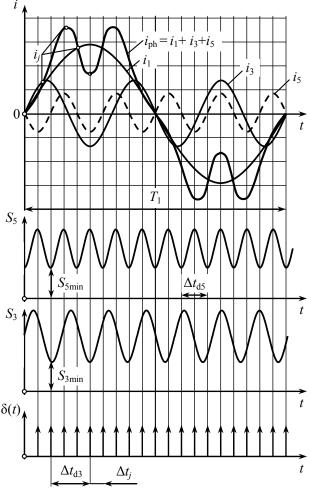


Рис. 1. Дискретизація вихідної аналогової залежності фазного струму в часі

В ковзному режимі через часовий інтервал Δt_j в 10 і більше разів менший періоду T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $\Delta t_j \leq 0,1T_1$, шляхом заміни використаного

миттєвого значення i_j струму новим здійснюють безперервний моніторинг суми S_3 і S_5 квадратів дискретних значень струмів i^2_{j3} і i^2_{j5} , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{\rm ph}=f(t)$ з частотою дискретизації $f_{\rm d3}=2f_3$ та $f_{\rm d5}=2f_5$ (відповідно інтервал дискретизації $\Delta t_{\rm d3}$ та $\Delta t_{\rm d5}$) гратчастої дельтафункції $\delta(t)$ в 2 рази більшою частоти f_3 та f_5 зміни струму i_3 та i_5 3-ої та 5-ої гармоніки відповідно:

$$S_3 = \sum_{0}^{T_1} i_{j3}^2 , \qquad (19)$$

$$S_5 = \sum_{0}^{T_1} i_{j5}^2 \ . \tag{20}$$

Суми S_3 та S_5 визначається за час, що дорівнює періоду T_1 зміни струму i_1 1-ої гармоніки. Після формування залежностей $S_3 = f(t)$ та $S_5 = f(t)$ (рис. 1), визначають їх мінімальні значення $S_{3\min}$ та $S_{5\min}$.

Величини S_3 та S_5 розраховують за дискретними значеннями струмів i_{j3} , i_{j5} , що відповідають частоті дискретизації $f_{\rm d3} = 300~\Gamma$ ц, $f_{\rm d5} = 500~\Gamma$ ц в два рази більшої частоти 3-ї та 5-ї гармоніки $f_3 = 150 \, \Gamma \text{ц}, f_5 = 250 \, \Gamma \text{ц}.$ Частота f_{dn} перевищує значення, регламентовані теоремою Котельникова [9] та держстандартом [10] для точного відновлення за дискретними значеннями вихідної аналогової залежності в часі 1-ої гармоніки струму. Згідно [9] частота дискретизації повинна бути строго більшою двократної частоти найбільш високої гармоніки у вихідному аналоговому сигналі. Згідно [10] мінімальна частота дискретизації f_d повинна дорівнювати або бути більшою трикратної частоти найвищої гармоніки струму. Діюче значення 1-ї гармоніки струму I_1 розраховане за дискретними значеннями струму, що відповідають частоті дискретизації $f_{\rm d3}$ = = 300 Γ ц, f_{d5} = 500 Γ ц, буде правильним і не залежатиме від часу початку інтегрування. При кожному черговому кроці ковзання Δt_i діюче значення 1-ої гармоніки струму буде величиною постійною I_1 = const.

В той же час частота $f_{\rm d5} = 500~\Gamma$ ц не забезпечує точного розрахунку діючого значення I_5 струму 5-ої гармоніки. Згідно [10] мінімальна частота дискретизації повинна дорівнювати 750 Γ ц. Тому значення I_5 , розраховане шляхом інтегрування квадратів дискретних значень, що відповідають частоті $f_{\rm d5}$ не може бути визначене правильно, а сума квадратів дискретних значень струму i_{j5}^2 і розрахована за цим значенням величина I_5 буде залежати від моменту часу початку інтегрування. Це означає, що при кожному черговому кроці ковзання Δt_i врахування струму 5-ої гармоніки при підрахунку величини S_5 буде неоднаковим. Наприклад, в моменти часу, коли залежність $i_5 = f(t)$ проходить через нуль, розраховане значення S_5 прийматиме своє мінімальне значення $S_{5 \min}$ (рис. 1). Вочевидь, що в зазначені моменти часу сума квадратів дискретних значень струму i_{j5}^2 , тобто значення $S_{5\min}$ не містить дискретні значення 5-ої гармоніки струму. Це означає, що в діючому значенні фазного струму $I_{
m ph5},$ визначеному за величиною $S_{
m 5min}$ не врахований струм 5-ої гармоніки. Отже, діюче значення 5-ї гармоніки струму I_5 визначається з виразу:

$$I_{1+3} = \sqrt{S_{5\min} \cdot \Delta t / T_1}$$
, (21)

$$I_5 = \sqrt{I_{\rm ph}^2 - I_{1+3}^2} \ . \tag{22}$$

Тоді діючі значення 1-ої та 3-ої гармонік струму:

$$I_1 = \sqrt{(S_{3\min} - 2I_5^2 \sin^2(5\omega t)) \cdot \Delta t / T_1}$$
, (23)

$$I_3 = \sqrt{I_{\rm ph}^2 - I_1^2 - I_5^2} \ . \tag{24}$$

Перевага описаного способу полягає в тому, що для визначення величин вищих гармонік струму використовується традиційно застосовуваний при побудові струмових захистів математичний апарат інтегрування квадратів дискретних значень струму. Відмінна особливість полягає у використанні додаткової частоти дискретизації вихідної аналогової залежності фазного струму в часі.

3 використанням наведеного алгоритму визначення величини $I_{\rm ph}^{\prime}$ були розраховані залежності значень підвищувального коефіцієнту $k_{\rm dn}$ від коефіцієнту $\delta_{\rm n}$, подані на рис. 2.

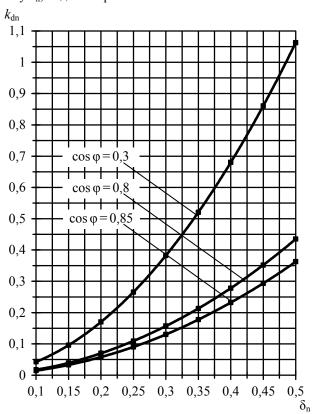


Рис. 2. Залежності підвищувального коефіцієнту $k_{
m dn}$ від коефіцієнту $\delta_{
m n}$

Залежність $k_{\rm dn} = f(\delta_{\rm n})$ використовується для коригування часу t_L спрацьовування захисту з урахуванням додаткового нагрівання ЕД при нелінійних спотвореннях синусоїди фазних струмів.

Суть коригування часу t_L з урахуванням додаткового нагрівання ЕД від впливу 3-ої та 5-ої гармонік струму пояснюється графіком рис. 3, на якому наведена часострумова захисна характеристика реле теплового захисту.

Згідно вихідної залежності $t_L = f(I_{\rm ph})$, заданої для реле теплового захисту та справедливої при відсутності нелінійних спотворень (вищих гармонік струму), деякому значенню струму $I_{\rm ph1}$ відповідає час спрацьо-

вування захисту t_{L1} . Якщо фазний струм несинусоїдальний, то значення $I_{\rm ph1}$ необхідно помножити на підвищувальний коефіцієнт $\sqrt{1+k_{\rm d3}+k_{\rm d5}}$. В результаті отримують еквівалентне значення фазного струму $I_{\rm ph}^{/}$, яке за своєю тепловою дією на ЕД буде еквівалентним дії струму 1-ої гармоніки. У цьому випадку час спрацьовування захисту необхідно зменшити до значення $t_{L1}^{/}$, як показано на рис. 3. Аналогічне коригування часу спрацьовування t_{L} здійснюють при інших значеннях струму $I_{\rm ph}$.

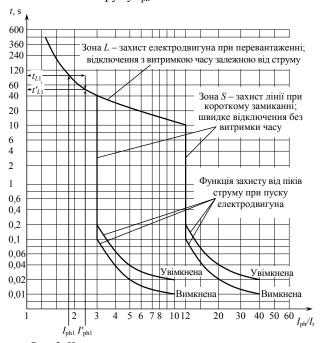


Рис. 3. Часострумова захисна характеристика реле теплового захисту

Описаний спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів реалізований у вигляді алгоритму функціонування електронних реле максимального струму або іншого апарата захисту. Блоксхема алгоритму, що ілюструє функціонування мікропроцесорного пристрою захисту (МПЗ) при реалізації розробленого способу захисту ЕД наведена на рис. 4. Окремі арифметичні й логічні операції, які виробляє мікропроцесор, умовно подані у вигляді модулів. Фізично вказаних модулів не існує, їх зображення необхідне для зручності викладання функціонування МПЗ.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб:

1. У модулі 1 вихідну залежність фазного струму в часі $i_{ph} = f(t)$ в фазі шляхом множення на гратчасту дельта-функцію $\delta(t)$ (рис. 1) перетворюють у три дискретні залежності з різною частотою дискретизації $i_j(t)$, $i_{j3}(t)$ і $i_{j5}(t)$. Залежність $i_j(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_d = 1000$ Γ ц, більшою потрійної частоти 5-ої гармоніки [10]. Залежність $i_{j3}(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_{d3} = 300$ Γ ц, що дорівнює подвійний частоті 3-ої гармоніки. Залежність $i_{j5}(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_{d5} = 500$ Γ ц, що дорівнює подвійний частоті 5-ої гармоніки.

- 2. У модулі 2 методом чисельного інтегрування квадратів дискретних значень i_j залежності $i_j(t)$ визначають діюче значення фазного струму $I_{\rm ph}$ за формулою (18).
- 3. У модулі 3 за дискретними значенням залежності $i_{j3}(t)$ формують залежність $S_3 = f(t)$ суми квадратів дискретних значень струмів i_{j3}^2 за виразом (19).
- 4. У модулі 4 визначають мінімальне значення $S_{3\min}$ залежності $S_3 = f(t)$.

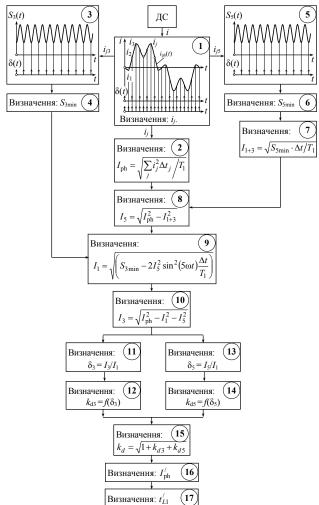


Рис. 4. Схема алгоритму спрацьовування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегріву обмоток

- 5. У модулі 5 за дискретними значенням залежності $i_{j5}(t)$ формують залежність $S_5 = f(t)$ суми квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 за виразом (20).
- 6. У модулі 6 визначають мінімальне значення $S_{5\min}$ залежності $S_5 = f(t)$.
- 7. У модулі 7 визначають діюче значення I_{1+3} сумарної 1-ї та 3-ї гармонік фазного струму за формулою (21).
- 8. У модулі 8 визначають діюче значення I_5 5-ої гармоніки фазного струму за формулою (22).
- 9. У модулі 9 визначають діюче значення I_1 1-ої гармоніки фазного струму за формулою (23).
- 10. У модулі 10 визначають діюче значення I_3 3-ої гармоніки фазного струму за формулою (24).
- 11. У модулі 11 визначають значення δ_3 як відношення діючих значень 3-ої та 1-ої гармонік фазного струму: $\delta_3 = I_3/I_1$.

- 12. У модулі 12 з залежності $k_{\rm d3} = f(\delta_3)$ визначають значення коефіцієнта $k_{\rm d3}$, що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 3-ої гармоніки.
- 13. У модулі 13 визначають значення δ_5 як відношення діючих значень 5-ої та 1-ої гармонік фазного струму: $\delta_5 = I_5/I_1$.
- 14. У модулі 14 з залежності $k_{\rm d5} = f(\delta_5)$ визначають значення коефіцієнта $k_{\rm d5}$, що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 5-ої гармоніки.
- 15. У модулі 15 визначають значення коефіцієнта $k_{\rm d}$, що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 3-ої та 5-ої гармонік.
- 16. У модулі 16 визначають еквівалентне значення струму $I_{\rm ph}^{\prime}$, що враховує додаткове нагрівання ЕД від впливу 3-ої та 5-ої гармонік струму за формулою (17).
- 17. У модулі 17 за значенням $I_{\mathrm{ph}}^{/}$ визначають скоригований час спрацьовування захисту $t_{L1}^{/}$.

Запропонований алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою захисту ЕД від струмових перевантажень враховує додаткове нагрівання, обумовлене наявністю у фазному струмі крім 1-ої основної більш високих 3-ї та 5-ї гармонік струму. При цьому використовують простий математичний апарат, який широко застосовується при реалізації струмових захистів.

Висновки. Доведена необхідність підвищення чутливості теплового захисту однофазних асинхронних електродвигунів побутових приладів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму.

Розроблено та теоретично обгрунтовано метод визначення гармонійного складу фазного струму мереж електропостачання побутових електроприладів з нелінійними видами навантажень і, як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми зміни фазного струму, шляхом множення аналогових залежностей струму в часі на гратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації, в якій застосування простих і широко використовуваних в пристроях релейного захисту, зокрема в електронних реле максимального струму, математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму дозволяє найбільш гармонійно поєднуватись з математичним апаратом побудови інших видів мережевих захистів.

Запропоновано та реалізовано у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою захисту нове технічне рішення, яке дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформувати час спрацьовування апаратів релейного захисту для надійного захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- *1.* Лозинський А.О., Копчак Б.Л., Бушер В.В. Системи керування електропобутовими приладами: Навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 304 с.
- 2. Белоусов А.А., Саликов М.П. Повышение энергоэффективности однофазного асинхронного двигателя с отключаемой пусковой обмоткой // Вестник ОГУ. 2013. №1(150). С. 171-175.
- **3.** Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

- **4.** Барутсков И.Б., Вдовенко С.А., Цыганков Е.В. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты // Главный энергетик. -2011.- №6. С. 5-15.
- 5. Collombet C., Lupin J.M., Schonek J. Harmonic disturbances in networks, and their treatment // Schneider Electric Technical collection. Cahier technique. 2000. no.152. 29 p.
- 6. Чернобровов Н.А., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
- 7. ГОСТ Р 51677-2000. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности. Введ. 2001-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. III, 4 с.
- 8. Кобозєв О.С., Середа О.Г., Моргун В.В. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі // Електротехніка і електромеханіка. -2012. №5. -C. 21-26.
- 9. Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. М.: Радиотехника, 2004. 72 с.
- 10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999-01-01. Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. III, 32 с.

REFERENCES

- 1. Lozyns'kyj A.O., Kopchak B.L., Busher V.V. *Systemy keruvannja elektropobutovymy pryladamy* [Control systems of electrical household appliances]. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2010. 304 p. (Ukr).
- 2. Belousov A.A., Salikov M.P. Increase of power efficiency of the single-phase asynchronous engine with the disconnected starting winding. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta Vestnik of OSU*, 2013, no.1(150), pp. 171-175, (Rus).
- 3. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniia prompredpriiatii* [Higher harmonics in power systems, industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p. (Rus).
- **4.** Barutskov I.B., Vdovenko S.A., Tsygankov E.V. Harmonic distortion at the frequency converter. *Glavnyi energetic Chief Power Engineer*, 2011, no.6, pp. 5-15. (Rus).
- 5. Collombet C., Lupin J.M., Schonek J. Harmonic disturbances in networks, and their treatment, *Schneider Electric Technical collection, Cahier technique*, 2000, no.152, 29 p.
- **6.** Chernobrovov N.A., Semenov V.A. *Releinaya zaschita energeticheskih sistem: Ucheb. posobie dlya tehnikumov* [Power systems relay protection: Textbook for technical], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998, 800 p. (Rus).
- 7. GOST R 51677-2000. Mashiny elektricheskie asinhronnye moschnost'yu ot 1 do 400 kW vklyuchitel'no. Dvigateli. Pokazateli energoeffektivnosti [State Standard R 51677-2000. Induction electric machines ranging from 1 to 400 kW. Motors. Energy efficiency indicators]. Moscow, IPK Standards Publ., 2001. 7 p. (Rus).
- **&.** Kobozev A.S., Sereda O.G. Morgun V.V. Determination of effective values of periodic nonsinusoidal current and its odd harmonics through discrete values of continuous time dependence of the current. *Elektrotekhnika i elektromekhanika Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.5, pp. 21-26. (Ukr).
- 9. Basarab M.A., Zelkin E.G., Kravchenko V.F., Yakovlev V.P. *Cifrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uitte-kera-Kotel'nikova-Shennona* [Digital signal processing based on the Whittaker-Kotelnikov-Shannon theorem]. Moscow, Radio Engineering Publ., 2004. 72 p. (Rus).
- 10. GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnicheskih sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemah elektrosnabzheniya obschego

naznacheniya [State Standard 13109-97. Electrical energy. Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems]. Minsk, IPK Standards Publ., 1998. 35 p. (Rus).

Надійшла (received) 17.02.2015

Середа Олександр Григорович¹, к.т.н., доц., Варшамова Ірина Сергіївна¹, асистент, ¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076864, e-mail: lexus_suba@mail.ru, varshamova i@rambler.ru

O.G. Sereda¹, I.S. Varshamova¹

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

Protection of household appliances induction motors against overcurrent taking into account nonlinear distortion of phase current.

Purpose. Theoretical justification and engineering of induction motors heat protection method from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase current and implementation as a microprocessor device functioning algorithm. Methodology. To solve the problem used the theory of the representing complex harmonic oscillations analog signals expansion into the oscillation spectrum forming elementary harmonic components in order to compare their properties by applying the theory of discrete signals and systems, as well as methods of spectral analysis and discrete signals filtering. The harmonic analysis versatility is that any periodic signal may be synthesized from harmonic oscillation of certain amplitude, frequency and initial phase. A mathematical model for determining the phase current harmonic content of power supply networks with isolated neutral and non-linear loads types and, as a consequence, the distortion of sinusoidal phase current change is developed by multiplying the analog current in time dependency on the grate delta-function with different sampling intervals, in which the use of simple and widely used in relay protection units, in particular electronic overcurrent relays, mathematical operations of integration squares instantaneous current allows the most in harmony with the mathematical tools to build other network protection types. Findings. The necessity to increase the sensitivity of the induction motors heat protection from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase currents is proved. By nonlinear distortion harmonic analysis of the phase currents the motor protection reliability increasing provided by taking into account the higher harmonic components of the phase currents, which causes to additional losses and heating of the stator winding. It uses the simplest and widely used in protective relaying mathematical apparatus determining of most significant higher harmonics currents RMS. Originality. A possibility of extending the implemented protection list of electronic overcurrent relays based on the digital processing of signals from the current sensors is theoretical research by the harmonious analysis of phase current spectrum with the nonlinear distortions presence. A new technical solution is proposed that allows in online sliding monitoring mode to form response time of electronic overcurrent relays for reliable protection of induction motors from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase current. Practical value. A microprocessor protection functioning algorithm of induction motors is designed against impermissible heating coils with overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase current. References 10, figures 4.

Key words: induction motors, microprocessor protection, electronic overcurrent relay.

А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ И АКСИАЛЬНЫМ РАБОЧИМ ЗАЗОРОМ

На основі методу відносних коефіцієнтів показників технічного рівня з відносними геометричними керованими змінними отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімумів маси та вартості активної частини торцевих асинхронних короткозамкнених двигунів та виконано порівняльний аналіз вказаних показників при традиційному та аксіальному виконаннях статора і ротора. Бібл. 16, табл. 2, рис. 6. Ключові слова: показники технічного рівня, оптимальні геометричні розміри, асинхронний короткозамкнений двигун.

На основе метода относительных коэффициентов показателей технического уровня с относительными геометрическими управляемыми переменными получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимума массы и стоимости активной части торцевых асинхронных короткозамкнутых двигателей и выполнен сравнительный анализ указанных показателей при традиционном и аксиальном исполнениях статора и ротора. Библ. 16, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: показатели технического уровня, оптимальные геометрические размеры, асинхронный короткозамкнутый двигатель.

В числе исторических достижений изначальной электротехники представлен первый электродвигатель вращательного движения с плоским аксиальным рабочим зазором, разработанный Б.С. Якоби в 1834 г. Затем совершенствовались концентрические электромагнитные системы (ЭМС) и в конце XIX века на основе работ М.О. Доливо-Добровольского последовало освоение промышленного производства трехфазных, в том числе асинхронных, машин с цилиндрическим рабочим зазором [1]. Асинхронные двигатели (АД) с дискретными зубцово-пазовыми структурами внешнего статора и внутреннего ротора (рис. 1,*a*) получили известное, в том числе из [2], наименование «классических» (АДК), а также традиционных.

На протяжении прошедшего столетия развитие электромеханики сопровождалось менее масштабным, по сравнению с комплексными разработками и крупносерийным производством АДК, исследованиями и успешным изготовлением торцевых асинхронных двигателей (ТАД) в США и западной Европе (представлены в перечнях литературы [3, 4]). Плоская форма и малая осевая длина однороторных ТАД с ЭМС (рис. 1,6) позволяет повысить показатели технического уровня (ПТУ) ряда технических объектов [4]. В качестве примера таких объектов показаны конструктивные схемы элементов подводно-технического оборудования с серийным АДК (рис. 2,а,б) и с ТАД (рис. 2,в) [5].

Известные недостатки ТАД заключаются в осевом притяжении ротора к статору, неравномерности распределения магнитного поля в активном объеме и в конструктивной сложности размещения внутренних лобовых частей статора в зоне положения вала и подшипников при числе полюсов $2p \le 4$ [6 – 9]. Также известными конструктивными решениями повышения ПТУ ТАД являются использование одноопорной конструкции ротора, установленного во внутренней обойме «легкого» подшипника большого диаметра [10], трапециевидного сечения ярма [11] и конусноцилиндрической структуры слоев витого магнитопровода [12]. Указанные технические решения представлены конструктивной схемой (рис. 3,а) и фото (рис. 3,6) образцов ТАД мощностью $P_{\rm H} = 150$ Вт (2p = 2, линейное напряжение 27 В и частота сети $f_1 = 50 \Gamma \mu$), разработанного в 1990 году для агрегата (рис. 2,в). Кроме того, возможна «двухуровневая» укладка обмотки вариантов с активным распределенным слоем [2] и дискретной зубцово-пазовой структурой [13] с увеличенной вдвое высотой активно-пазового слоя статора ТАД. Повышение пазового рассеяния, массы и потерь электротехнической стали (ЭТС) сопровождается снижением металлоемкости, потерь и лобового рассеяния двухуровневой обмотки статора, а также уменьшением наружного диаметра ТАД [13].

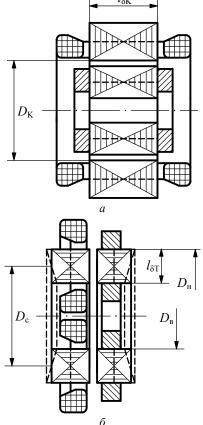


Рис. 1. Конструктивные схемы электромагнитных систем асинхронных короткозамкнутых двигателей классического (a) и аксиального (δ) исполнений

© А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков

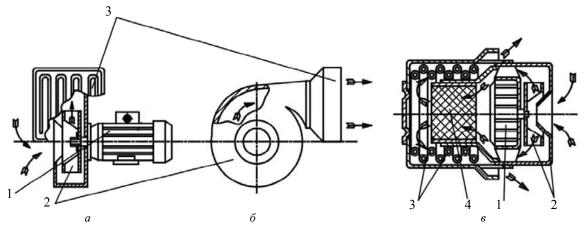


Рис. 2. Схемы агрегатов обработки дыхательно-газовой смеси с центробежным вентилятором, цилиндрическим электродвигателем и плоским теплообменником (a – главный вид; δ – вид сбоку) и со встроенным фильтром и аксиальным электродвигателем (ϵ): 1 – асинхронный двигатель; 2 – центробежный вентилятор; 3 – теплообменник;

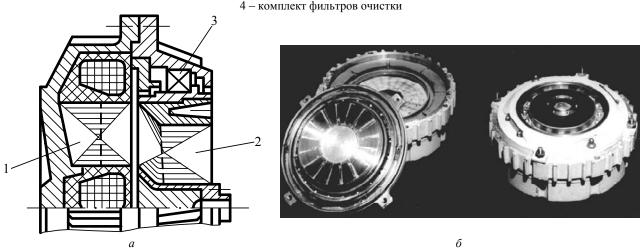


Рис. 3. Конструктивная схема (a) и образцы (b) аксиального асинхронного двигателя с одноопорной установкой ротора: 1- статор; 2- ротор; 3- подшипник

В дополнение к конструктивному соответствию ряду механизмов, преимуществами аксиальных ЭМС являются относительно малые отходы ЭТС при изготовлении витых зубчатых магнитопроводов и упрощение обмоточно-изолировочных работ. Исходя из преимуществ плоской укладки, выполнялись разработки ТАД с печатными и штампосварными обмотками [4]. Однако освоения производства таких ТАД, в отличие от аксиально-дисковых тахогенераторов и двигателей постоянного тока, не последовало. Согласно [13], разработанные для объектов бытовой техники однофазные ТАД с витыми магнитопроводами и штампованными (с изменяющимся шагом) пазами отличаются относительно классических аналогов $(2p = 4, f_1 = 50 \ \Gamma \mu)$ пониженной трудоемкостью изготовления и повышенными ПТУ. Однако приоритеты технологической преемственности, ранее вложенной капиталоемкости оборудования и факторы стандартизации и автоматизированного проектирования АДК практически ограничивают возможности промышленной реализации малых ТАД [13]. Также в публикациях не представлены, за исключением анализа [9] зависимостей ПТУ от отношения $\xi_{\rm T}$ наружного $D_{\rm H}$ и внутреннего $D_{\scriptscriptstyle \rm B}$ диаметров активной поверхности статора (рис. 1,б), работы по оптимизации ТАД. При этом согласно [2, 13] и перечню литературы [14], потенциал развития АДК традиционными способами повышения ПТУ электромеханических устройств практически исчерпан. Поэтому невзирая на технологический консерватизм имеются перспективы расширения производства и использования ТАД и АД с внешним ротором по меньшей мере в электромеханических системах специального назначения [14].

Цель работы — разработка математической модели (ММ) анализа массостоимостных показателей активной части однороторного ТАД на основе универсального метода [14, 15] и сравнение показателей массы и стоимости вариантов ЭМС короткозамкнутого АД (рис. $1,a,\delta$).

При разработке ММ рассматриваются ЭМС с традиционной зубцово-пазовой структурой, не учитывается ограничение размещения внутренних лобовых частей (на основе возможности их укладки в зоне $D_{\rm B}$ статора на рис. 3), не учитывается краевой эффект распределения магнитного поля. Исходя из последнего допущения распределение вдоль активной длины АДК амплитуды индукции в рабочем зазоре $B_{\delta \rm K}=$ = const, а аналогичная функция распределения индукции ТАД определяется изменением соотношений элементов магнитопровода вдоль текущего радиуса [7]. Такая функция может иметь вид условно симметричного относительно среднего диаметра $D_{\rm c}$ и возрастаю-

щего или убывающего от $D_{\scriptscriptstyle \rm B}$ к $D_{\scriptscriptstyle \rm H}$ распределения. Симметричное и, в большей степени, возрастающее распределения повышают использование активного объема и предельную мощность ТАД [8] и обеспечиваются трапециевидными сечениями ярем (рис. 3,а). При трапециевидном и традиционном прямоугольном сечениях ярем (рис. 1,6) и исключении насыщения зубцов и ярем в зонах соответственно $D_{\scriptscriptstyle \rm B}$ и $D_{\scriptscriptstyle \rm H}$ расчетноэкспериментальные соотношения индукций зазора $B_{\delta \mathrm{H}}$ и $B_{\delta B}$ на граничных диаметрах составляют 1,2...1,25 [4, 7, 8]. Указанные функции в относительных единицах $B_{\delta i}/B_{\delta H}$ от $\xi_{\rm T}$ представлены на рис. 4, которые определяются отношением текущего значения индукции $B_{\delta i}$ и диаметра D_i к соответствующим индукции на наружном диаметре $B_{\delta H}$ и внутреннему диаметру $D_{\rm B}$.

Оптимизационные целевые функции (ЦФ) массы $F_{\mathrm{MK}(\mathrm{T})}$ и стоимости $F_{\mathrm{CK}(\mathrm{T})}$ ЭМС АДК (ТАД), а также ЦФ активных потерь (в данной работе не рассматривается) представляются уравнениями вида [14, 15]

$$F_{\mathbf{M}(\mathbf{C})\mathbf{K}(\mathbf{T})} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\mathbf{H}\mathbf{J}}}\right)^{3} \mathbf{K}_{\mathbf{M}(\mathbf{C})} \Pi_{\mathbf{M}(\mathbf{C})\mathbf{K}(\mathbf{T})}^{*}, \tag{1}$$

где Пил – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок (ЭМН) АД [14], являющийся идентичным для рассматриваемых ЭМС исходя из принципа электромагнитной эквивалентности сравнительного анализа [3]; К_{м(С)} – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов; $\Pi^*_{M(C)K}$ и $\Pi^*_{M(C)T}$ – относительный показатель в виде коэффициента массы (стоимости) ЭМС соответственно АДК и ТАД, определяющийся относительными геометрическими управляемыми переменными (УП).

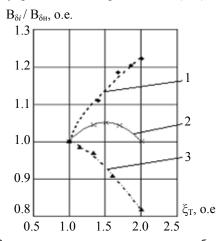


Рис. 4. Варианты распределения индукции в рабочем зазоре торцевого асинхронного двигателя с прямоугольным (1) и с трапециевидным (2, 3) сечениями ярем

УП анализа АДК являются относительная активная длина $\lambda_{\delta K}$ и расчетный параметр a_{MK} [14]:

$$\lambda_{\delta K} = l_{\delta K}/D_{K}, [M/M]; a_{MK} = D_{K}^{4}/\Pi_{HJI}[M^{4}/M^{4}].$$

Для определения ПТУ ТАД также вводится параметр $a_{\rm MT}$, а относительная активная длина $\lambda_{\rm \delta T}$ аналогично геометрическим параметрам ЭМС трансформаторов [15] и в соответствии с [6, 9] выражается через отношение диаметров ξ_T :

$$a_{\rm MT} = D_{\rm c}^4 / \Pi_{\rm HJ} [{\rm m}^4 / {\rm m}^4];$$
 (2)

$$\xi_{\rm T} = D_{\rm H}/D_{\rm B}, [{\rm M/M}];$$

$$\lambda_{\rm \delta T} = (1 - 1/\xi_{\rm T})/(1 + 1/\xi_{\rm T}).$$
(3)

Являющийся аналогом $D_{\rm K}$ диаметр $D_{\rm c}$ [3] и активная длина $l_{\delta T}$ ЭМС ТАД определяются [6]:

$$D_{\rm c} = (D_{\rm H} + D_{\rm B})/2 = D_{\rm H}(1 + 1/\xi_{\rm T})/2;$$
 (4)

$$l_{\delta T} = (D_{\rm H} - D_{\rm B})/2 = D_{\rm H} (1 - 1/\xi_{\rm T})/2.$$
 (5)

Неравномерное радиальное распределение индукции в рабочем зазоре ТАД учитывается аппроксимацией расчетно-экспериментальных зависимостей вида (рис. 4):

$$B_{\delta}(\xi_{\rm T}) = B_{\delta \rm H} \left(1 - 0.167 (\xi_{\rm T} - 1)^{1.36} \xi_{\rm T}^{0.15} \right); \tag{6}$$

$$B_{\delta}'(\xi_{\rm T}) = B_{\delta \rm H} \left(1 + 0.204 (\xi_{\rm T} - 1)^{0.63} \xi_{\rm T}^{0.15} \right);$$

$$B_{\delta}''(\xi_{\mathrm{T}}) = B_{\delta \mathrm{H}} \Big(1,051 - 0,186(\xi_{\mathrm{T}} - 0,5(1 + \xi_{\mathrm{T}n})^{2} \xi_{\mathrm{T}}^{0,15} \Big),$$

где аппроксимация (6) соответствует трапециевидному сечению ярма с насыщением слоев ЭТС вдоль радиуса, близким к равномерному.

Поток главного магнитного поля в рабочем зазоре ТАД определяется с использованием (4, 6)

$$\begin{split} \Phi_{\delta} = & \frac{2}{\pi} B_{\delta H} (1 - K_{\rm B}) \int_{0}^{2\pi/p} \int_{D_{\rm B}}^{H} \frac{D}{2} d\frac{D}{2} d\phi = \\ = & B_{\delta H} (1 - K_{\rm B}) \frac{1}{2p} D_{\rm H}^{2} (1 - \frac{1}{\xi_{\rm T}^{2}}) = & B_{\delta H} (1 - K_{\rm B}) \frac{2}{p} D_{\rm c}^{2} \frac{1 - 1/\xi_{\rm T}}{1 + 1/\xi_{\rm T}}, \end{split} \tag{7}$$

где $K_{\scriptscriptstyle B}$ – усредненный коэффициент распределения индукции в рабочем зазоре, который для ЭМС ТАД с эффективным использованием активного объема выражается зависимостью распределения индукции (6) и находится

$$K_{_{\mathbf{B}}} = \frac{0.167 \int\limits_{1}^{\zeta_{_{T}}} (\xi_{T} - 1)^{1.36} \xi_{T}^{$$

Аналогично ММ ЭМС АДК [14] для определения ЦФ (1) ТАД используются известные выражения числа и сечения эффективных проводников паза статора U_{Π} и $S_{3\phi}$, чисел витков фазы w_1 и зубцов статора z_1 [16]:

$$U_{\pi} = w_1 a_1 / p q_1; \tag{8}$$

$$S_{\text{ad}} = P_{\text{H}}/(a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos \varphi); \tag{9}$$

$$U_{\rm II} = w_1 a_1 / p q_1;$$
 (8)
 $S_{9\phi} = P_{\rm H}/(a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos \phi);$ (9)
 $w_1 = K_{\rm E} U_1/(4,44 K_{\rm p} K_{\rm y} f_1 \Phi_{\delta});$ (10)

$$z_1 = 2pm_1q_1, (11)$$

где a_1 – число параллельных ветвей обмотки статора; К_Е – соотношение ЭДС фазы статора и фазного напряжения U_1 ; m_1 и q_1 – число фаз и пазов на полюс и фазу; К_р и К_у - обмоточные коэффициенты распределения и укорочения; J_1 – плотность тока статора; η и соѕф - коэффициенты полезного действия и энергетический коэффициент.

С учетом выражений (6) - (10) и УП (2), (3) суммарная площадь пазов $S_{1\Sigma}$ в поперечном сечении магнитопровода статора

$$\begin{split} S_{1\Sigma} &= z_1 U_1 S_{9\dot{\Phi}} / K_{3\pi} = \\ &= \Pi_{U \Box} / (K_{3\pi} D_c^2 2 (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)) = \\ &= \sqrt{\Pi_{U \Box}} / (K_{3\pi} 2 \sqrt{a_{\rm MT}} (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)), \end{split} \tag{12}$$

где К_{зп} – полный коэффициент заполнения паза статора, а показатель Пид электромагнитно-эквивалентных АД определяется выражением [14]

$$\Pi_{\text{ИЛ}} = K_{\text{E}} p P_{\text{H}} / (2.22 K_{\text{D}} K_{\text{V}} f_1 J_1 B_{\delta_{\text{H}}} (1 - K_{\text{B}}) \eta \cos \varphi).$$

Большая и меньшая суммарная ширина зубцов на диаметрах $D_{\scriptscriptstyle \rm H}$ и $D_{\scriptscriptstyle \rm B}$ магнитопровода статора (ротора) $b_{zh\Sigma 1(2)}$ и $b_{zb\Sigma 1(2)}$ с учетом распределения индукции в рабочем зазоре (6) $B_{\delta}(\xi_{\text{T}i})$ и коэффициента заполнения ЭТС магнитопровода К_{зс}:

$$b_{zH\Sigma1(2)} = t_{H1(2)} B_{\delta H} / (B_{zH\Sigma1(2)} K_{3c}) = \pi D_H \alpha_{H1(2)}; \qquad (13)$$

$$b_{z_{\rm B}\Sigma 1(2)} = t_{\rm B1(2)} B_{\delta_{\rm B}} / (B_{z_{\rm B}\Sigma 1(2)} K_{\rm 3c}) = \pi D_{\rm H} \alpha_{\rm B1(2)} / (\xi_{\rm T}),$$
 (14)

где $t_{\rm H1(2)}$ и $t_{\rm B1(2)}$ – зубцовые деления по диаметрам магнитопровода статора (ротора) $D_{\rm H}$ и $D_{\rm B}$; $\alpha_{\rm H1(2)}$ и $\alpha_{\rm B1(2)}$ – расчетные коэффициенты зубцов статора (ротора), обратные к соотношениям $K_{B + \Sigma 1(2)}$ и $K_{B + \Sigma 1(2)}$ амплитуд индукций в зубце на $D_{\mbox{\tiny H}}$ и $D_{\mbox{\tiny B}}$ $B_{\mbox{\tiny ZH}\Sigma1(2)}$ и $B_{\mbox{\tiny ZB}\Sigma1(2)}$ к индукции в рабочем зазоре $B_{\delta}(\xi_{\rm T})$ и $K_{\rm 3c}$:

$$\alpha_{\rm H1(2)} = 1/(K_{3c}K_{BH\Sigma1(2)});$$
 (15)

$$\alpha_{\rm B1(2)} = (1 - 0.167(\xi_{\rm T} - 1)^{1.50}(\xi_{\rm T})^{0.15})/(K_{\rm 3c}K_{B\rm B\Sigma1(2)}).$$
 (16)

 $\alpha_{\rm H1(2)} = 1/(K_{\rm 3c}K_{B\rm H}\Sigma_{1(2)});$ (15) $\alpha_{\rm B1(2)} = (1-0.167(\xi_{\rm T}-1)^{1.36}(\xi_{\rm T})^{0.15})/(K_{\rm 3c}K_{B\rm B}\Sigma_{1(2)}).$ (16) На основе (13) – (16) с учетом постоянства суммарной ширины пазов $b_{\pi\Sigma 1(2)}$ по радиусу в плоскости активной поверхности магнитопровода определяется уравнение зубцово-пазовой структуры статора, как связь соотношения $K_{BH\Sigma 1}$ от параметра ξ_T

$$\begin{cases} \frac{b_{\Pi\Sigma1}}{b_{\Pi\Sigma1}} = \frac{\pi D_{\rm H} (1 - \alpha_{\rm H1})}{\pi D_{\rm B} (1 - \alpha_{\rm B1})} = 1 \Rightarrow \xi_{\rm T} \frac{1 - \alpha_{\rm H1}}{1 - \alpha_{\rm B1}} = 1. \end{cases}$$
 (17)

График зависимости (17) в функции $K_{BH\Sigma 1} = f(\xi_T)$ для магнитопровода статора приведен на рис. 5 при максимальной индукции $B_{z \text{B} \Sigma 1}$ на внутреннем диаметре зубцов статора 2,1 Тл и для значения индукции в рабочем зазоре на наружном диаметре $B_{\delta H} = 0.75 \text{ Тл}$, которые приняты исходя из рекомендуемых значений индукции в рабочем зазоре АД [16].

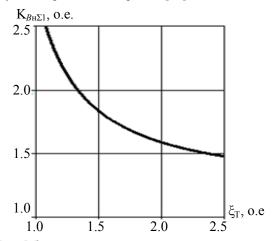


Рис. 5. Зависимость соотношения амплитуды индукции на внешней части зубца к индукции в рабочем зазоре от соотношения диаметров

При определении расчетного соотношения магнитопровода ротора $K_{BH\Sigma 2}$ с углубленными пазами, обеспечивающего заданные пусковые характеристики, выполняются последовательные приближения. При известном $\xi_{\rm T}$ понижается значение $B_{z{\rm B}\Sigma2}$ и методом итераций находится рациональная геометрия зубцово-пазовой зоны ротора.

После определения $K_{BH\Sigma 1}$ в соответствии с ξ_T (по рис. 5), рассчитывается α_{H1} и, с использованием (17) определяется суммарная ширина паза статора

$$b_{\rm n\Sigma 1} = 2\pi D_{\rm c} (1 - \alpha_{\rm H\,I}) / (1 + 1/\xi_{\rm T}).$$
 (18)

Высота зубца статора с учетом коэффициента шлица K_{рш1} [14], находится с учетом (12) и (17)

$$h_{z1} = \frac{S_{1\Sigma}}{(1 - K_{pm1})b_{\Pi\Sigma 1}} =$$

$$= \frac{\Pi_{U\Pi}}{(1 - K_{pm1})K_{3\Pi}D_{c}^{3}4\pi \frac{(1 - 1/\xi_{T})(1 - \alpha_{H1})}{(1 + 1/\xi_{T})^{2}}} = \frac{4\sqrt{\Pi_{U\Pi}}}{\sqrt[4]{a_{MT}^{3}}(1 - K_{pm1})K_{3\Pi}4\pi \frac{(1 - 1/\xi_{T})(1 - \alpha_{H1})}{(1 + 1/\xi_{T})^{2}}}.$$
(19)

Средняя ширина катушки $b_{\rm cp}$ и средняя длина витка обмотки l_{w1} статора ТАД определяется в соответствии с [9, 16] и (5):

$$l_{wl} = 2(l_{\delta T} + l_{\pi l}) = 2D_{c} \frac{(1 - 1/\xi_{T})}{(1 + 1/\xi_{T})} + 2K_{\pi}b_{cp} =$$

$$= 2D_{c} \left[\frac{1 - 1/\xi_{T}}{1 + 1/\xi_{T}} + \frac{K_{\pi}\beta\pi}{2p} \right], \tag{20}$$

где β – коэффициент укорочения обмотки статора, $l_{\rm n1}$ и ${\rm K_n}$ – длина и коэффициент лобовой части катушки статора.

На основе (12) и (20) масса медной обмотки статора ТАД с плотностью проводника рм

$$m_{wl\,T} = \rho_{_{\rm M}} \frac{l_{wl}}{2} S_{1\Sigma} K_{_{3\Pi}} = \rho_{_{\rm M}} \sqrt[4]{\Pi_{HJ}^3} \, \Pi_{wl\,T}^* \, ,$$

где Π^*_{w1T} – относительный показатель массы активного материала обмотки статора

$$\Pi_{w1T}^* = \frac{1 + 1/\xi_T}{2\sqrt[4]{a_{MT}}} \left[\frac{1 - 1/\xi_T}{1 + 1/\xi_T} + \frac{K_{\pi}\beta\pi}{2p} \right]. \quad (21)$$

Аналогично [14] определяются элементы геометрии алюминиевой обмотки ротора:

$$S_{2\Sigma} = z_2 I_2 / J_2 = I_{1H}(0.2 + 0.8\cos\varphi) \times \times 2m_1 w_1 K_p K_y / K_{cK} = = \frac{\sqrt{\Pi_{HJ}} \gamma_1 (1 + 1/\xi_T)}{2\sqrt{a_{MT}} (1 - 1/\xi_T)};$$
(22)

$$h_{z2} = \frac{S_{2\Sigma}}{(1 - K_{\text{piii}2})b_{\pi\Sigma2}} = \frac{\sqrt[4]{\Pi_{\text{H}}}\gamma_{1}}{\sqrt[4]{a_{\text{MT}}^{3}}(1 - K_{\text{piii}2})4\pi \frac{(1 - 1/\xi_{\text{T}})(1 - \alpha_{\text{H}}2)}{(1 + 1/\xi_{\text{T}})^{2}}};$$
(23)

$$S_3 = \frac{I_3}{J_3} = \frac{\gamma_1 \sqrt{\Pi_{\text{MJ}}} (1 + 1/\xi_{\text{T}})}{\sqrt{a_{\text{MT}}} 4\pi p \gamma_2 (1 - 1/\xi_{\text{T}})},$$
 (24)

где $S_{2\Sigma}$ и $b_{\Pi\Sigma2}$ – суммарные площадь и ширина пазов ротора; h_{z2} и S_3 – высота зубцов и сечение короткозамыкающего кольца обмотки ротора; I_{1H} – номинальный ток обмотки статора; z_2 – число зубцов ротора; I_3 и J_3 – ток и плотность тока короткозамыкающего кольца ротора; ү2 - коэффициент, учитывающий уменьшение плотности тока J_3 по сравнению с плотностью тока стержня J_2 ; $K_{\text{pun}2}$ – расчетное соотношение шлица зубца ротора, K_{ck} – коэффициент скоса пазов; у1 – расчетный коэффициент трансформации статора относительно ротора, принимающий для реальных K_p , K_y , $\cos \varphi$, $K_{c\kappa}$, $J_{1(2)}$ значения [14]: $\gamma_1 = K_p K_y (0.2 + 0.8 \cos \varphi) J_1 / (K_{c\kappa} J_2) = 1.338...2,785.$

Масса роторной обмотки ТАД представляется на основе (22) – (24) выражением

$$\begin{split} m_{W2T} &= \rho_{\rm a} \big[l_{\delta \rm T} S_{2\Sigma}^{\rm 1} + \pi (D_{\rm H} + l_3 + D_{\rm B} - l_3) S_3 \big] = \\ &= \rho_{\rm a} \sqrt[4]{\Pi_{\rm MH}^3} \Pi_{W2T}^*, \end{split}$$

где l_3 – радиальная длина короткозамыкающего кольца ротора; ρ_a и $\Pi^*_{\ \ w2T}$ – плотность и относительный показатель массы алюминиевой короткозамкнутой обмотки

$$\Pi_{w2T}^* = \frac{\gamma_1}{2\sqrt[4]{a_{MT}}} \left[1 + \frac{(1+1/\xi_T)}{(1-1/\xi_T)\gamma_2 p} \right]. \tag{25}$$

Поперечные сечения зубцов статора (ротора) определяются уравнением

$$S_{z1(2)} = \int_{0}^{2\pi} \int_{D_{\rm B}}^{H} \left(\frac{D}{2} - \frac{b_{\rm \Pi\Sigma I(2)}}{2\pi} \right) d\frac{D}{2} d\varphi =$$

$$= \pi \left[\frac{1}{4} D_{\rm H}^{2} (1 - 1/\xi_{\rm T}^{2}) - \frac{b_{\rm \Pi\Sigma I(2)} D_{\rm H}}{2\pi} (1 - 1/\xi_{\rm T}) \right] =$$

$$= \pi \sqrt{\Pi_{\rm M, I}} \sqrt{a_{\rm MT}} \left[\frac{1 - 1/\xi_{\rm T}}{1 + 1/\xi_{\rm T}} - 2(1 - \alpha_{\rm HI(2)}) \frac{1 - 1/\xi_{\rm T}}{(1 + 1/\xi_{\rm T})^{2}} \right].$$
(26)

Высота ярма прямоугольного поперечного сечения эквивалентного по площади трапецеидальному сечению ярма статора (ротора) ТАД находится на основе [14, 16] и (5-7) по интегральному значению потока главного магнитного поля

$$h_{a1(2)} = \frac{\Phi_{\delta}}{2K_{3c}l_{\delta T}B_{a1(2)}} =$$

$$= \frac{B_{\delta H}(1 - K_{B})2D_{c}^{2}(1 - 1/\xi_{T})(1 + 1/\xi_{T})}{B_{\delta H}K_{3c}2p(1 + 1/\xi_{T})D_{c}(1 - 1/\xi_{T})K_{Ba}} = (27)$$

$$= \alpha_{31(2)}(1 - K_{B})D_{c}/p,$$

где K_{Ba} – соотношение амплитуд индукций $B_{\delta H}$ в рабочем зазоре на наружном диаметре и внешнем витке ярма B_{aH} ; $\alpha_{31(2)}$ – коэффициенты ярма статора (ротора) $\alpha_{31(2)} = 1/(K_{3c}K_{Ba})$.

Площади аксиальных поперечных сечений ярем статора и ротора принимаются одинаковыми ($S_{a1} \approx S_{a2} = S_a$) и определяются

$$S_{a} = \frac{\pi (D_{\rm H}^{2} - D_{\rm B}^{2})}{4} = \pi D_{\rm c}^{2} \frac{(1 - 1/\xi_{\rm T})}{(1 + 1/\xi_{\rm T})} =$$

$$= \sqrt{\Pi_{\rm H/I}} \sqrt{a_{\rm MT}} \pi \frac{(1 - 1/\xi_{\rm T})}{(1 + 1/\xi_{\rm T})}.$$
(28)

Масса магнитопровода ТАД находится исходя из (19), (23), (26) – (28)

$$m_{\text{MMT}} = \rho_{\text{c}} K_{3\text{c}} [S_{z1} h_{z1} + S_{z2} h_{z2} + K_{\text{T}a} (h_{a1} + h_{a2}) S_a] =$$

$$= \rho_{\text{c}} \sqrt[4]{\Pi_{\text{M}}^3} K_{\text{T}a} \Pi_{\text{MMT}}^*,$$

где ρ_c — плотность ЭТС, $K_{\tau a}$ и Π^*_{MMT} — коэффициент повышения массы трапецеидального ярма относительно эквивалентного по площади прямоугольного ярма и относительный показатель массы магнитопровода ТАД:

$$K_{_{T}a} = \frac{1 + \frac{1 - 0.167(\xi_T - 1)^{1.36}\xi_T^{0.15}}{\xi_T}}{(1 + 1/\xi_T)(1 - K_{_B})}\,;$$

$$\Pi_{\text{MMT}}^{*} = \frac{K_{3c}}{\sqrt[4]{a_{\text{MT}}}} \left[\frac{1}{(1 - K_{\text{piil}})K_{3\Pi}} \left[\frac{1 + 1/\xi_{\text{T}}}{4(1 - \alpha_{\text{H}1})} - \frac{1}{2} \right] + \frac{\gamma_{1}}{(1 - K_{\text{piil}2})} \left[\frac{1 + 1/\xi_{\text{T}}}{4(1 - \alpha_{\text{H}2})} - \frac{1}{2} \right] \right] + K_{3c} \sqrt[4]{a_{\text{MT}}^{3}} K_{Ta} \left(\frac{\pi}{p} \right) (\alpha_{31} + \alpha_{32}) \frac{1 - 1/\xi_{\text{T}}}{1 + 1/\xi_{\text{T}}}.$$
(29)

Масса M_{AT} и зависящая от удельных цен меди $C_{\rm M}$, алюминия $C_{\rm a}$ и ЭТС $C_{\rm c}$ стоимость C_{AT} активных материалов ТАД определяется на основе (21), (25), (29) выражением вида (1) аналогично [14]:

где Π^*_{MT} и Π^*_{CT} – относительные показатели массы и стоимости ЭМС, позволяющие определять наличие оптимальных геометрических соотношений ТАД по критериям минимумов массы и стоимости активной части, а также определять экстремальные значения

$$\Pi_{\text{MT}}^* = \rho_{\text{M}} \Pi_{w1\text{T}}^* / \rho_{\text{c}} + \rho_{\text{a}} \Pi_{w2\text{T}}^* / \rho_{\text{c}} + \Pi_{\text{MMT}}^*; \quad (30)$$

$$\Pi_{\text{CT}}^* = C_{\text{M}} \rho_{\text{M}} \Pi_{w1\text{T}}^* / (C_{\text{c}} \rho_{\text{c}}) + C_{\text{a}} \rho_{\text{a}} \Pi_{w2\text{T}}^* / (C_{\text{c}} \rho_{\text{c}}) + \Pi_{\text{MMT}}^* . (31)$$

УП $a_{\text{MTЭ}}$ и $\xi_{\text{MTЭ}}$:

Примеры результатов расчетов функциональных зависимостей (30) и (31) при следующих соотношениях: $K_{Ba}=2$ при $p\leq 2$ и $K_{Ba}=1,5$ при p>2, $\gamma_2=0,85$, $K_{\text{рш}}=0,12$, $K_{\text{зп}}=0,3$ для трех значений $\gamma_1(1,338;1,903;2,785)$, полученных при $\rho_{\text{м}}/\rho_{\text{c}}=8,9/7,65;$ $\rho_{\text{a}}/\rho_{\text{c}}=2,7/7,65;$ $C_{\text{m}}/C_{\text{c}}=90,26/13,5;$ $C_{\text{a}}/C_{\text{c}}=47/13,5$ для ТАД с $p\leq 4$, приведены в табл. 1. Экстремумы показателей массы и стоимости $\Pi^*_{\text{МТЭ}}$ и $\Pi^*_{\text{СТЭ}}$ электромагнитно-эквивалентных АДК представлены в табл. 2. Графики зависимостей (30) и (31), соответствующих средним значениям расчетного коэффициента γ_1 восьмиполюсных ТАД и АДК представлены на рис. 6.

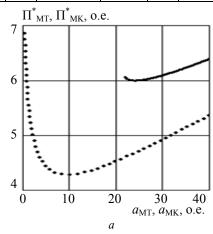
Таблица 1

Экстремумы показателей массы и стоимости активной части торпевых асинхронных короткозамкнутых двигателей

части.	ти торцевых асинхронных короткозамкнутых двигателей							
γ ₁ , o.e.	ξтэ	$\lambda_{T\Im}$	<i>a</i> _{мтэ} , о.е.	П [*] _{МТЭ} , о.е.	ξтэ	$\lambda_{T\Im}$	<i>a</i> _{мтэ} , о.е.	Π [*] _{CTЭ} , o.e.
0.0.	<i>p</i> = 1							
1,338	1,80	0,286	3,197	8,893	2,50	0,429	6,688	25,647
1,903	1,80	0,286	3,508	9,532	2,45	0,420	7,517	26,773
2,785	1,75	0,259	4,459	10,500	2,40	0,412	8,429	28,498
				<i>p</i> =	= 2			
1,338	1,55	0,216	6,465	5,615	2,15	0,365	11,425	15,259
1,903	1,50	0,200	7,869	6,030	2,10	0,355	12,783	15,986
2,785	1,50	0,200	8,946	6,655	2,10	0,355	13,853	17,091
				<i>p</i> =	= 3			
1,338	1,45	0,184	7,452	4,681	1,95	0,322	12,043	12,425
1,903	1,45	0,184	8,097	5,035	1,90	0,310	13,626	13,037
2,785	1,45	0,184	9,290	5,571	1,90	0,310	15,084	13,970
	p = 4							
1,338	1,45	0,184	8,793	3,971	1,80	0,286	16,760	10,312
1,903	1,45	0,184	9,712	4,279	1,75	0,273	18,792	10,832
2,785	1,45	0,184	11,003	4,747	1,75	0,273	20,818	11,620

Таблица 2 Экстремумы показателей массы и стоимости активной части классических асинхронных короткозамкнутых двигателей

двигателеи						
γ ₁ , o.e.	$\lambda_{K\Im}$	a_{MK} , o.e.	П [*] _{мкэ} , о.е.	$\lambda_{K\Im}$	<i>a</i> _{мкэ} , о.е.	П [*] _{СКЭ} , о.е.
			p = 1			
1,338	1,00	5,50	11,176	2,30	2,50	25,459
1,903	1,10	7,00	12,607	2,20	3,50	26,516
2,785	0,90	12,50	14,442	2,05	5,50	28,760
			p=2			
1,338	0,60	9,25	7,200	1,75	5,00	18,010
1,903	0,50	15,50	7,869	1,65	6,00	18,881
2,785	0,35	32,50	8,846	1,40	8,75	20,238
	p = 3					
1,338	0,45	12,67	6,388	1,30	7,50	16,109
1,903	0,35	22,67	6,963	1,20	9,17	16,899
2,785	0,30	38,50	7,805	1,05	12,50	18,115
	p = 4					
1,338	0,40	15,5	5,531	1,00	13,25	14,150
1,903	0,35	23,88	6,002	0,95	15,25	14,867
2,785	0,25	48,50	6,693	0,85	20,13	15,957



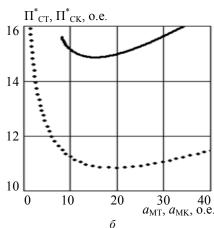


Рис. 6. Зависимости показателей массы (a) и стоимости (δ) восьмиполюсных вариантов электромагнитных систем асинхронных двигателей: торцевого (···) и электромагнитно-эквивалентного классического (—) при $\gamma_1 = 1,903$

Выводы.

1. Функциональные зависимости массы и стоимости активной части ТАД являются унимодальными функ-

циями и характеризуются согласующимися с [9] экстремальными значениями $a_{\rm MT9}$ и $\xi_{\rm T9}$, а также согласуются с результатом разработки ТАД с 2p=4 [13].

2. Установлено, что ЭМС ТАД с трапециевидными сечениями ярем отличаются от электромагнитно-эквивалентных ЭМС АДК при p=2, p=3 и p=4 улучшенными показателями массы и стоимости соответственно на (15...23) % и (10...15) %, (23...28) % и (19...23) %, (24...29) % и (20...27) %, а при p=1 показатель массы улучшается на (15...24) %, а показатель стоимости ухудшается на (1...7) %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *I.* Гусев С.А. Очерки по истории развития электрических машин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. 215 с.
- 2. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей // Электричество. 1996. №8. С. 37-42.
- **3.** Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания. М.: Энергия, 1972. 464 с.
- **4.** Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. М.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
- 5. Ставинский А.А., Забора И.Г. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2006. С. 194-202.
- 6. Ставинский А.А., Григоренко Г.Г. Определение диаметров активных частей торцевых электрических машин с учетом сил одностороннего магнитного притяжения // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. − 1979. №28. С. 80-85.
- 7. Игнатов В.А., Ставинский А.А., Забора И.Г. Исследование распределения магнитного поля в активном объеме торцевых электрических машин с витым магнитопроводом // Электротехника. -1983. №8. C. 27-30.
- 8. Игнатов В.А., Забора И.Г., Ставинский А.А. Использование активного объема и расчет намагничивающего тока торцевых асинхронных машин // Электричество. -1983. -№8. -C. 68-70.
- 9. Игнатов В.А., Ставинский А.А. Зависимости техникоэкономических показателей торцевых асинхронных двигателей от соотношения диаметров активных частей // Электричество. – 1984. – №6. – С. 28-34.
- 10. А.с. 669454 СССР, МКИ² НО2К9/04, НО2К5/16. Электрическая торцевая машина / А.А.Ставинский (СССР). № 2561759/24 07; Заявл. 02.01.78; Опубл. 25.06.79, Бюл. № 23.
- 11. А.с. 788275 СССР, МКИ³ НО2К1/06. Статор торцевой электрической машины / А.А.Ставинский (СССР). № 2739200/24 07; Заявл. 22.02.79; Опубл. 15.12.80, Бюл. № 46. 12. А.с. 936225 СССР, МКИ³ НО2К1/06. Электрическая
- 72. А.с. 936225 СССР, МКИ НО2К1/06. Электрическая торцевая машина / А.А.Ставинский (СССР). № 2930999/24 07; Заявл. 26.05.80; Опубл. 15.06.82, Бюл. № 22.
- **13.** Пашков Н.И. Торцевые асинхронные двигатели малой мощности меньшей материало- и трудоемкости изготовления // Электротехника. -2007. -№7. -C. 8-16.
- **14.** Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей // Електротехніка і електромеханіка. − 2014. №5. С. 37-44.
- **15.** Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований // Электричество. -2014. №9. С. 34-43.
- 16. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 368 с.

REFERENCES

- *I.* Gusev S.A. *Ocherki po istorii razvitiia elektricheskikh mashin* [Essays on the history of the development of electrical machines]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1955. 215 p. (Rus).
- 2. Kazanskii V.M. Crisis and prospects for the development of small induction motors. *Electrichestvo Electricity*, 1996, no.8, pp. 37-42. (Rus).
- 3. Palastin L.M. *Elektricheskie mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniia* [Electric machines of independent power supply]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 464 p. (Rus).
- 4. Ignatov V.A., Vil'danov K.Ia. *Tortsevye asinkhronnye elektrodvigateli integral'nogo izgotovleniia* [Axial field induction integrated manufacturing motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 304 p. (Rus).
- 5. Stavinskii A.A., Zabora I.G. Improvement of equipment diving systems based on special designs of electromechanical devices. *Problemi avtomatiki ta elektroobladnannia transportnikh zasobiv: Materiali Vseukraïns'koï nauk.-tekhn. konf. z mizhnarodnoiu uchastiu* [Abstracts of Int. Sci.-Pract. Conf. «Problems of the automatics and the electrical equipment of vehicles»]. Mykolaiv, NUS, 2006, pp. 194-202. (Rus).
- 6. Stavinskii A.A., Grigorenko G.G. Determination of the active parts diameter of axial electrical machines with considering unilateral magnetic attraction forces. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie. Resp. mezhved. nauch.-tekhn. sbornik Electrical machine-building and electrical equipment. Republican interdepartmental scientific-technical collection*, 1979, vol.28, pp. 80-85. (Rus).
- 7. Ignatov V.A., Stavinskii A.A., Zabora I.G. Investigation of the distribution of the magnetic field in the active volume of axial electrical machines with the wound magnetic core. *Elektrotekhnika Electrical Engineering*, 1983, no.8, pp. 27-30. (Rus).
- **8.** Ignatov V.A., Zabora I.G., Stavinskii A.A. Using the active volume and the calculation of the magnetizing current of axial induction machines. *Electrichestvo Electricity*, 1983, no.8, pp. 68-70. (Rus).
- 9. Ignatov V.A., Stavinskii A.A. Dependence of technical and economic indications of axial induction motors on the ratio of the active parts diameter. *Electrichestvo Electricity*, 1984, no.6, pp. 28-34. (Rus).
- 10. Stavinskii A.A. *Elektricheskaia tortsevaia mashina* [Axial field electrical machine]. Inventor's certificate of USSR, no.669454, 1979. (Rus).
- 11. Stavinskii A.A. Stator tortsevoi elektricheskoi mashiny [Stator of the axial field electrical machine]. Inventor's certificate of USSR, no.788275, 1980. (Rus).
- 12. Stavinskii A.A. *Elektricheskaia tortsevaia mashina* [Axial field electrical machine]. Inventor's certificate of USSR, no.936225, 1982. (Rus).
- 13. Pashkov N.I. Axial induction motors of the low power and the less material and the labor input of manufacturing. *Elektrotekhnika Electrical Engineering*, 2007, no.7, pp. 8-16. (Rus).
- 14. Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Application of a relative technical level index method to induction motor optimization problems. *Elektrotekhnika i elektromekhanika Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 37-44. (Rus).

15. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeeva E.A. Optimizational comparative analysis of structures static electromagnetic systems P.1 Variants and method of estimate transformations. *Electrichestvo – Electricity*, 2014, no.9, pp. 34-43. (Rus).

16. Dombrovskii V.V., Zaichik V.M. *Asinkhronnye mashiny:* teoriia, raschet, elementy proektirovaniia [Asynchronous machines: theory, calculation, design elements]. Leningrad, Energoatomizdat. Publ., 1990. 368 p. (Rus).

Поступила (received) 21.01.2015

Ставинский Андрей Андреевич¹, д.т.н., проф., Пальчиков Олег Олегович¹, аспирант, ¹ Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, 54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, тел/phone +38 0512 399453, e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

A.A. Stavinskii¹, O.O. Palchykov¹

¹ Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9, Geroyev Stalingrada Ave., Mykolaiv, 54025, Ukraine.

Comparative analysis of weight and cost indications of induction motors with cylindrical and axial air gaps.

Purpose. To find the analytical expressions of determining the optimum geometric dimensions by criteria of the weight minimum and the cost minimum of axial field squirrel-cage induction motors and to compare traditional and axial field motors. Methodology. We have applied the adapted method of the relative indications of the technical level with relative controlled variables. We have used the approximation of the experimental dependence of the distribution of the induction in the air gap and the integral averaging of the electromagnetic characteristics. Results. We have developed the mathematical model for determining the optimum geometric dimensions by criteria of the weight minimum and the cost minimum of the active part of axial field squirrel-cage induction motors taking into account the radial distribution of the induction in the air gap and teeth. We have considered the comparative analysis of the indications of the weight and the cost of traditional and axial designs of electromagnetic equivalent motors. Originality. For the first time we have created the relative units mathematical model of the weight and the cost of the active part of axial field squirrelcage induction motors with the uneven distribution of the magnetic flux in the core and investigated the effect of the geometric relationships on the materials consumption and cost of axial field motors. Practical value. Based on the superior parametric compatibility and the high material savings of axial motors the expediency of replacing traditional induction motors to axial field induction motors has been proved in the special transport drives. Also obtained by simulation optimal geometric relationships of the magnetic circuit can be used in the manufacture and design of axial motors by criteria of the weight minimum and the cost minimum. References 16, tables 2, figures 6.

Key words: indications of the technical level, optimum geometric dimensions, traditional and axial field motors.

О.О. Сьомка, В.В. Прус

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ ДІАГНОСТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА НАДІЙНІСТЬ

Розроблено структуру діагностичного комплексу для випробувань електричних машин на надійність, що забезпечує необхідні режими роботи при варіюванні температурних і вібраційних факторів. Запропонований комплекс є уніфікованим та дозволяє враховувати дійсний стан досліджуваної машини, а режими випробувань не порушують фізику процесів старіння і зношування конструктивних вузлів та матеріалів. Бібл. 6, рис. 5. Ключові слова: електрична машина, надійність, температура, вібраційні фактори.

Разработана структура диагностического комплекса для испытаний электрических машин на надежность, обеспечивающего необходимые режимы роботы при варьировании температурных и вибрационных факторов. Предложенный комплекс является унифицированным и позволяет учитывать действительное состояние исследуемой машины, а режимы испытаний не нарушают физики процессов старения и износа конструктивных узлов и материалов. Библ. 6, рис. 5. Ключевые слова: электрическая машина, надежность, температура, вибрационные факторы.

Вступ. Прогнозування стану електричних машин під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації повинно бути невід'ємною частиною технологічного процесу. Впровадження систем такого прогнозування на підприємствах промислово-енергетичного комплексу, залізничного й морського транспорту, ремонтних заводах і т. ін. значною мірою підвищує показники надійності та ефективності використання обладнання.

Невід'ємною складовою процесу прогнозування стану машин є їх випробовування на надійність. Особливість таких випробувань полягає у розробці структурної схеми надійності, виявленні основних експлуатаційних факторів, що впливають на надійність роботи електричних машин та кількісній оцінці цих факторів. Як правило до такої схеми входять конструктивні вузли та елементи машин, що формують основні потоки відмов.

Таким чином, для проведення випробувань електричних машин на надійність необхідне обладнання, яке відповідало б вимогам щодо можливості форсування експлуатаційних факторів та не порушувало б фізику процесів старіння та зношування матеріалів конструкції при урахуванні дійсного стану машини. Під час проведення випробувань на діагностичному комплексі повинні бути враховані критерії та вимоги ГОСТів щодо відповідних випробувань, на які розраховано діагностовані машини. Так, наприклад, при випробуваннях на вібрацію нормується розташування точок вимірювання вібропараметрів, оцінюваний параметр та його межевий рівень за встановленими напрямами (ГОСТ 20815-93). Оцінка теплового стану виконується згідно ГОСТ 11828-86 та ГОСТ 8865-93, що задають умови оцінки нагрівостійкості машини та її ізоляції. У відповідності до стандартів, випробування електричних машин необхідно проводити по можливості безпосередньо у їх номінальних режимах (S1-S8), а при наявності декількох номінальних режимів - у тому з них, при якому перевищення температури ϵ завідомо більшим. Фактично для 70 % електричних машин основним робочим режимом є S1, для якого, у відповідності до ГОСТ 28173-89, є характерною робота машини при незмінному навантаженні тривалий час при досягненні незмінної температури всіх її частин.

Через складність необхідного форсування та неуніфікованість обладнання для випробувань двигунів різних типів та виробників на сьогодні фактично відсутні узагальнені схеми випробувальних систем.

Аналіз результатів попередніх досліджень. Існують окремі результати розробки універсальних діагностичних комплексів для проведення випробувань електричних машин [1, 2]. Діагностичний комплекс, наведений у [1], забезпечує послідовну роботу одного із випробуваних електродвигунів (АД, СД, ДПС) у режимах короткого замикання, неробочого ходу та вільного вибігу. Контрольовані параметри реєструються блоком вимірювання величин, що містить датчики напруги, струму і швидкості, поєднані з аналогоцифровим перетворювачем. Керування режимами вимірювання здійснюється програмно за допомогою ЕОМ та допоміжних контролерів. Комп'ютеризований комплекс для післяремонтних випробувань електричних машин, побудований згідно з [2], являє собою сукупність вимірювальних датчиків струму, напруги, вібрації та температури, інформація з яких надходить через багатоканальний вимірювально-керуючий модуль та оброблюється ЕОМ. Для завдання режимів випробувань до складу комплексу входять основні типи керованих перетворювачів для електричних машин постійного та змінного струму. Запропонована структура комп'ютеризованого комплексу дозволяє оцінювати та прогнозувати зміну паспортних даних, робочих параметрів та характеристик електричних машин, обумовлену зміною властивостей конструктивних вузлів внаслідок тривалої експлуатації та ремонту. До недоліків наведених рішень слід віднести:

- неможливість урахування дійсного стану основних конструктивних вузлів;
- неможливість прямого урахування показників надійності через відсутність устаткування для форсування основних факторів впливу;
- неможливість безпосередньої оцінки параметрів вібрації та температури через відсутність відповідного вимірювального обладнання;
- неможливість керування рівнем вібрації електричних машин через відсутність відповідного устаткування;
- неможливість зміни параметрів охолоджуючого середовища з причини відсутності засобів формування теплового потоку заданої направленості та інтенсивності.

Також існує ряд робіт, що доводять суттєву зміну теплових та вібраційних параметрів електричних машин при тривалому напрацюванні на відмову та у процесі ремонту [3, 4]. Зокрема, у роботі [3] показано

© О.О. Сьомка, В.В. Прус

високу інформативність діагностичних вібраційних параметрів електричних машин при контролі їх технічного стану в умовах експлуатації. У роботі [4] доведено, що зміна властивостей осердь електротехнічної сталі суттєво впливає на температуру обмотки статора.

З вище сказаного **метою роботи** є розробка діагностичного комплексу, який відповідав би критеріям та вимогам під час проведення випробувань, забезпечував реалізацію основних режимів роботи електричних машин та виконання поставлених задач, необхідних у процесі їх прискорених випробувань на надійність.

Матеріали досліджень. Визначення та прогнозування показників надійності електричних машин передбачає етапи, що пояснюються рис. 1 [5].



Рис. 1. Алгоритм визначення та прогнозування показників надійності електричних машин

Для визначення та прогнозування показників надійності електричних машин у відповідності зі статистичними даними ремонтних підприємств двигуни змінного та постійного струму умовно розбиваються на вузли, що мають найбільшу ймовірність виходу з ладу: обмотка рухомої та нерухомої частин, підшипниковий вузол, колекторно-щітковий вузол для двигунів постійного струму, контактні кільця для синхронних генераторів та асинхронних двигунів з фазним ротором, шихтоване осердя, вал обертової частини, корпус електричної машини.

Проводиться попереднє оцінювання стану кожного конструктивного вузла, що включає в себе виявлен-

ня явних несправностей та відхилень технічних та геометричних параметрів: обмотка перевіряється на цілісність ізоляції та наявність короткозамкнених витків; підшипниковий вузол — на стан підшипника та зношуваність підшипникових щитів, рівень та стан масла; колекторно-щітковий вузол та контактні кільця — на стан контактних елементів; шихтоване осердя — на наявність коротких замикань між окремими листами та ослаблення пресування; вал обертової частини — на наявність різних видів ексцентриситету; корпус машини — на цілісність місць кріплення (лап або фланців) та додаткового оребрення, стан запресування осердя.

Визначаються контрольовані параметри для основних вузлів досліджуваної електричної машини: для обмотки це температура лобових частин θ_l ; для підшипникового вузла — температура підшипника θ_p та віброшвидкість ν_p ; для валу — величина прогину δ_r ; для корпусу — температура θ_k та віброшвидкість ν_k ; для колекторно-щіткових вузлів та контактних кілець — ступінь іскріння n_{sch} .

Кількісними характеристиками надійності для обмоток ротора й статора, щіток та підшипників є ймовірності безвідмовної роботи P(t) і відмови Q(t), частота a(t) та інтенсивність відмов $\lambda(t)$. До кількісних характеристик колекторно-щіткових вузлів, пускорегулюючої апаратури, валу роторів відносять параметр потоку відмов $\omega(t)$, середнє напрацювання до першої відмові T_{av} та напрацювання на відмову Σt_i .

Особливістю визначення контрольованих параметрів ϵ зняття складових вібрації у режимі неробочого ходу та після від'єднання досліджуваної електричної машини від джерела живлення з метою виділення її електромагнітної складової. Ступінь іскріння та прогин валу фіксуються фототехнікою. Локальне визначення температури конструктивних вузлів забезпечується відповідним розміщенням термодатчиків.

Як найбільш ефективні фактори форсування, що впливають на надійність конструктивних вузлів, використовуються тепловий і механічний вплив (середня температура охолоджуючого потоку $\Delta\theta_0$, яка комплексно характеризує основні джерела нагріву; віброшвидкість ν ; корисне навантаження на валу P_2).

На практиці на різних етапах розвитку дефектів використовують шість основних вібраційних методів дослідження рівня пошкодження вузлів те елементів електричної машини (СКЗ віброшвидкості; аналіз спектру вібросигналу; метод ПІК-фактору; аналіз спектру огинаючої вібросигналу; метод ударних імпульсів; спектральний метод ударних імпульсів), що мають свої переваги та недоліки, ступінь достовірності та можливість застосування за заданих умов. Визначальним фактором при виборі методу діагностування є вірогідність отримуваних результатів, можливість визначення зароджуваних дефектів та оцінка поточного стану. Так, для діагностування технічного стану підшипника найбільш інформативним способом є застосування методу ударних імпульсів у комплексі зі спектральним аналізом.

Зазвичай випробування проводяться циклічно, із повторюваними циклами відповідно до плану проведення повного факторного експерименту (у більшості випадків трифакторного типу 2^3).

Залежно від періоду експлуатації електричної машини для розрахунку показників надійності використовується один із основних законів розподілу.

Узагальнені математичні моделі для розрахунку показників надійності електричних машин будуються з урахуванням факторів, що впливають на надійність конструктивних вузлів з наступним об'єднанням отриманих для них залежностей на основі узагальнюючого співвідношення [6]:

$$P_p(t) = \prod_i P_i(t),$$

де $P_i(t)$ — ймовірності безвідмовної роботи основних конструктивних вузлів.

Розроблений пристрій для прискорених випробувань та визначення показників надійності електричних машин дозволяє отримати їх кількісні значення шляхом вимірювання температури доступних конструктивних вузлів, таких як підшипниковий вузол та обмотка статора, а також струмового навантаження і вібрації. Підвищена функціональність пристрою досягається за рахунок контрольованого форсування випробувань шляхом завдання та відпрацювання режимів роботи випробуваних електричних машин при заданих теплових та вібраційних впливах. Структурна схема комп'ютеризованого діагностичного комплексу для випробувань електричних машин на надійність наведена на рис.2.

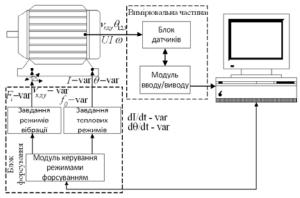


Рис. 2. Структурна схема комп'ютеризованого діагностичного комплексу

Блок форсування при прискорених випробуваннях електричних машин на надійність дозволяє контролювати та змінювати фактори форсування основних конструктивних вузлів, що призводить до зменшення часу випробувань. Структурна схема блоку для завдання факторів впливу представлена на рис. З та містить наступні елементи: 1 — кроковий двигун; 2 — пружина з нерегульованим коефіцієнтом жорсткості; 3 — електромагніт; 4 — каркас установки; 5 — кришка столу; 6 — «охоронний циліндр»; 7 — досліджувана машина; 8 — гнучка гофра; 9 — каркас технічного фену; 10 — технічний фен.

Принцип роботи блоку полягає у завданні температури навколишнього середовища, що забезпечується завдяки подачі технічним феном 10 повітряного потоку високої температури через гнучку гофру 8 усередину «охоронного циліндру» 10. Завдання необхідного рівня вібрації реалізується використанням електромагнітів 3, крокових двигунів 1 (для зміни кута нахилу кришки столу) та пружин з нерегульованим коефіцієнтом жорсткості 2.

Блок АЦП має 16 диференціальних каналів аналогового вводу, до яких через інтерфейсні схеми (IC 1-5) можуть бути підключені датчики для вимірювання основних параметрів: змінного струму (ДС), змін-

ної напруги (ДН), вібрації (ДВ). Управління характеристиками ІС здійснюється через канали дискретного вводу/виводу (ДВВ). Окремо до ПЕОМ через перетворювач інтерфейсів (ПІ) підключено датчики температури (ДТ) та надходять сигнали від датчика частоти обертання (ДЧО).

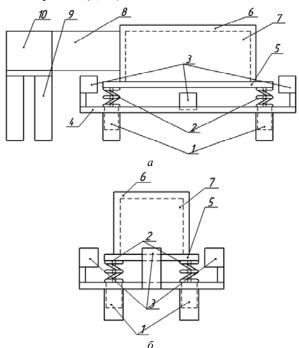


Рис. 3. Зовнішній вид блоку форсування: a – фронтальна проекція ; δ – профільна проекція

Вимірювальна частина комплексу, структуру якої представлено на рис. 4, побудована на базі сертифікованого вимірювального модуля LCard E14-440, що містить аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і канали ДВВ та підключається до персональної ЕОМ (ПЕОМ).

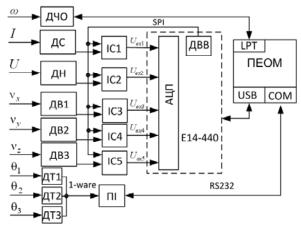


Рис. 4. Структура вимірювального комплексу

Запропонована схема розташування датчиків температури та вібрації (рис. 5) дозволяє підвищити точність вимірювання параметрів за рахунок визначення просторового вектора вібрації та локальних температур конструктивних вузлів. Схема містить наступні позначення: 1 — датчик температури підшипика; 2 — датчик температури навколишнього середовища; 3 — датчик радіальної складової вібрації по осі «у»; 4 — датчик осьової складової вібрації по осі «х»; 5 — датчик радіальної складової вібрації по осі «х»; 5 — датчик радіальної складової вібрації по осі

«z»; 6 – датчик температури обмотки статора; 7 – датчик температури корпусу машини.

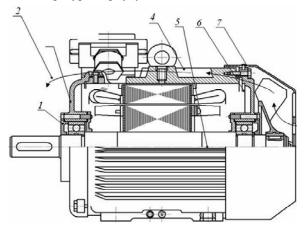


Рис. 5. Схема розміщення датчиків температури та вібрації

Висновки. У результаті досліджень обгрунтовано структуру комп'ютеризованого комплексу для випробувань електричних машин на надійність, що дозволяє, з урахуванням їх дійсного стану, у реальному часі змінювати температурний та вібраційний вплив на електричну машину, не порушуючи фізику процесів старіння та зношування матеріалів її конструктивних вузлів та елементів. Зазначене дає можливість суттєво скоротити час, який витрачається на проведення випробовувань на надійність електричних машин, і підвищити вірогідність отримуваних даних у результаті їх проведення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- *I.* Закладний О.М., Закладний О.О. Універсальний діагностувальний комплекс для прискорених випробувань електродвигунів // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. 2007. №4. С. 35-39.
- 2. Прус В.В., Колотило І.А., Угаров А.В. Комп'ютеризований комплекс для післяремонтних випробувань асинхронних двигунів зі зміною властивостей пакетів сталі статорів // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. 2005. №3(32). С. 184-186.
- політехнічного університету. 2005. №3(32). С. 184-186. 3. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: Методические указания. – Санкт-Петербург: Северо-Западный учебный центр, 2006. – 36 с.
- 4. Прус В.В., Загирняк М.В., Колотило И.А. Определение максимума температуры обмотки статора отремонтированных асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. 2008. №3(50), ч.2. С. 68-72.
- 5. Пат. 88527 U Україна. МПК G01R 31/34 (2006.1). Спосіб визначення та прогнозування показників надійності електричних машин / О.О. Сьомка, В.В. Прус, №05385631; Заявлено 12.08.2013; Опубл. 25.03.2014. Бюл. №6. 4 с.
- 6. Сёмка А.А. Разработка модели надежности, учитывающей изменение состояния конструктивных узлов электрической машины // Зб. наук. праць X Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. Кременчук. 28-29 березня 2012. С. 358-359.

REFERENCES

- I. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. Universal diagnostic complex for electric motors rapid test. Informatsiinyi zbirnyk «Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika» Promelektro Informational collected papers «Promyslova electroenergetyka ta elektrotekhnyka» Promelektro, 2007, no.4, pp. 35-39. (Ukr).
- 2. Prus V.V., Kolotylo I.A., Ugarov A.V. Computer-aided complex for post-repair test of induction motors with change of proper-

- ties of stator cores. Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University, 2005, no.3(32), pp. 184-186. (Ukr).
- 3. Barkov A.V., Barkova N.A., Borisov A.A. *Vibracionnaja diagnostika jelektricheskih mashin v ustanovivshihsja rezhimah raboty: metodicheskie ukazanija* [Vibration diagnostics of electric machines in steady states of operation: manual]. St. Petersburg, North-West training center Publ., 2006. 36 p. (Rus).
- 4. Prus V.V., Zagirnyak M.V., Kolotylo I.A. Determination of the maximum temperature of stator winding of repaired induction motors. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University*, 2008, no.3(50), part 2, pp. 68-72. (Rus).
- 5. Somka O.O., Prus V.V. Sposib vyznachennia ta prohnozuvannia pokaznykiv nadiinosti elektrychnykh mashyn [Method of determination and forecasting of the indices of electric machines reliability]. Patent UA, no.88527, 2014. (Ukr).
- 6. Somka O.O. Development of reliability model taking into account the change of the state of electric machine structural units. *Zbirnyk naukovykh prats X Mizhn. nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i spetsialistiv* [Conf. proceedings of the 10th Int. conf. of students and young researches]. Kremenchuk, 2012, pp. 358-359. (Rus).

Надійшла (received) 30.01.2015

Сьомка Олександр Олександрович¹, аспірант, Прус В'ячеслав В'ячеславович¹, к.т.н., доц., ¹ Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 39600, Кременчук, вул. Першотравнева, 20, тел/phone +38 0536 743245, e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

O.O. Somka¹, V.V. Prus¹

¹ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine. A computerized diagnostic complex for reliability testing of electric machines.

Purpose. To develop a diagnostic complex meeting the criteria and requirements for carrying out accelerated reliability test and realizing the basic modes of electric machines operation and performance of the posed problems necessary in the process of such test. Methodology. To determine and forecast the indices of electric machines reliability in accordance with the statistic data of repair plants we have conditionally divided them into structural parts that are most likely to fail. We have preliminarily assessed the state of each of these parts, which includes revelation of faults and deviations of technical and geometric parameters. We have determined the analyzed electric machine controlled parameters used for assessment of quantitative characteristics of reliability of these parts and electric machines on the whole. Results. As a result of the research, we have substantiated the structure of a computerized complex for electric machines reliability test. It allows us to change thermal and vibration actions without violation of the physics of the processes of aging and wearing of the basic structural parts and elements material. The above mentioned makes it possible to considerably reduce time spent on carrying out electric machines reliability tests and improve trustworthiness of the data obtained as a result of their performance. Originality. A special feature of determination of the controlled parameters consists in removal of vibration components in the idle mode and after disconnection of the analyzed electric machine from the power supply with the aim of singling out the vibration electromagnetic component, fixing the degree of sparking and bend of the shaft by means of phototechnique and local determination of structural parts temperature provided by corresponding location of thermal sensors. Practical value. We have offered a scheme of location of thermal and vibration sensors, which allows improvement of parameters measuring accuracy due to determination of the spatial vector of vibration and local temperatures of structural parts. References 6, figures 5.

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

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК И ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ

Розроблені комп'ютерні моделі лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів коаксіальної конфігурації з феромагнітним осердям. Виконано вибір параметрів індукційно-динамічного, електродинамічного та електромеханічного перетворювачів, що забезпечують максимальні ударні навантаження та швидкості. Проведений порівняльний аналіз ефективності зазначених перетворювачів за допомогою інтегрального показника. Показано, що індукційно-динамічний перетворювач не є найкращим ні за якою стратегією вибору. Електромагнітний перетворювач є найбільш ефективнішим для силової дії, а електродинамічний перетворювач — для забезпечення найбільшої швидкості. Бібл. 26, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, індукційно-динамічний, електродинамічний, електромагнітний перетворювачі, синтез параметрів, інтегральний показник ефективності.

Разработаны компьютерные модели линейных импульсных электромеханических преобразователей коаксиальной конфигурации с ферромагнитным сердечником. Проведен выбор параметров индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного преобразователей, обеспечивающих максимальные ударные нагрузки и скорости. Проведен сравнительный анализ эффективности данных преобразователей с помощью интегрального показателя. Показано, что индукционно-динамический преобразователь не является лучшим ни по одной из стратегий выбора. Электромагнитный преобразователь является наиболее эффективным для силового воздействия, а электродинамический преобразователь – для обеспечения наибольшей скорости. Библ. 26, табл. 3, рис. 9.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, индукционно-динамический, электродинамический, электромагнитный преобразователи, синтез параметров, интегральный показатель эффективности.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) применяются для создания значительных ударных нагрузок и высокоскоростного разгона исполнительных элементов (ИЭ) на коротком активном участке во многих областях науки и техники [1]. Так, в строительстве применяются различные электромагнитные молоты и перфораторы для разрушения монолитно-бетонных оснований, устройства для погружения свай и анкеров [2, 3]. В горнодобывающей промышленности используются бутобои различной мощности, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке - сейсмоисточники различной мощности и возмущающей силы; в машиностроении - молоты с большим диапазоном энергии удара и т.п. [4, 5]. Для авиационной, ракетнокосмической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители массивных объектов [6, 7]. ЛИЭП используются для ударноконденсаторной сварки, импульсной штамповки, клепально-сборочных работ, для электродинамической сепарации и измельчения порошков, для магнитно-импульсного уплотнения порошков входящих в композитные составы и др. [8-10]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научнотехнологические пусковые установки [11, 12]. Высокоскоростные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в защитных электрических аппаратах, в топливной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и т.д. [13-15]. ЛИЭП применяются для очистки вагонов, трюмов, фильтров и иных емкостей от остатков продуктов и налипших материалов, в противообледенительных системах самолетов, ЛЭП и иных ответственных объектов [16, 17]. Перспективными

сферами использования ЛИЭП являются устройства дополнительного ускорения подвижных объектов, защита помещений и ответственных объектов от нежелательного в них проникновения, уничтожение информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе, баллистическая гравиметрия и др. [18-21].

ЛИЭП обеспечивают непосредственное преобразование энергии импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в кинетическую энергию с линейным перемещением ИЭ. При этом можно выделить силовые ЛИЭП, которые предназначены для создания значительных ударных нагрузок, и скоростные ЛИЭП, которые предназначены для создания высоких скоростей ИЭ. ЛИЭП существенно отличаются от традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия и характеризуются [1]:

- импульсным, возвратно-поступательным циклическим или однократным режимом работы;
- прерывистым характером преобразования энергии за счет наличия холостого или обратного хода и длительной паузы в течение рабочего цикла;
- относительно большой продолжительностью накопления энергии от импульсного источника по отношению к длительности рабочего периода;
 - импульсным режимом возбуждения индуктора;
- интенсивными электромагнитными нагрузками во время рабочего периода, значительно превышающими аналогичные показатели электродвигателей с продолжительным режимом работы.

Наиболее эффективными типами ЛИЭП, предназначенными для создания ударных нагрузок и высоких скоростей, являются индукционно-динамические (ИДП), электродинамические (ЭДП) и электромаг-

© В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

нитные (ЭМП) преобразователи [22]. Во всех указанных типах ЛИЭП осуществляется кратковременное возбуждение неподвижного индуктора от импульсного источника. Возникающее при этом магнитное поле индуктора обуславливает электродинамические или электромагнитные силы, приводящие к линейному перемещению якоря с ИЭ.

Рассматриваемые типы ЛИЭП, как правило, имеют коаксиальную конфигурацию и в основном отличаются строением подвижного якоря. В ИДП якорь представляет собой электропроводящий, как правило, массивный медный диск, в котором индуцируются вихревые токи от магнитного поля индуктора, вследствие чего между якорем и индуктором возникает электродинамическая сила отталкивания. В ЭДП якорь представляет собой подвижную многовитковую обмотку, которая электрически связана с индуктором, вследствие чего между ними в зависимости от направления их намотки возникает электродинамическая сила отталкивания или притяжения. В ЭМП якорь представляет собой ферромагнитный элемент, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора.

В ИДП и ЭДП якорь перемещается от индуктора до соударения с упором, ограничивающим его рабочий ход. В ЭМП величина рабочего хода якоря задается путем исходного удаления его в аксиальном направлении на заданное расстояние от индуктора. Индукторы рассматриваемых типов преобразователей и якорь ЭДП выполнены, как правило, в виде монолитных многовитковых плотно уложенных медных обмоток, пропитанных эпоксидным компаундом.

Учитывая значительный уровень импульсных магнитных полей, возбуждаемых индуктором, в рассматриваемых типах ЛИЭП целесообразно использовать ферромагнитный сердечник (ФС), охватывающий индуктор [23]. Для эффективной работы данный ФС должен обладать минимальной электропроводностью для вихревых токов, что реализуется выполнением его, например из магнитодиэлектрика. Такой ФС способен сконцентрировать магнитное поле в активной зоне между индуктором и якорем и существенно уменьшить поле рассеяния, что важно с точки зрения электромагнитной совместимости и экологической чистоты ЛИЭП.

В качестве импульсного источника целесообразно использовать ЕНЭ с электронной схемой, формирующей апериодический импульс тока в индукторе (индуктор шунтирован обратным диодом), что позволяет применять электролитические конденсаторы с высокими удельными параметрами.

Целью статьи является оценка эффективности ИДП, ЭДП и ЭМП, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей, при возбуждении апериодическим импульсом тока от ЕНЭ и наличии ФС.

Математическая модель ЛИЭП. Для исследования рабочих процессов и показателей рассматриваемых типов ЛИЭП разработаны компьютерные 2D модели в программном пакете COMSOL Multiphysics 4.4, в основу которого заложен метод конечных элементов. Электромагнитные процессы ЛИЭП описы-

ваются дифференциальным уравнением в цилиндрической системе координат (rz) при помощи векторного магнитного потенциала $\overline{A} = (\overline{A}_r, \overline{A}_z)$:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \overline{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \overline{H} - \sigma \cdot \overline{V} \times \overline{B} = \overline{J}_e, \qquad (1)$$

где σ — электропроводность, адаптивно учитывающая температуры индуктора, якоря или Φ C; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; \overline{V} — скорость перемещения якоря; \overline{J}_e — плотность тока в узле; \overline{B} — индукция магнитного поля $\overline{B} = \nabla \times \overline{A}$; \overline{H} — напряженность магнитного поля.

Ток в индукторе i_1 описывается уравнением:

$$\sigma \frac{\partial \overline{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \left(\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \overline{B} \right) - \sigma \overline{V} \times \overline{B} = \frac{i_1 N_1}{S_1}, \qquad (2)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость; N_1 — число витков индуктора; S_1 — площадь сечения витка индуктора.

Значение аксиальной составляющей силы, действующей на якорь ЛИЭП, определяется посредством тензора натяжения Максвелла T:

$$f_z = 2\pi r \int_{\partial\Omega}^{-} TdS , \qquad (3)$$

где \overline{n} — вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS.

Система уравнений (1-3) содержит начальные условия:

$$\overline{A}_{t=0}(\overline{A}_r, \overline{A}_z) = \overline{A}(0,0), \tag{4}$$

и граничные условия на границе расчетной области:

$$\stackrel{-}{n} \times \stackrel{-}{4} = 0$$
 (5)

Механические процессы ЛИЭП при учете окружающей среды, сил трения и воздействия буферного (возвратного) элемента можно описать уравнением [24]:

$$f_z(t,z) = (m_2 + m_e) \frac{dV}{dt} + K_P \Delta Z(t) + K_T V(t) + + 0.125 \pi \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t),$$
(6)

где m_2 , m_e — масса якоря и ИЭ соответственно; K_P — коэффициент упругости буферного элемента; $\Delta Z(t)$ — перемещение якоря с ИЭ; K_T — коэффициент динамического трения; γ_a — плотность среды перемещения; β_a — коэффициент аэродинамического сопротивления среды, в которой происходит перемещение якоря с ИЭ; D_{ex2} — максимальный диаметр якоря; $f_z(t,z)$ — электродинамические или электромагнитные силы, действующие на якорь со стороны индуктора.

Для определения температур активных элементов (индуктора и электропроводящего якоря) и пассивных элементов (ФС и ферромагнитного якоря) ЛИЭП используются уравнения [25]:

$$c_{n}(T) \cdot \gamma_{n} \frac{\partial T_{n}}{\partial t} = \lambda_{n}(T) \left(\frac{\partial^{2} T_{n}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{n}}{\partial r} + \frac{\partial^{2} T_{n}}{\partial z^{2}} \right) + (7)$$

$$+ j_{n}^{2}(t) \cdot K_{v} \cdot \rho_{n}(T),$$

$$c_{m}(T) \cdot \gamma_{m} \frac{\partial T_{m}}{\partial t} = \lambda_{m}(T) \left(\frac{\partial^{2} T_{m}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{m}}{\partial r} + \frac{\partial^{2} T_{m}}{\partial z^{2}} \right), (8)$$

где n=1, 2 — индексы, относящиеся к индуктору и электропроводящему якорю соответственно; m=3, 4 — индексы, относящиеся к ФС и ферромагнитному якорю соответственно; c(T) — усредненная удельная теплоемкость; γ — усредненная плотность материала; j(t) — плотность тока активного элемента; $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности; K_{ν} — коэффициент заполнения активного элемента; $\rho(T)$ — удельное сопротивление активного элемента.

Система уравнений (7, 8) дополняется граничными условиями на поверхности ξ . На охлаждаемой поверхности используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

$$-\frac{\partial T_{\xi}}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{\xi} - T_0) , \qquad (9)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; n — нормаль к поверхности; T_0 — температура окружающей среды.

На границе контакта активных и пассивных элементов используются граничные условия четвертого рода:

$$T_n(r_{\xi}, z_{\xi}, t) = T_m(r_{\xi}, z_{\xi}, t) ; \lambda_n \frac{\partial T_{n\xi}}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_{m\xi}}{\partial n} .$$
 (10)

На оси симметрии ЛИЭП используются граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{\varepsilon} = 0. \tag{11}$$

Коэффициент теплопроводности индуктора или якоря ЭДП вдоль соответствующих осей определяется по формуле

$$\lambda_{w} = \frac{\lambda_{p} \lambda_{i} \lambda_{k} \left(h_{p} + 2h_{i} + h_{k} \right)}{h_{p} \lambda_{i} \lambda_{k} + 2h_{i} \lambda_{p} \lambda_{k} + h_{k} \lambda_{p} \lambda_{k}}, \tag{12}$$

где λ_p , λ_i , λ_k — коэффициенты теплопроводности проводника, изоляции и эпоксидного компаунда, соответственно; h_p , h_i , h_k — толщина проводника, изоляции и компаунда в выбранном направлении соответственно.

Решения системы уравнений (1-12) производится методом BDF (backward differentiation formula) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO. На рис. 1 показана компьютерная геометрическая модель ИДП.

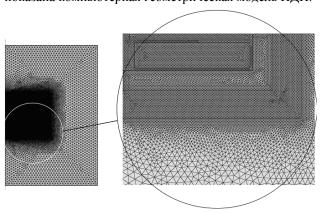


Рис. 1. Компьютерная геометрическая модель ИДП

Постановка задачи параметрического синтеза ИДП, ЭДП и ЭМП. Рассмотрим задачу параметрического синтеза высокоэффективных силовых и скорост-

ных ИДП, ЭДП и ЭМП путем выбора их параметров. Указанные типы ЛИЭП обеспечивают максимальную ударную нагрузку (индекс F) и максимальную скорость (индекс V). Исходя из этого введем соответствующие обозначения, например, ИДП-F — силовой индукционно-динамический преобразователь, обеспечивающий максимальный импульс силы, или ЭДП-V — скоростной электродинамический преобразователь, обеспечивающий максимальную скорость.

Основными параметрами ЛИЭП являются следующие:

Геометрические параметры индуктора

Внешний диаметр D_{ex1} , внутренний диаметр D_{in1} и высота H_1 . Площадь сечения медной шины $S_1=a_1\cdot b_1$, количество витков N_1 и коэффициент заполнения $K_v=0.88$. Толщина изоляционной прокладки £.

Геометрические параметры якоря

Внешний диаметр D_{ex2} , внутренний диаметр D_{in2} и высота H_2 . Площадь сечения меди для ИДП или медной шины для ЭДП S_2 = $a_2 \cdot b_2$. Количество витков N_2 и коэффициент заполнения K_v =0,88 для ЭДП.

<u>Геометрические параметры ΦC </u> (рис. 2)

Высота дискового основания H_{3a} , обечайки H_{3b} и внутреннего цилиндра H_{3c} . Внешний D_{ex3a} и внутренний D_{in3a} диаметры основания. Внешний D_{ex3b} и внутренний D_{in3b} диаметры наружной обечайки. Внешний D_{ex3c} и внутренний D_{in3c} диаметры внутреннего цилиндра. ФС выполнен из магнитодиэлектрика с магнитными свойствами стали Ct.10.

Массогабаритные параметры

Исходное расстояние между индуктором и якорем δ . Рабочий ход якоря с ИЭ ΔZ (для ЭМП $\delta = \Delta Z$). Масса преобразователя m, якоря m_2 , ИЭ m_e и меди активных элементов m_{cu} . Габаритные диаметр D_{ex} и высота H_{ex} .

<u>Параметры ЕНЭ</u>

Емкость C и зарядное напряжение U_0 .

Для параметрического синтеза высокоэффективных ЛИЭП используем постоянные, зависимые и варьируемые параметры при учете заданных ограничений и постоянстве габаритного объема преобразователя $0.25\pi D_{ex}^2 H_{ex} = 2.64 \cdot 10^{-4} \,\mathrm{m}^3$ [26].

Постоянные параметры

 ΔZ =10 мм; δ =1,0 мм (ИДП и ЭДП), δ =10 мм (ЭМП); m_e =0,5 кг; C=2850 мкФ; U_0 =400 В; K_v =0,88; £=1 мм.

Зависимые параметры

$$N_{1} = \begin{bmatrix} 0.5(D_{ex1} - D_{in1})H_{1}K_{v}a_{1}^{-1}b_{1}^{-1} \end{bmatrix};$$

$$N_{2} = \begin{bmatrix} 0.5(D_{ex2} - D_{in2})H_{2}K_{v}a_{2}^{-1}b_{2}^{-1} \end{bmatrix};$$

 $\begin{array}{l} D_{in3b} = D_{ex1} + 2 \pounds; \ D_{ex3a} = D_{in3b}; \ D_{ex3c} = D_{in1} - 2 \pounds; \ D_{ex3c} = D_{in3a}; \\ D_{in2} = D_{ex3c} + 2 \pounds. \end{array}$

Ограничения параметров

$$\begin{split} &D_{ex1} \leq 100 \text{ mm}; \ D_{ex3b} < D_{ex}; \ D_{in1} < D_{ex1}; \ D_{in2} < D_{ex2}; \ D_{ex2} < D_{ex}; \\ &H_1 < H_{ex}; \ H_2 < H_{ex} - (H_1 + \delta + \pounds); \ H_{3a} < H_{ex} - (H_2 + H_1 + \delta + \pounds); \\ &H_{3b} < H_{ex}; \ D_{ex3b} > D_{in3b}; \ H_{3c} < H_{ex} - (H_2 + H_1 \delta + \pounds); \ D_{in3c} < D_{ex3c}. \end{split}$$

Основные показатели

Максимальное значение электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь f_{zm} ; величина импульса силы $F_z = \int f_z dt$; максимальное V_m и усредненное на интервале движения $V_{\rm c}$

значение скорости якоря с ИЭ; КПД ЛИЭП $\eta = (m_2 + m_e)V_m^2C^{-1}U_0^{-2}$; максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} ; усредненное значение магнитного поля рассеяния B^* , определяемое на поверхности 4, расположенной на расстоянии $2H_1$ от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии $4H_1$ от верхней стороны индуктора ИДП (рис. 2).

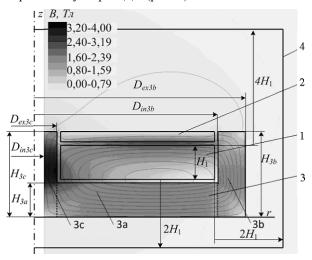


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля в ИДД в момент максимума электродинамической силы: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – Φ C, состоящий из дискового основания 3a, наружной обечайки 3b и внутреннего цилиндра 3c; 4 – поверхность определения усредненного значения магнитного поля рассеяния B^*

Для выбора параметров высокоэффективных ЛИЭП использован метод Монте-Карло. Параметрический синтез ЛИЭП проводим при условии обеспечения максимального силового воздействия (импульс силы F_z максимален) и скорости (скорость V максимальна). Параметры синтезированных ЛИЭП представлены в табл. 1.

Таблица 1

параметры синтезированных лигэп							
		Преобразователи					
Элемент	Параметр	ИДП-F/ ИДП-V	ЭДП-F/ ЭДП-V	ЭМП-F/ ЭМП-V			
	D_{ex1} , мм	100	100	54			
	D_{in1} , мм	10	10	29			
Индуктор	H_1 , mm	10	5	23			
	N_1 , шт.	46	33	322			
	S_1 , mm ²	8,64	3,0	1,0			
	D_{ex2} , мм	100	100	76			
	D_{in2} , мм	10	10	4			
Якорь	H_2 , mm	6/3	5/3	10/6			
	N_2 , шт.	-	33	-			
	S_2 , mm ²	270/135	3,0/1,6	-			
ФС	H_{3a} , мм	8	8	23			
	H_{3b} , мм	24	24	46			
	D_{ex3b} , мм	118	118	76			
	D_{in3a} , мм	0	8	28			
	H_{3c} , MM	-		46			
	D_{in3c} , мм	-		0			
	D_{e х3с, мм	-	28				

Электромеханические характеристики ЛИЭП. На рис. 3-5 представлены электромеханические характеристики синтезированных ИДП, ЭДП и ЭМП, которые при заданных условиях и ограничениях развивают максимальные импульс силы F_z и скорость V_m . Можно отметить следующие особенности полученных преобразователей.

В ИДП в течение рабочего процесса ток в индукторе сохраняет полярность. Но поскольку индуцированный ток в якоре плотностью j_2 через определенное время меняет полярность, то электродинамическая сила отталкивания f_z меняет направление и становится силой притяжения. Однако этот эффект проявляется после прохождения якорем с ИЭ расстояния, равного величине рабочего хода и существенно не влияет на характер скорости V. Заметим, что после прохождения якорем расстояния, равного величине рабочего хода, импульс силы F_z ИДП почти не изменяется, поскольку ток в индукторе практически затухает. Скорость V к концу рабочего хода якоря прекращает свой рост и даже несколько уменьшается в скоростном ИДП-V.

В ЭДП как в индукторе, так и в якоре протекает один и тот же ток, что обуславливает неизменность полярности электродинамической силы отталкивания f_z . Причем после прохождения якорем с ИЭ расстояния, равного величине рабочего хода, в данном преобразователе сохраняется довольно значительный ток. Вследствие этого импульс силы F_z продолжает возрастать, особенно заметно в силовом ЭДП-F. Скорость V к концу рабочего хода якоря существенно замедляет свой рост, принимая максимальное значение в конце рабочего процесса.

Характер электромеханических процессов в ЭМП существенно отличается от характера указанных процессов в ИДП и ЭДП. В этом преобразователе при перемещении ферромагнитного якоря с ИЭ электромагнитная сила притяжения f_z , а соответственно и их скорость V возрастают ускоренно, достигая максимального значения в конце рабочего процесса. После остановки якоря ток в индукторе сохраняет довольно значительную величину. При неподвижном якоре ток в индукторе и электромагнитная сила притяжения f_z плавно затухают, в то время как импульс силы F_z продолжает возрастать до окончательного затухания силы.

Наиболее быстро электромеханические процессы протекают в ИДП, а наиболее медленно — в ЭМП. Наибольшая величина сил f_z , действующих на якорь со стороны индуктора, наблюдается в ИДП, а наименьшая — в ЭМП. Электродинамические силы отталкивания f_z в ИДП и ЭДП примерно одной величины, в то время как электромагнитные силы притяжения f_z в ЭМП в 3-4 раза меньше. Однако из-за различной длительности электромеханических процессов величина импульса силы F_z в ЭМП в 4-5 раз больше, чем в других преобразователях, причем наименьшая величина импульса силы F_z наблюдается в ИДП.

Максимальная скорость якоря с ИЭ V_m развивается в ЭДП, а наименьшая – в ЭМП. При этом в ИДП и ЭДП скорость в начале рабочего процесса резко возрастает, а в ЭМП скорость возрастает к концу рабочего процесса при соударении с индуктором. Вследствие этого средняя скорость V_{cp} в ЭМП в 3-4 раза меньше.

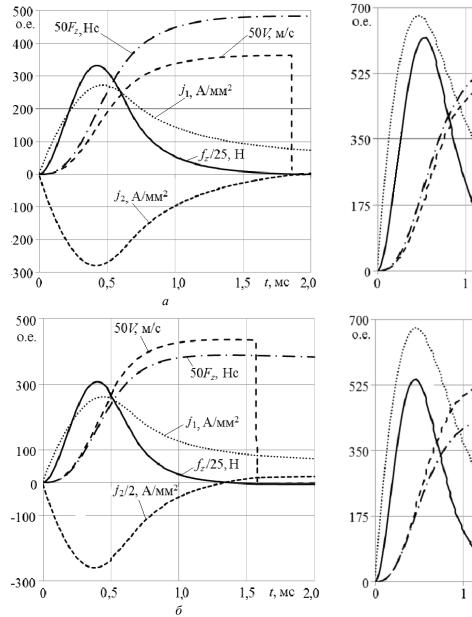


Рис. 3. Электромеханические характеристики ИДП-F (a) и ИДП-V (δ)

Магнитные поля ЛИЭП. При работе ЛИЭП возбуждает сильные магнитные поля, индукция которых превышает индукцию насыщения ферромагнитного сердечника и якоря. В ИДП наибольшее магнитное поле концентрируется в зазоре между индуктором и электропроводящим якорем (рис. 6). При этом на наружной поверхности ФС магнитное поле практически полностью экранировано. Наибольшая величина поля рассеяния наблюдается в области электропроводящего якоря. В силовом ИДП-F поле рассеяния практически на 30 % меньше, чем в скоростном преобразователе ИДП-V.

В ЭДП наибольшее магнитное поле концентрируется между якорем и индуктором, по которым протекает один и тот же ток. При этом частично магнитное поле выходит за поверхность якоря (рис. 7). Уровень полей рассеяния в ЭДП в 2,5-3 раза ниже, чем в ИДП. Причем наименьшее поле рассеяния наблюдается в скоростном преобразователе ЭДП-V.

Рис. 4. Электромеханические характеристики ЭДП-F (a) и ЭДП-V (δ)

50*V*, м/с

 $50F_z$, Hc

50V, m/c

 $f_z/25,H$

t, MC

 $50F_z$, Hc

 $1,5j_1, A/MM^2$

t, MC

В ЭМП максимальное значение индукции магнитного поля возникает во внутреннем цилиндре ФС, который охватывается индуктором (рис. 8). При этом наблюдается значительное поле рассеяния за поверхностью ферромагнитного якоря. Индукция магнитного поля рассеяния в ЭМП примерно такая же, как и в ИДП. При этом наибольшее рассеяние магнитного поля наблюдается в радиальном направлении в области воздушного зазора.

В табл. 2 представлены электромеханические и магнитные показатели ЛИЭП: максимальное значение электродинамической или электромагнитной силы f_{zm} , действующей на якорь, величина импульса силы F_z в конце рабочего процесса, максимальное V_m и среднее V_{cp} значение скорости якоря с ИЭ на участке движения, усредненное значение магнитного поля рассеяния B^* в момент максимума тока в индукторе, максимальное значение плотности тока в индукторе j_{1m} , масса меди индуктора и якоря m_{cu} и КПД преобразователя η .

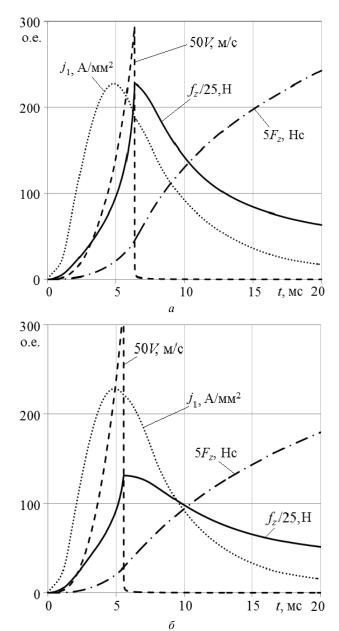
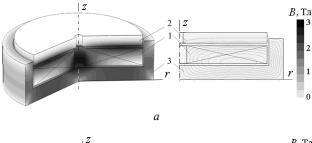


Рис. 5. Электромеханические характеристики ЭМП-F (a) и ЭМП-V (δ)



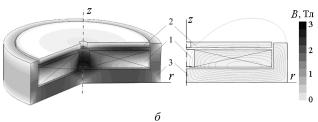


Рис. 6. Распределение магнитных полей в ИДП-F (a) и ИДП-V (δ) в момент максимума тока в индукторе

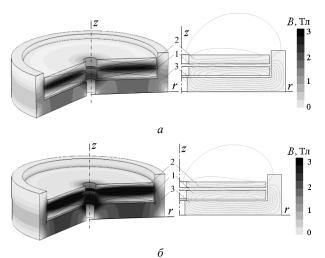
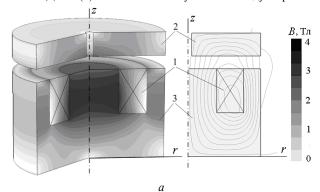


Рис. 7. Распределение магнитных полей в ЭДП-F (a) и ЭДП-V (δ) в момент максимума тока в индукторе



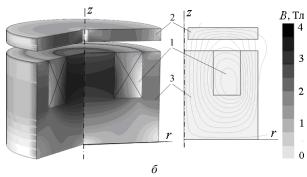


Рис. 8. Распределение магнитных полей в ЭМП-F (a) и ЭМП-V (δ) в момент максимума тока в индукторе

Таблица 2 Электромеханические и полевые показатели ЛИЭП

Показатель	ИДД-Г	идд-V	ЭДД-Г	ЭДД- V	ЭМД-Г	ЭМД-V
f_{zm} , кН	16,62	15,38	15,49	13,53	5,69	3,29
F_z , Hc	9,67	7,68	12,12	9,43	48,51	35,91
V_m , m/c	7,28	8,72	10,32	10,64	6,89	6,42
V_{cp} , M/c	5,38	6,37	6,67	7,41	1,58	1,81
B^* , мТл	41,93	59,03	16,21	13,01	43,61	54,99
j_{1m} , A/mm ²	272,5	261,7	442,5	406,5	227,3	228,7
m_{cu} , кг	1,09	0,89	0,68	0,55	0,39	0,39
η, %	10,6	6,3	8,2	8,5	7,0	5,9

Анализируя представленные разнородные показатели сложно отдать предпочтение тому или иному типу ЛИЭП, поскольку их эффективность определяется рядом разнородных силовых, скоростных, магнитных, массогабаритных и токовых показателей. Исходя из этого, будем оценивать эффективность преобразователя комплексно с учетом выбранной

стратегии, отдающей предпочтение одним показателям и/или игнорировании иных.

Сравнительный анализ ИДП, ЭДП и ЭМП. Эффективность ЛИЭП оценим с помощью интегрального показателя

$$K^* = K_s \left\{ \beta_1 \frac{f_{zm}}{f_{zm0}} + \beta_2 \frac{F_z}{F_{z0}} + \beta_3 \frac{V_m}{V_{m0}} + \beta_4 \frac{V_c}{V_{c0}} + \beta_5 \frac{\eta}{\eta_0} + \beta_6 \frac{B_0^*}{B^*} + \beta_7 \frac{j_{1m0}}{j_{1m}} + \beta_8 \frac{m_{Cu0}}{m_{Cu}} + \beta_9 \frac{D_{ex0}}{D_{ex}} + \beta_{10} \frac{H_{ex0}}{H_{ex}} \right\},$$
(13)

где K_s – коэффициент надежности ЛИЭП; β_1 – весовой коэффициент, учитывающий максимальную электродинамическую силу, действующую на якорь f_{zm} ; β₂ – весовой коэффициент, учитывающий величину импульса силы, действующего на якорь F_z ; β_3 – весовой коэффициент, учитывающий максимальную скорость якоря с ИЭ V_m ; β_4 — весовой коэффициент, учитывающий среднюю скорость якоря на участке перемещения V_c ; β_5 – весовой коэффициент, учитывающий КПД ЛИЭП η ; β_6 – весовой коэффициент, учитывающий поле рассеяния B^* ; β_7 – весовой коэффициент, учитывающий максимальное значение плотности тока в индукторе j_{1m} ; β_8 – весовой коэффициент, учитывающий массу меди в ЛИЭП m_{Cu} ; β_9 – весовой коэффициент, учитывающий габаритный диаметр ЛИЭП D_{ex} ; β_{10} – весовой коэффициент, учитывающий габаритную высоту ЛИЭП H_{ex} .

Указанные показатели нормированы к соответствующим показателям ИДП, значения которого обозначены с дополнительным индексом «0». Все весовые коэффициенты связаны соотношением

$$\sum_{i=1}^{10} \beta_i = 1. \tag{14}$$

Показатели, учитываемые весовыми коэффициентами $\beta_1 - \beta_5$, должны быть максимальными, а показатели, учитываемые весовыми коэффициентами $\beta_6 - \beta_{10}$ — минимальными. В таком случае, наиболее эффективным типом ЛИЭП будет тот, у которого интегральный показатель K^* будет максимальным.

На основании экспертных оценок для ИДП выбираем коэффициент надежности $K_s = 1$, для ЭДП – $K_s = 0.8$, для ЭМД – $K_s = 0.9$. Пониженная надежность ЭМП объясняется соударением якоря с индуктором, что негативно влияет на механическое состояние активных элементов и акустическим шумом повышенной интенсивности. Еще более низкая надежность ЭДП объясняется наличием подвижного токосъемного контакта между индуктором и якорем и конструкцией якоря (многовитковый, замоноличеный эпоксидной смолой).

Стратегия выбора типа ЛИЭП определяется значениями весовых коэффициентов, которые задаются на основании экспертных оценок. В табл. 3 представлены значения весовых коэффициентов для вариантов стратегии выбора типа ЛИЭП.

Вариант 1 учитывает равнозначность всех показателей ЛИЭП. Вариант 2 учитывает повышенный (четырехкратный) приоритет максимальной электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь f_{zm} при игнорировании скорости

якоря и массы меди. Вариант 3 учитывает повышенный приоритет величины импульса силы, действующего на якорь F_z , при игнорировании массогабаритных показателей. Вариант 4 учитывает повышенный приоритет максимальной скорости якоря с ИЭ V_m при игнорировании силовых показателей и радиальных габаритов. Вариант 5 учитывает повышенный приоритет средней скорости якоря на участке перемещения V_c при игнорировании силовых показателей и максимальной плотности тока в индукторе. Вариант 6 учитывает повышенный приоритет КПД ЛИЭП η при игнорировании массогабаритных показателей. Вариант 7 учитывает повышенный приоритет поля рассеяния B^* при игнорировании массогабаритных показателей. Вариант 8 учитывает повышенный приоритет максимальной плотности тока в индукторе j_{1m} при игнорировании максимальных значений силы и скорости якоря с ИЭ и высоты ЛИЭП.

Таблица 3 Значения весовых коэффициентов

	эначения всеовых коэффициентов									
		Вариант стратегии выбора								
	1	2	3	4	5	6	7	8		
β_1	0,1	0,4	0,1	0	0	0,1	0,1	0		
β_2	0,1	0,1	0,4	0	0	0,1	0,1	0,1		
β_3	0,1	0	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0		
β_4	0,1	0	0,0	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1		
β_5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1		
β_6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0		
β_7	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,4		
β_8	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,1		
β_9	0,1	0,1	0	0	0,1	0	0	0,1		
β_{10}	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0	0	0,1		

При анализе силовых ЛИЭП, которые предназначены для обеспечения максимального силового воздействия (рис. 9,a) и скоростных ЛИЭП, которые предназначены для обеспечения наибольшей скорости (рис. $9,\delta$) можно сделать следующие выводы.

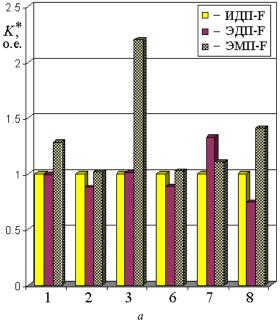
При равнозначности всех показателей как силовых так и скоростных ЛИЭП наиболее эффективным является ЭМП (вариант 1).

Для обеспечения максимальной электродинамической (электромагнитной) силы, действующей на якорь f_{zm} , при игнорировании скорости якоря и массы меди эффективность ЭМП и ИДП примерно одинакова, а эффективность ЭДП примерно на 13 % ниже (вариант 2).

Для обеспечения наибольшей величины импульса силы F_z при игнорировании массогабаритных показателей эффективность ЭМП примерно в 2,2 раза выше, чем у остальных преобразователей (вариант 3).

При приоритете максимальной V_m и средней V_c скорости якоря с ИЭ и игнорировании силовых показателей наиболее эффективным является ЭДП-V, а наименее эффективным — ЭМП-V (варианты 4 и 5). При приоритете КПД η и игнорировании массогабаритных показателей ЛИЭП эффективность ЭМП и ИДП примерно одинакова. При этом эффективность силового ЭДП-F на 11 % ниже, а эффективность скоростного ЭДП-V — на 14 % выше (вариант 6).

При приоритете поля рассеяния B^* и игнорировании массогабаритных показателей наиболее эффективным является ЭДП (вариант 7).



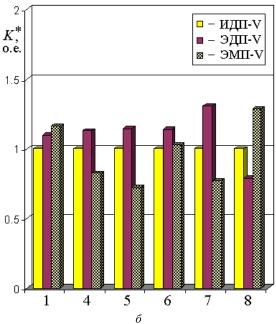


Рис. 9. Значения интегрального показателя эффективности при различных вариантах стратегии выбора типа силовых (a) и скоростных (δ) ЛИЭП

При приоритете максимальной плотности тока в индукторе j_{1m} и игнорировании максимальных значений силы и скорости якоря с ИЭ и высоты наиболее эффективным является ЭМП, а наименее эффективным – ЭДП (вариант 8).

Можно отметить, что ни по одной из стратегий выбора ИДП не является лучшим. Для обеспечения наибольшего силового воздействия наиболее эффективным является силовой ЭМП-F, а для обеспечения наибольшей скорости – скоростной ЭДП-V.

Заключение.

Разработаны компьютерные 2*D* модели ЛИЭП коаксиальной конфигурации с ферромагнитным сердечником в программном пакете *COMSOL Multiphysics* 4.4, учитывающие взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и магнитные поля.

Проведен синтез параметров высокоэффективных ИДП, ЭДП и ЭМП, обеспечивающих максимальные ударные нагрузки и скорости для ИЭ.

Проведен сравнительный анализ эффективности ИДП, ЭДП и ЭМП с помощью интегрального показателя, учитывающего максимальную величину и импульс электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь, максимальную и среднюю скорость якоря, КПД и массогабаритные показатели преобразователя, поле рассеяния, максимальное значение плотности тока в индукторе.

На основании восьми стратегий выбора установлены наиболее эффективные типы силовых и скоростных ЛИЭП. Показано, что ни по одной из стратегий выбора ИДП не является лучшим. Для обеспечения наибольшего силового воздействия наиболее эффективным является ЭМП, а для обеспечения наибольшей скорости — ЭДП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *I.* Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционнодинамические преобразователи. Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 496 с.
- 2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика. 2002. №2. С. 37-43.
- 3. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулированием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. 2003. №2. С. 30-36.
- 4. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. − 2001. №2. С. 28-32.
- 5. Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка. 2001. №2. С. 3-6.
- 6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era // IEEE Transactions on Magnetics. 2005. vol.41. №1. pp. 158-164.
- 7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // IEEE Transactions on Magnetics. 2003. vol.39. №1. pp. 310-313.
- 8. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом // Сварочное производство. -2009.- №2. С. 33-35.
- **9.** Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. 2011. vol.82. №2. pp. 104-110.
- 10. Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // Электротехника. -2013. -№8. -C. 48-52.
- 11. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Transactions on Magnetics. 1991. vol.27. №1. pp. 607-610.
- **12.** Косцов Э.Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов // Автометрия. -2012. -T.48. -№4. -C.93-103.
- 13. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system «Krioblast» increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices // Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering

- Congress and Exposition. Volume 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering. November 15-21, 2013. San Diego, CA, USA. Code 105847. 10 pgs.
- *14.* Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. 2012. vol.48. №11. pp. 3315-3318.
- 15. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. -2005. -№12. -C. 52-57.
- **16.** Тютькин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. 2002. №11. С. 24-28.
- 17. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. 1989. №1. С. 25-26
- **18.** Татмышевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // Современные технологии безопасности. -2005. -№4. -C. 8--11.
- **19.** Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2010. №1(7). С. 22-28.
- 20. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционнодинамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. 2008. №2. С. 5-10.
- 21. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. 2014. vol.56. iss.10. pp. 1098-1104.
- 22. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ ударных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типа // Вісник НТУ «ХПІ». 2014. №38(1081). С. 30-44.
- 23. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // Refrigeration Science and Technology. 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics. Prague, Czech Republic. April 7-11, 2014. Code 106226. 2014. pp. 268-275.
- **24.** Bolyukh V. F. Inductive dynamic motor // Russian electrical engineering. 2000. vol.71. part 10. pp. 39-48.
- **25.** Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. 2012. vol.83. №10. pp. 571-576.
- **26.** Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering. − 2004. − vol.75. − №12. − pp. 1-11.

REFERENCES

- *I.* Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrucken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
- 2. Ugarov G.G., Neiman V.Y. Trends in the development and use of hand-held drum machines with electromechanical energy conversion. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika Proceedings of the universities. Electromechanics*, 2002, no.2, pp. 37-43. (Rus).
- 3. Neiman V.Y. Analysis of the processes of energy conversion of linear electromagnetic machines with preliminary accumulation of magnetic energy in dynamic modes. *Elektrotekhnika Electrical Engineering*, 2003, no.2, pp. 30-36. (Rus).

- **4.** Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrakov D.V. Development of effective technological devices for magnetic elasto-impulsnoy cutting-punching thin materials. *Metalloobrabotka Metal Processing*, 2001, no.2, pp. 28-32. (Rus).
- 5. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.J. Wave phenomena in electromagnetic emitters and the formation of complex acoustic signals. *Tekhnichna elektrodynamika Technical electrodynamics*, 2001, no.2, pp. 3-6. (Rus).
- 6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol.41, no.1, pp. 158-164. doi: 10.1109/tmag.2004.838744.
- 7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, vol.39, no.1, pp. 310-313. doi: 10.1109/tmag.2002.805921.
- 8. Strizhakov E.L., Neskoromnyi S.V., Merkulov R.V. Impact capacitor welding with pulsed magnetic drive. Svarochnoe proizvodstvo *Welding Engineering*, 2009, no.2,pp. 33-35. (Rus).
- 9. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. Russian electrical engineering, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
- 10. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter low frequency mechanical vibrations for monitoring, measuring and dispensing multifractional liquid products mass. *Elektrotekhnika Electrical Engineering*, 2013, no.8, pp. 48-52. (Rus).
- 11. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol.27, no.1, pp. 607-610. doi: 10.1109/20.101103.
- 12. Koscov E.G. A microelectromechanical accelerator solid objects. *Avtometrija Avtometrija*, 2012, no.4, vol.48, pp. 93-103. (Rus)
- 13. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system «Krioblast» increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices // Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering, November 15-21, 2013. San Diego, CA, USA. Code 105847, 10 pgs. doi: 10.1115/imece2013-62383.
- 14. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultrafast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol.48, no.11, pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.
- 15. Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A. Magnetic pulse installation for testing products for aerospace shock effects. Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace Instrument, 2005, no.12, pp. 52-57. (Rus).
- 16. Tyutkin V.A. Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials. *Elektrotekhnika Electrical Engineering*, 2002, no.11, pp. 24-28. (Rus).
- 17. Kuznetsov P.V., Tolmachev N.S., Kharitonov V.D. Induction-dynamic system cleaning drying equipment. *Molochnaia promyshlennost' Dairy Industry*, 1989, no.1, pp. 25-26. (Rus).
- *18.* Tatmyshevsky K.V., Marychev S.N., Kozlov S.A. Magnetic pulse propelling means defeat for active protection systems objects of particular importance. *Sovremennye tekhnologii bezopasnosti Modern security technology*, 2005, no.4, pp. 8-11. (Rus).
- 19. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring. Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony Modern information technologies in the field of security and defense, 2010, no.1(7), pp. 22-28.
- 20. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V. F., Shchukin I.S. Device for computer information security from unauthorized access on the basis of an induction-dynamic motor. *Elektrotekhnika i elektromekhanika Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.2, pp. 5-10. (Rus).

- 21. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, iss.10, pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.
- 22. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of electromechanical transducers shock induction-dynamic, electromagnetic and electrodynamic type // Visnyk NTU «KhPI» Bulletin of NTU «KhPI», 2014, no.38(1081), pp. 30-44. (Rus).
- 23. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Refrigeration Science and Technology.* 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics. Prague, Czech Republic, April 7-11, 2014. Code 106226. pp. 268-275.
- 24. Bolyukh V.F. Inductive dynamic motor. Russian electrical engineering, 2000, vol.71, part 10, pp. 39-48.
- 25. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*, 2012, vol.83, no.10, pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
- **26.** Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2004, vol.75, no.12, pp. 1-11.

Поступила (received) 26.02.2015

Болюх Владимир Федорович¹, д.т.н., проф., Олексенко Сергей Владимирович¹, аспирант, Шукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц., ¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, oleksenko_sergii@mail.ru ² ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd», 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, S.V. Oleksenko¹, I.S. Schukin^{1,2}
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
² Firm Tetra, LTD,

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds.

Considered linear impulse electromechanical converters (LIEC) are used to create a significant impact and high-acceleration actuators on a short active site. The most effective types of LIEC are induction-dynamic (IDC), electro-dynamic (EDC) and electro-magnetic (EMC) converters. In all these types of short-term excitement LIEC carried briefly of the inductor from a pulsed source. This occurs when the magnetic field of the inductor causes the electro-dynamic or electromagnetic forces, leading to a linear movement of the armature. However, the issue at evaluating the effects of IDC, EDC and EMC, for creating a shock simultaneously with high speed to the specified criteria in the presence of ferromagnetic core virtually unexplored. The paper presents the simulated computer-WIDE 2D model of LIEC of coaxial configuration with ferromagnetic core by using software package COMSOL Multiphysics 4.4, taking into account the related electro-magnetic, thermal, and magnetic fields. In addition a synthesis of high-performance IDC, EDC and EMC to ensure maximum impact and speed of the operating element, whereby the comparative analysis of the effectiveness of the IDC, EDC and EMC via an integral index, taking into account the maximum value and momentum of electro-dynamic or electromagnetic force acting on the armature, maximum and average speed armature, efficiency, mass and dimensions performance transducer stray field, the maximum current density in the inductor is carried out. On the basis of the eight selection policies set the most efficient types of power and speed LIEC. It is shown that any one of the strategies IDC selection is not the best. To ensure maximum impact force is the most effective EMC and to ensure the greatest speed - EDC. References 26, tables 3, figures 9.

Key words: linear impulse of electromechanical converter, induction-dynamic, electrodynamic, electromagnetic converters, the synthesis parameters, the integral efficiency index.

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, А.В. Волошко

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВНУТРИ ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВА МЕТОДАМИ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Мета. Розробка методу синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти в середині заданої області простору, а також синтез і оцінка ефективності синтезованих систем активного екранування магнітного поля. Методика. Розроблено математичну модель розрахунку компонент вектора індукції магнітного поля, створюваного струмопроводами ліній електропередачі (ЛЕП) або генераторними струмопроводами електростанцій, а також керуючими обмотками магнітних виконавчих органів на підставі закону Біо - Савара - Лапласа. Струмопроводи приймалися у вигляді набору елементарних ділянок струмопроводів, що дозволяє розраховувати магнітне поле струмопроводів практично будь-якої форми, відмінної від ідеальних прямих ліній, або прямокутників і, зокрема, враховувати провисання струмопроводів ЛЕП. Результати. Синтез систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти зведений до вирішення задачі нелінійного програмування з обмеженнями, у якій обчислення цільової функції і обмежень виконується на підставі закону Біо - Савара - Лапласа. Сформульована задача нелінійного програмування є багатоекстремальною і вирішується стохастичним мультиагентним методом на основі оптимізації роєм часток, в якому частки рою переміщуються в багатовимірному просторі пошуку. Наукова новизна. Вперше розроблено метод синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти за допомогою керованих джерел магнітного поля шляхом вирішення задачі нелінійного програмування з обмеженнями на основі стохастичної мультиагентної оптимізації роєм часток. Практична значимість. Наведені приклади синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля промислової частоти і показана висока ефективність синтезованих систем. Бібл. 15, рис. 4.

Ключові слова: техногенне магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, синтез, стохастична мультиагентна оптимізація.

Цель. Разработка метода синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства, а также синтез и оценка эффективности синтезированных систем активного экранирования магнитного поля. Методика. Разработана математическая модель расчета компонент вектора индукции магнитного поля, создаваемого токопроводами линий электропередачи (ЛЭП) либо генераторными токопроводами электростанций, а также управляющими обмотками магнитных исполнительных органов на основании закона Био – Савара – Лапласа. Токопроводы принимались в виде набора элементарных участков токопроводов, что позволяет рассчитывать магнитное поле токопроводов практически любой формы, отличной от идеальных прямых линий, либо прямоугольников и, в частности, учитывать провисание токопроводов ЛЭП. Результаты. Синтез систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты сведен к решению задачи нелинейного программирования с ограничениями, у которой вычисление целевой функции и ограничений выполняется на основании закона Био – Савара – Лапласа. Сформулированная задача нелинейного программирования является многоэкстремальной и решается стохастическим мультиагентным методом на основе оптимизации роем частиц, в котором частицы роя перемещаются в многомерном пространстве поиска. Научная новизна. Впервые разработан метод синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с помощью управляемых источников магнитного поля путем решения задачи нелинейного программирования с ограничениями на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц. Практическая значимость. Приведены примеры синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты и показана высокая эффективность синтезированных систем. Библ. 15, рис. 4.

Ключевые слова: техногенное магнитное поле промышленной частоты, система активного экранирования, синтез, стохастическая мультиагентная оптимизация.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Техногенное магнитное поле промышленной частоты является канцерогенным и приводит к раковым заболеваниям, поэтому во всем мире проводятся мероприятий по поддержанию параметров техногенного магнитного поля внутри рабочих помещений энергонасыщенных объектов для выполнения экологических норм, а также для создания комфортных условий жизни и работы [1-9]. Для уменьшения уровня техногенного магнитного поля разрабатываются системы пассивного, активного и интегрированного экранирования. В работе [10] рассмотрены методы активного экранирования внешнего магнитного поля, а в работе [11] рассмотрены вопросы построения замкнутых систем управления магнит-

ным полем технических объектов с различными способами формирования обратных связей. Эффективность систем пассивного экранирования, как правило, недостаточна для выполнения экологических норм, поэтому рассмотрим построение систем активного экранирования техногенного магнитного поля 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.

Целью данной **работы** является разработка метода синтеза систем активного экранирования техно-

© Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, А.В. Волошко

генного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства.

Задачей работы является синтез и исследование систем активного экранирования магнитного поля промышленной частоты и оценка эффективности синтезированных систем активного экранирования магнитного поля.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Для определения компонент вектора индукции магнитного поля, создаваемого токопроводами ЛЭП либо генераторными токопроводами электростанций, а также управляющими обмотками магнитных исполнительных органов могут использоваться различные подходы, основанные на законе Био - Савара - Лапласа. В частности, токопроводы ЛЭП могут в первом приближении приниматься в виде бесконечных линий [12], определенным образом ориентированных относительно рассматриваемых точек пространства, а управляющие обмотки магнитных исполнительных органов могут приниматься в виде прямоугольных элементов. Рассмотрим другой подход, основанный на представлении токопроводов ЛЭП, генераторных токопроводов электростанций, а также управляющих обмоток магнитных исполнительных органов в виде набора элементарных участков токопроводов [13]. Такой подход позволяет рассчитывать магнитное поле токопроводов практически любой формы, отличной от идеальных прямых линий, либо прямоугольников и, в частности, учитывать провисание токопроводов линий электропередачи ЛЭП и т.д.

Математическая модель магнитного поля в заданном пространстве. Представим рассматриваемый токопровод достаточно сложной конструкции с током I в виде n элементарных отрезков достаточно малой длины. Обозначим координаты середины *i*-того отрезка C_i . Определим вектор индукции магнитного поля B в точке P с координатами (x, y, z), создаваемого этим элементарным отрезком, расположенным в точке C_i . Представим элементарный отрезок токопровода с учетом направления тока и расположения самого отрезка в ортогональной системе координат в виде ортов a_x , a_y , a_z . Определим компоненты разложения вектора элементарного отрезка токопровода в ортогональной системе координат как разность координат конца и начала рассматриваемого отрезка в следующем виде $(x_{i+1}-x_i)$, $(y_{i+1}-y_i)$, $(z_{i+1}-z_i)$. Введем вектор ΔL_i этого элементарного отрезка токопровода в следующем виде

$$\Delta L_i = (x_{i+1} - x_i)a_x + (y_{i+1} - y_i)a_y + (z_{i+1} - z_i)a_z.$$
 (1)

Введем вектор R_i , начало которого находится в центре рассматриваемого элементарного отрезка то-копровода (1), а конец находится в точке P(x, y, z), в которой необходимо определить вектор индукции магнитного поля, создаваемого элементарным отрезком токопровода, в следующем виде

$$R_i = P - C_i = (x, y, z) - \left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}, \frac{y_{i+1} + y_i}{2}, \frac{z_{i+1} + z_i}{2}\right).$$

Тогда вектор суммарной индукции магнитного поля B(x, y, z) в рассматриваемой точке P(x, y, z), создаваемый n элементарными отрезками токопровода с током I, может быть определен [13] на основании закона Био — Савара — Лапласа в следующем виде

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i \times R_i}{|R_i|^3} , \qquad (2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, векторное произведение векторов $\Delta L_i \times R_i$ равно вектору со следующими компонентами

$$\begin{split} \Delta L_i \times R_i &= \left(\Delta L_{iy} R_{iz} - \Delta L_{iz} R_{iy} \right) \left(\Delta L_{iz} R_{iy} - \Delta L_{ix} R_{iz} \right) \\ \left(\Delta L_{ix} R_{iy} - \Delta L_{iy} R_{ix} \right) \end{split}$$

Здесь введены обозначения ΔL_{ix} и R_{ix} компонент разложения векторов ΔL_i и R_i по оси x и аналогично по осям y и z. $\left|R_i\right|^3$ обозначает куб модуля вектора R_i и определяется выражением

$$|R_i|^3 = \left(\sqrt{R_{ix}^2 + R_{iy}^2 + R_{iz}^2}\right)^3.$$

Метод синтеза систем активного экранирования. Рассмотрим теперь метод синтеза системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты в заданном пространстве с помощью системы специальных управляемых магнитного поля регулируемым током, установленных определенным образом [1]. При этом вектор индукции магнитного $\vec{B}(\vec{p}_i,t)$ в точке \vec{p}_i рассматриваемого пространства в момент времени t представляет двух составляющих: индукции суперпозицию $\vec{B}_{v}(\vec{p}_{i},\vec{u}(t),t)$ магнитного поля управляемых источников, зависящей от вектора управления $\bar{u}(t)$ – токов в обмотках [3], и индукции исходного магнитного поля $\vec{B}_o(\vec{p}_i,t)$, рассчитываемых по (2). Задача активного экранирования магнитного поля заключается в формировании такого управления $\bar{u}(t)$, при котором суммарная индукция магнитного поля в рассматриваемых точках заданного пространства была бы близка к нулю.

Рассмотрим дискретный вариант этой задачи. Разобьем рассматриваемое пространство на N дискретных точек \vec{p}_i . В частности, для трехмерного пространства каждая точка \vec{p}_i характеризуется тремя координатами (i,j,k) так, что информация об индукции магнитного поля в точке \vec{p}_i в момент времени t является функцией этих трех координат и может храниться в виде трехмерного массива. Обозначим $\vec{B}_o(i,j,k,t)$ и $\vec{B}_y(i,j,k,u(t),t)$ исходную индукцию магнитного поля и индукцию магнитного поля, создаваемого управляющими обмотками, в точке (i,j,k) в момент времени t. Тогда задача синтеза системы активного экранирования магнитного поля может быть сформулированная как задача минимума квадратичного критерия качества

$$I(\vec{u}(t)) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{J} \sum_{j=1}^{K} \sum_{k=1}^{K} \gamma(i, j, k) \times \\ \times |\vec{B}_{o}(i, j, k, t) + \vec{B}_{y}(i, j, k, \vec{u}(t), t)|.$$
(3)

Весовой множитель $\gamma(i, j, k)$ учитывает вес в критерии качества величины модуля индукции магнитного поля в точке (i, j, k) рассматриваемого пространства.

Для вычисления модуля индукции магнитного поля $\left|\vec{B}_0(i,j,k,t) + \vec{B}_y(i,j,k,u(t),t)\right|$ в точке (i,j,k) рассматриваемого пространства используется разложение вектора $\vec{B}_o(i,j,k,t)$ исходной индукции магнитного поля в точке (i,j,k) в момент времени t по ортогональным осям x,y и z в виде $B_{ox}(i,j,k,t), B_{oy}(i,j,k,t)$ и $B_{oz}(i,j,k,t),$ а также разложение вектора $\vec{B}_y(i,j,k,u(t),t)$ индукции магнитного поля, создаваемого управляющими обмотками, в виде $B_{yx}(i,j,k,u(t),t), B_{yy}(i,j,k,u(t),t), B_{yz}(i,j,k,u(t),t)$. При этом для расчета модуля индукции магнитного поля используется следующее выражение

$$\begin{aligned} \left| \vec{B}_{0}(i,j,k,t) + \vec{B}_{y}(i,j,k,u(t),t) \right| &= \\ \left[\left(B_{0x}(i,j,k,t) + B_{yx}(i,j,k,u(t),t) \right)^{2} + \\ &+ \left(B_{0y}(i,j,k,t) + B_{yy}(i,j,k,u(t),t) \right)^{2} + \\ &+ \left(B_{0z}(i,j,k,t) + B_{yz}(i,j,k,u(t),t) \right)^{2} \right]^{1/2}. \end{aligned}$$
(4)

Заметим, что фактически при таком представлении (4) информация об индукции магнитного поля в точках рассматриваемого трехмерного пространства хранится в виде пятимерных массивов соответственно для индукции исходного техногенного магнитного поля, индукции магнитного поля, создаваемого управляющими обмотками и индукции суммарного магнитного поля.

Предположим, что в зоне активного экранирования магнитного поля установлено m источников магнитного поля — магнитных исполнительных органов. Введем m-мерный вектор управления $\vec{u}(t)$, компонентами которого являются m управляющих воздействий источников питания обмоток источников магнитного поля. Введем n-мерный вектор состояния $\vec{x}(t)$, компоненты которого включают токи в обмотках источников магнитного поля, тогда уравнение состояния таких источников магнитного поля может быть записано в стандартной форме

$$\vec{x}(t+1) = \Phi(\vec{x}(t), \vec{u}(t)). \tag{5}$$

Это разностное уравнение описывает динамику только собственно обмоток и их источников питания. Тогда на основании закона Био – Савара – Лапласа согласно (2) может быть вычислена индукция магнитного поля $\vec{B}_y(i,j,k,t)$, создаваемого m токами управляющих обмоток магнитных исполнительных органов (5) в точке (i,j,k) в момент времени t в следующем виде

$$\vec{B}_{y}(i,j,k,t) = \sum_{m=1}^{M} \vec{B}_{ym}(i,j,k,x_{m}(t)).$$
 (6)

Аналогично на основании закона Био — Савара — Лапласа согласно (2) может быть вычислена индукция исходного магнитного поля $\vec{B}_o(i,j,k,t)$, создаваемого токами $I_l(t)$ l токопроводов в следующем виде

$$\vec{B}_{o}(i,j,k,t) = \sum_{l=1}^{L} \vec{B}_{ol}(i,j,k,I_{l}(t)).$$
 (7)

Наиболее простой системой активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты является разомкнутая система. В частности, для трехфазных токопроводов, если имеется возможность измерения тока либо непосредственного измерения индукции магнитного поля вблизи токопровода, то разомкнутую систему можно построить следующим образом.

Модель магнитного поля в рассматриваемом пространстве (7), как правило, можно принять в виде магнитного поля, создаваемого тремя, шестью и т.д. проводниками трехфазного тока промышленной частоты, расположенных в известном положении относительно рассматриваемого пространства, в котором необходимо экранировать магнитное поле. Тогда, принимая токи в проводниках трехфазного токопровода в виде синусоидальных зависимостей заданной частоты ω и фазы $\varphi_i I_i(t) = A\sin(\omega(t) + \varphi_i)$, где i=1, 2, 3 – номер проводника трехфазного токопровода, может быть получена зависимость вектора индукции $\vec{B}_0(i,j,k,t)$ магнитного поля в точке (i, j, k) рассматриваемого пространства в момент времени t также в виде синусоидальной зависимости той же частоты и некоторой фазы ф. Обычно для построения контура разомкнутого управления системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты достаточно измерить ток одной фазы токопровода, а в случае постоянных амплитуд токов токопроводов воспользоваться некоторым опорным напряжением в сети, питающейся от данного токопровода

$$u_{n}(t) = A_{n} \sin(\omega t + \varphi_{n}). \tag{8}$$

На основании измеренного тока одной фазы токопровода либо опорного напряжения сформируем управления магнитными исполнительными органами по разомкнутому контуру так, что управляющее напряжение магнитными исполнительными органами примет следующий вид

$$u_i(t) = A_i \sin(\omega t + \varphi_i) + f_{uI} , \qquad (9)$$

где A_i — искомые амплитуды и φ_i — фазы управления в i-том исполнительном устройстве относительно измеренного тока в фазе токопровода либо опорного напряжения, f_{ul} — эквивалентная помеха измерения тока либо опорного напряжения.

Введем вектор разомкнутого управления $\vec{u}_p(t) = \{u_i(t)\}$, компонентами которого являются сформированные управления (9) в магнитных исполнительных органах $u_i(t)$. Введем также векторы искомых амплитуд $\vec{A} = \{A_i\}$ и фаз токов $\vec{\phi} = \{\phi_i\}$, компонентами которых являются амплитуды A_i и ϕ_i токов в магнитных исполнительных органах (5).

Рассмотрим теперь построение замкнутого контура управления. Сформируем вектор $\vec{y}(t)$ измеряемых компонент индукции магнитного поля $\vec{v}(t) = \left\{ \vec{B}_0 \left(i, j, k, t \right) + \vec{B}_y \left(i, j, k, t \right) \right\}$ в момент времени t в точках установки магнитометров (i, j, k) в следующем виле

$$\vec{y}(t) = \vec{v}(t) + \vec{w}(t)$$
, (10)

где $\vec{w}(t)$ – вектор шумов магнитометров.

Примем структуру системы активного экранирования магнитного поля в следующем виде: на вход ПИД регулятора каждого *i*-го канала подадим выходное напряжение соответствующего магнитометра. В частности, в работе [11] предлагаются в качестве регулируемых координат использовать величины магнитных потенциалов в середине источника управляющего поля поверхностно распределенного типа.

Запишем разностное уравнение состояния дискретных ПИД регуляторов, входом которых является вектор $\vec{y}(t)$ измеряемых компонент индукции магнитного поля (10), а выходом является вектор замкнутого управления $\vec{u}_3(t)$ магнитных исполнительных органов (5) в следующем виде

$$\vec{x}_p(t+1) = A_p \vec{x}_p(t) + B_p \vec{y}(t), \qquad (11)$$

$$\vec{u}_{3}(t) = C_{D}\vec{x}_{D}(t) + D_{D}\vec{y}(t),$$
 (12)

в котором элементы матриц A_p , B_p , C_p , D_p определяются параметрами ПИД регуляторов.

Тогда комбинированное управление обмотками магнитных исполнительных органов будет представлять суперпозицию разомкнутого (9) и замкнутого (12) управлений

$$\vec{u}(t) = \vec{u}_p(t) + \vec{u}_3(t)$$
. (13)

Введем вектор искомых параметров $\Theta = \left\{ A_p, B_p, C_p, D_p, \vec{A}, \vec{\phi} \right\}$, компонентами которого являются искомые элементы матриц A_p, B_p, C_p, D_p , определяемые коэффициентами усиления ПИД регуляторов замкнутых каналов управления (11)-(12), а также искомые векторы \vec{A} амплитуд и $\vec{\phi}$ фаз токов разомкнутых каналов управления (9).

Тогда синтез комбинированной системы активного экранирования магнитного поля, включающей разомкнутый и замкнутый контуры управления (13) сводится к нахождению параметров регуляторов Θ , минимизирующих принятый критерий качества (3)

$$\Theta^* = \arg\min I(\Theta). \tag{14}$$

При этом необходимо учитывать ограничения на переменные состояния, управления и параметры ПИД регуляторов в виде $G(\vec{x}(t),\vec{u}(t)) \leq 0$, обусловленные соответствующими ограничениями применяемых усилительных, преобразовательных и измерительных устройств.

В заключение заметим, что при косвенном измерении тока токопровода с помощью магнитометра при удалении магнитометра от токопровода и приближении его в область пространства, где необходимо экранировать техногенное магнитное поле промышленной частоты разомкнутый контур управления пре-

вращается в замкнутый контур управления, так что комбинированная система становится замкнутой системой.

Решение задачи нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц. Сформулированная задача нелинейного программирования (14) с ограничениями является многоэкстремальной и для ее вычисления требуется значительное машинное время. Кроме того, в целевой функций (3) имеются многомерные овраги и области, в окрестности которых значение целевой функции меняется очень медленно, вследствие чего применение классических методов оптимизации является малоэффективным. В первую очередь это связано с тем, что использование градиентов целевой функции и ограничений не только требует проведения дополнительных вычислений целевой функции, увеличение количества которых нежелательно, но может также привести к явлению «блуждания» по дну оврага или медленному продвижению к глобальному оптимуму при нахождении в окрестности участка типа «плато». Кроме того, высока вероятность попадания в область притяжения одного из локальных экстремумов с невозможностью выхода из него на следующих шагах оптимизационного процесса.

В связи с тем, что при решении исходной задачи нелинейного программирования требуется многократное вычисление целевой функции (3), для ускорения выполнения синтеза, целесообразно использовать алгоритмы многоэкстремальной оптимизации, позволяющих находить глобальный оптимум при минимальном количестве вычислений целевой функции. Это требование, в первую очередь, связано с тем, что вычисление целевой функции носит алгоритмический характер, включающий многократное вычислена индукция магнитного поля на основании закона Био — Савара — Лапласа согласно (2) для заданных значений вектора искомых параметров регуляторов $\Theta = \left\{ A_p, B_p, C_p, D_p, \vec{A}, \vec{\phi} \right\}, \text{ что само по себе требует значительных вычислительных ресурсов.}$

Применение бионических алгоритмов для решения многоэкстремальных задач математического программирования, в которых целевые функции являются многоэкстремальными овражными функциями и функциями с участками типа «плато», показало их высокую эффективность нахождения глобального оптимума таких целевых функций. Среди большого разнообразия бионических алгоритмов наиболее перспективными являются стохастические мультиагентные методы, к которым относится оптимизация роем частиц [14, 15], в котором частицы роя перемещаются в многомерном пространстве поиска. При своем движении частицы пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, за счет чего находить глобальный оптимум за меньшее количество итераций.

Преимуществом этих методов перед классическими градиентными методами оптимизации является также то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального приближение

к искомому решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

Результаты синтеза систем активного экранирования. В качестве примера рассмотрим синтез системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства вблизи генераторных токопроводов электростанций с помощью системы пяти прямоугольных обмоток.

На рис. 1 показаны поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля, создаваемого трехфазным токопроводом, и индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования, создаваемого пятью обмотками магнитных исполнительных органов, в центральном сечении рабочего места, ортогональном оси z.

На рис. 2 показаны поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях, ортогональных оси z. Как видно из этого рисунка, система эффективно — почти в 25 раз компенсирует магнитное поле в центральной части центрального сечения, на которую она настроена, однако по краям рабочей области эффективность системы существенно уменьшается.

Эффективность системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства существенным образом зависит от выбора целевой функции исходной задачи нелинейного программирования (6).

На рис. 3 показаны поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля, создаваемого трехфазным токопроводом, и индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования, для других параметров настройки целевой функции (6).

На рис. 4 показаны поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях, ортогональных оси z. Как видно из этого рисунка, система эффективно — более чем в 25 раз компенсирует магнитное поле в области левее центрального сечения, на которую она настроена, а также компенсирует магнитное поле более чем в 10 раз в области правее центрального сечения.

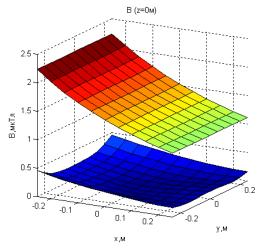


Рис. 1. Поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования

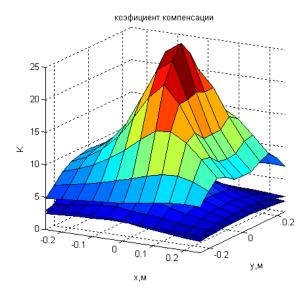


Рис. 2. Поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях

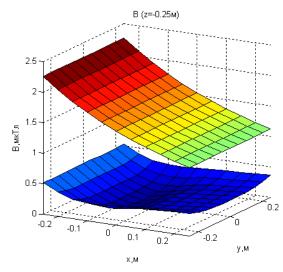


Рис. 3. Поверхности распределения уровней индукции исходного магнитного поля и магнитного поля с включенной системой активного экранирования

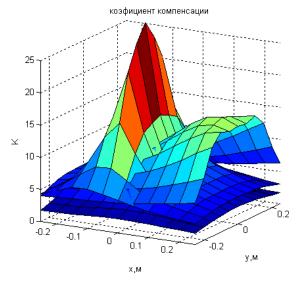


Рис. 4. Поверхности распределения коэффициентов компенсации в трех сечениях

Выводы.

Разработан метод синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с помощью управляемых источников магнитного поля. Задача синтеза систем активного экранирования магнитного поля сводится к решению задачи нелинейного программирования с ограничениями, которая решается на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц.

Приведены примеры синтеза систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты и показана высокая эффективность синтезированных систем.

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

- *I.* Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). http://www.emfservices.com/afcs.html.
- 2. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications // 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE), Marbella (Málaga). 2005. pp. 84-99.
- 3. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization // IEE Proceedings Science, Measurement and Technology. 2004. Vol. 151. № 1. pp. 2-7.
- 4. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu -metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications) // Measurement Science and Technology. 1991. Vol. 2(7). pp. 596-601.
- 5. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield // Neurology and Clinical Neurophysiology. 2004. Vol. 40. pp. 1-4.
- 6. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction // Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis (USA). 2002. Vol. 1. pp. 222-226.
- 7. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line // HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering. Vol. 2. Issues 1-2, pp. 254-265.
- 8. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms // Measurement Science and Technology. 1993. Vol. 4. Issue 12. pp. 1370-1375.
- 9. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation // IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. 2005. Vol. 125. Issue 2. pp. 99-106.
- **10.** Розов В.Ю. Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. 2006. №3. С. 13-16.
- **11.** Розов В.Ю. Ассуиров Д.А. Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. -2008. -№4. -C. 97-100.

- **12.** Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. 2014. №5. С. 11-13.
- 13. Nikolova N.K., Bakr M.H. Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3 // Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. 96 p.
- *14.* Clerc M. Particle Swarm Optimization. London: ISTE Ltd, 2006. 244 p.
- 15. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. Springer, 2011. 318 p.

REFERENCES

- *I.* Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: http://www.emfservices.com/afcs.html (accessed 10 September 2012).
- 2. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE), Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84-99.
- 3. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings Science, Measurement and Technology*, 2004, Vol.151, no.1, pp. 2-7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002.
- 4. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu-metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications). *Measurement Science and Technology*, 1991, Vol. 2(7), pp. 596-601. doi: 10.1088/0957-0233/2/7/004.
- 5. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. *Neurology and Clinical Neurophysiology*, 2004, Vol. 40, pp. 1-4.
- 6. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Minneapolis (USA), 2002, Vol. 1, pp. 222-226. doi: 10.1109/isemc.2002.1032478.
- 7. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering*, Vol. 2, Issues 1-2, pp. 254-265.
- 8. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. *Measurement Science and Technology*, 1993, Vol. 4, Issue 12, pp. 1370-1375. doi: 10.1088/0957-0233/4/12/010.
- 9. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation. *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 2005, Vol. 125, Issue 2, pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.
- 10. Rozov V.Yu., Assyirov D.A. Method of external magnetic field active shielding of technical objects. *Tekhnichna elektrodynamika Technical electrodynamics*, 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).
- 11. Rozov V.Yu., Assyirov D.A., Reytskiy S.Yu. Technical objects magnetic-field closed loop compensation systems with different feed-backs forming. Tekhnichna elektrodynamika Technical electrodynamics, 2008, no.4, pp. 97-100. (Rus).
- 12. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu. Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).
- 13. Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3*. Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. 96 p.
- 14. Clerc M. Particle Swarm Optimization. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.

15. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. Springer, 2011. 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.

Поступила (received) 20.11.2014

Кузнецов Борис Иванович¹, д.т.н., проф., Никитина Татьяна Борисовна², д.т.н., проф., Волошко Александр Валерьевич¹, к.т.н., н.с., ¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +38 050 5766900, e-mail: bikuznetsov@mail.ru ² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: tatjana55555@gmail.com

B.I. Kuznetsov¹, T.B. Nikitina², A.V. Voloshko¹

State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,

19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

Kharkov National Automobile and Highway University,

5, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Power frequency technogenic magnetic field reduction by active screening in system synthesis in area based on stochastic multi-agent optimization.

Purpose. Development of a method of synthesis of systems of active screening of technogenic power frequency magnetic fields within a given region of space, as well as the synthesis and

performance evaluation systems synthesized active shielding magnetic field. Methodology. A mathematical model for calculating the components of the magnetic field created by current distributors power line generator or electrical conductors power and control windings magnetic executive bodies on the basis of the law of Biot - Savart - Laplace. Conductors are taken as a set of elementary sections conductors, which allows to calculate the magnetic field conductors of any shape that is different from the ideal straight lines or rectangles, and in particular, to consider the slack conductors power line power lines. Results. Synthesis of active shielding systems for technogenic power frequency magnetic fields is reduced to the solution of a nonlinear programming problem with constraints, which computation of the objective function and constraints is performed based on the Biot - Savart - Laplace law. Formulated nonlinear programming problem is solved by using the multiextremal and stochastic multi-agent method based on particle swarm optimization, in which the particle swarm move in a multidimensional search space. Originality. First developed a method for the synthesis of active shielding systems for technogenic power frequency magnetic fields using controlled source of the magnetic field by solving a nonlinear programming problem with constraints based on stochastic particle swarm optimization of multi-agent. Practical value. Examples of synthesis of systems of active shielding technogenic power frequency magnetic fields and high efficiency of the synthesized systems. References 15, figures 4. Key words: technogenic magnetic field of power frequency, the system of active screening, synthesis, stochastic multi-agent optimization.

УЛК 621.3:537.3

М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, Е.В. Кузьминский, Ю.И. Мысюк, С.В. Рудаков

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОЛНИЕОТВОДОВ С УНИВЕРСАЛЬНЫМИ ЗАЖИМАМИ АПЕРИОДИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ С НОРМИРОВАННЫМИ ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Приведені результати прямої дії на круглі мідні і оцинковані сталеві блискавковідводи з плоскими мідними, оцинкованими сталевими і неіржавіючими сталевими універсальними затискачами спеціального профілю аперіодичних імпульсів струму штучної блискавки нормованою за міжнародним IEC 62305-1:2010, російським національним ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 і німецьким національним DIN EN 50164-1:2008 стандартами часовою формою 10 мкс/350 мкс і амплітудою (50-100) кА із заданими цими стандартами допусками. Бібл. 12, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: металеві блискавковідводи з металевими універсальними затискачами, генератор аперіодичних імпульсів струму штучної блискавки, випробування на блискавкостійкості.

Приведены результаты прямого воздействия на круглые медные и оцинкованные стальные молниеотводы с плоскими медными, оцинкованными стальными и нержавеющими стальными универсальными зажимами специального профиля апериодических импульсов тока искусственной молнии нормированной по международному IEC 62305-1: 2010, российскому национальному ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 и немецкому национальному DIN EN 50164-1:2008 стандартам временной формы 10 мкс/350 мкс и амплитуды (50-100) кА с заданными этими стандартами допусками. Библ. 12, табл. 1, рис. 12.

Ключевые слова: металлические молниеотводы с металлическими универсальными зажимами, генератор апериодических импульсов тока искусственной молнии, испытание на молниестойкость.

Введение. В соответствии с требованиями ряда действующих международных и национальных нормативных документов (стандартов) [1-6] при испытаниях на молниестойкость и пожаровзрывобезопасность зданий (сооружений) и находящихся внутри них различных инженерных сетей используются апериодические импульсы тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП). При этом определяющими характеристиками испытательных импульсов тока искусственной молнии положительной полярности являются [1, 6]: амплитуда I_m импульсов тока, изменяющаяся в диапазоне (50-200) кА при допуске ± 10 %; длительность τ_p импульсов тока на уровне $0.5 \cdot I_m$, равная (0.35-2) мс при допуске ± 10 %; интеграл действия J_a импульсов тока, изменяющийся в диапазоне $(0.63-10)\cdot 10^6$ A²·с при допуске ±35 %; протекший электрический заряд q_l , изменяющийся в диапазоне (25–100) Кл при допуске ± 20 %. Время t_m , соответствующее амплитуде I_m апериодического импульса тока, согласно [6] не должно превышать 50 мкс, а по требованиям [1-5] - 25 мкс. В этой связи указанным временным параметрам испытательного апериодического импульса тока искусственной молнии удовлетворяет его временная форма $\tau_f/\tau_p=10$ мкс/350 мкс [1-5], где τ_f , τ_p — соответственно длительность фронта (с допуском ± 20 %) между уровнями $(0,1-0,9)\cdot I_m$ и длительность импульса (на уровне $0.5 \cdot I_m$ с допуском ± 10 %) тока, воздействующего на испытываемый технический объект. В 2014 году в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был разработан и введен в опытную эксплуатацию мощный высоковольтный генератор импульсов тока искусственной линейной молнии ГИТМ-10/350 [7], воспроизводящий на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке (с активным сопротивлением не более 0,1 Ом и индуктивностью до 1,5 мкГн) импульсный ток искусственной молнии временной фор-

мы 10/350 мкс с амплитудой от ± 10 кА до ± 200 кА и допусками, соответствующими требованиям указанных стандартов [1-6].

1. Постановка задачи исследований. Одним из основных способов защиты от линейной молнии зданий (сооружений) и их инженерных коммуникаций является применение на них молниеприемников и молниеотводов, ориентирующих в воздушной атмосфере на себя сильноточные каналы грозовых разрядов и направляющих движущиеся в плазменном канале грозового разряда электрические заряды в землю [1-6]. Как правило, по существующим техническим нормам молниеотводы выполняются из круглого металлического (чаще всего стального) провода диаметром до 8 мм при своем поперечном сечении до 50 мм² [8, 9]. Обычно такие молниеотводы прокладываются вдоль наружной части защищаемых объектов. При своей прокладке определенные части молниеотводов из-за технологических причин (например, для обхода выступающих конструкционных элементов сооружения) приходиться изгибать между собой под прямым углом. При этом сварные соединения в местах стыка частей молниеотводов оказываются трудновыполнимыми и ненадежными. Поэтому в этом случае наиболее технологичными оказались болтовые соединения, использующие для гальванического контакта соединяемых частей круглых металлических молниеотводов плоские универсальные металлические зажимы специального профиля (рис. 1, 2). Разъемные части таких зажимов из-за их размещения на открытом воздухе приходиться выполнять из металлов, стойких к воздействию атмосферных факторов (меди, оцинкованной стали и нержавеющей стали). Прохождение большого импульсного тока (БИТ) молнии с указанными АВП по молниеотводам и их универсальным зажимам сопровождается протеканием интенсивных

© М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, Е.В. Кузьминский, Ю.И. Мысюк, С.В. Рудаков

как электродинамических, так и электротермических процессов. Эти процессы из-за контактных явлений в зоне взаимного соединения частей молниеотвода с БИТ наиболее ярко будут проявляться в области его универсального зажима. Поэтому требуется прогнозировать поведение молниеотводов с универсальными зажимами при вероятном действии на них БИТ линейной молнии. Наиболее надежным способом для этих целей является проведение натурных испытаний рассматриваемых молниеотводов на стойкость к воздействию импульсов тока искусственной молнии с АВП, определяемыми указанными выше международными и национальными стандартами.

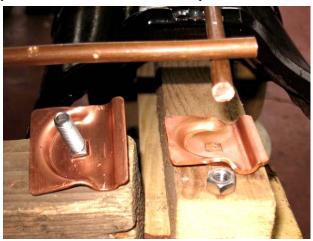


Рис. 1. Внешний вид перпендикулярно устанавливаемых под прямым углом друг к другу круглых частей медных молниеотводов диаметром 8 мм и двух разъемных частей плоского медного универсального зажима специальной конструкции с центральным болтовым соединением



Рис. 2. Внешний вид параллельно устанавливаемых друг относительно друга круглых частей медных молниеотводов диаметром 8 мм и двух разъемных частей плоского медного универсального зажима специального конструкционного исполнения с центральным болтовым соединением

Для выполнения согласно требований стандартов [1-6] испытаний на молниестойкость к прямому воздействию БИТ молнии с амплитудой I_m в 50 кА (N– класс по [6]) и 100 кА (H– класс по [6]) круглых медных и оцинкованных стальных молниеотводов (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м каждой из расположенной под прямым углом друг к другу их соединяемой части) с медными, оцинкованными стальными и не-

ржавеющими стальными универсальными зажимами с центральным болтовым соединением используем мощный высоковольтный генератор ГИТМ-10/350, обеспечивающий протекание по испытываемым частям указанных молниеотводов импульсов тока временной формы 10/350 мкс с требуемой амплитудой.

Для количественной оценки результатов воздействия импульсов тока временной формы 10/350 мкс с амплитудой I_m от 50 до 100 кА на указанные круглые металлические молниеотводы с плоскими универсальными металлическими зажимами будем осуществлять измерение активного сопротивления R_k при постоянном токе между соединяемыми частями молниеотводов в контактной зоне их зажимов как до, так и после действия на них принятых импульсов тока. С целью приближения проводимых испытаний на молниестойкость указанных молниеотводов с зажимами к реальным условиям выполним их закрепление с помощью изоляционных держателей на керамических элементах «конька» крыши здания согласно рис. 3.

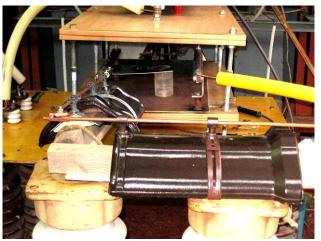


Рис. 3. Внешний вид двух частей круглого медного молниеотвода (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м) с медным универсальным зажимом специального профиля, закрепленных в зажиме между собой под прямым углом и посредством изоляционных держателей на двух керамических элементах «конька» крыши здания и подсоединенных к сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТМ-10/350

2. Основные характеристики электрической схемы испытаний молниеотводов и генератора ГИТМ-10/350. На рис. 4 приведена схема испытаний металлических молниеотводов с универсальными зажимами в сильноточной цепи разряда генератора ГИТМ-10/350.

Собранный согласно данным рис. 3 испытываемый молниеотвод, состоящий из двух частей медной или оцинкованной стальной катанки (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м), вместе с медным, оцинкованным стальным или нержавеющим стальным универсальным зажимом подсоединялся на рабочем столе генератора ГИТМ-10/350 к его массивным прямоугольным стальным электродам (рис. 5). Для этой цели нами были использованы специальные латунные переходники-зажимы диаметром 20 мм и сплошная медная жила диаметром 6,6 мм с полиэтиленовой изоляцией крупногабаритного радиочастотного кабеля марки РК-75-44-17 со снятой снаружи медной оболочкой.

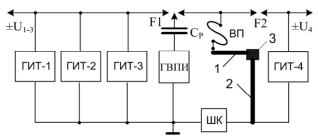


Рис. 4. Упрощенная схема испытаний молниеотводов с универсальным зажимом в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 [7] (ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 — отдельные генераторы импульсных токов; ГВПИ — генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения на ± 100 кВ; F1, F2 — высоковольтные трех- и двухэлектродный коммутаторы с графитовыми электродами; ВП — взрывающаяся тонкая медная проволочка; C_P — разделительный конденсатор емкостью 180 пФ на напряжение ± 120 кВ; ШК — коаксиальный шунт типа ШК-300; 1,2 и 3 — соответственно отдельные части молниеотвода и универсальный зажим)

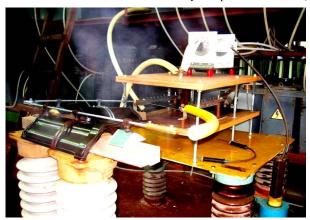


Рис. 5. Общий вид собранной схемы испытаний стального оцинкованного молниеотвода, составные две части которого закреплены под прямым углом друг к другу, с оцинкованным стальным универсальным зажимом в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТМ-10/350

Медная жила кабеля марки РК-75-44-17 гальванически подключала удаленный край молниеотвода к заземленному стальному электроду той части сильноточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350, в которой размещался метрологически поверенный измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300 [10]. Данный шунт (рис. 6) имел коэффициент преобразования $K_{\rm m}$, равный $11,26\cdot10^3$ А/В. Используемый шунт с помощью радиочастотного коаксиального кабеля марки РК-50-9-11 длиной около 70 м и специального делителя напряжения СД-300 на одном из его краев подключался к цифровому запоминающему осциллографу типа Текtronix TDS-1012. При испытаниях регистрирующая импульсы тока аппаратура размещалась в экранированном заглубленном в грунт бункере.

В схеме проводимых испытаний для имитации плазменного канала искусственного грозового разряда вблизи одной из частей металлического молниеотвода с универсальным металлическим зажимом была использована электрически взрывающаяся в атмосферном воздухе (при его температуре от +2 до +4 °C; относительной влажности от 46 до 49 %; давлении от 748 до 751 мм рт.ст.) тонкая медная проволочка (ВП) диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм [11, 12].



Рис. 6. Внешний вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 с кабелем РК-50-9-11 и делителем СД-300 [10]

Данная ВП закреплялась на верхнем стальном электроде двухэлектродной воздушной системы, подключенном к непотенциальному электроду управляемого трехэлектродного воздушного коммутатора F1 с графитовыми электродами [7], и размещалась с обеспечением воздушного зазора (0,5-1) мм перпендикулярно плоскости прямоугольной алюминиевой пластины толщиной 2 мм (см. рис. 3), жестко соединенной своим одним краем с одной из частей испытываемого молниеотвода. При подаче на вход генератора ГВПИ-100 (см. рис. 4) от генератора пусковых импульсов микросекундного импульса напряжения амплитудой до ± 10 кВ на его выходе появляется микросекундный импульс напряжения амплитудой до ±100 кВ, который передается через разделительную емкость СР=100 пФ на управляющий электрод коммутатора F1. В результате при соответствующей предварительной регулировке воздушных зазоров l_1 и l_2 в коммутаторе F1 происходит его срабатывание и соответственно разряд согласно схеме на рис. 4 предварительно заряженных до постоянного напряжения U_{1-3} высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3 трех отдельных генераторов импульсных токов ГИТ-1, ГИТ-2 и ГИТ-3 общего генератора ГИТМ-10/350 на ВП и отдельные части молниеотвода с универсальным зажимом. Импульс перенапряжения, возникающий при электрическом взрыве медной ВП, вызывает срабатывание двухэлектродного коммутатора F2 с графитовыми электродами [7] и воздушным зазором l_3 . В результате будет происходить разряд на испытываемый молниеотвод предварительно заряженных до постоянного напряжения U_4 высоковольтных конденсаторов типа ИМ2-5-140 генератора импульсных токов ГИТ-4. Проведенные исследования показали, что для получения с заданными по [1-6] допусками на АВП в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 с испытываемыми молниеотводами импульсов тока требуемой формы 10/350 мкс амплитудой до I_m =50 кА уровни зарядных напряжений U_{1-3} и U_4 должны соответственно составлять около 10 и 1,25 кВ, а с амплитудой до I_m =100 кА – соответственно 17 и 2,5 кВ. При этом воздушные зазоры в коммутаторах F1 и F2 оказываются равными $l_1\approx 2$ мм, $l_2\approx 5$ мм, а $l_3\approx 3$ мм. Поэтому с учетом [7] уровни запасаемых энергий в указанных конденсаторах генератора ГИТМ-10/350 для данных режимов токового нагружения (при $I_m \approx 50$ кА и $I_m \approx 100$ кА) испытываемых нами молниеотводов будут составлять соответственно примерно 57,2 и 200,2 кДж.

3. Амплитудно-временные параметры испытательных импульсов тока искусственной молнии. На рис. 7 приведена осциллограмма апериодического импульса тока формы 10/350 мкс искусственной молнии, полученная в случае разряда генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 (при зарядном постоянном напряжении их конденсаторов ИК-50-3, равном $U_{1-3}\approx 16$ кВ) и ГИТ-4 (при зарядном постоянном напряжении их конденсаторов ИМ2-5-140, равном $U_4 \approx 2.5$ кВ) используемой высоковольтной испытательной установки ГИТМ-10/350 на эквивалент электрической нагрузки. В нашем случае данный эквивалент нагрузки представлял собой квадратный алюминиевый лист толщиной 2 мм и размером в плане 350 мм × 350 мм, горизонтально и жестко закрепленный а пазах на рабочем столе генератора ГИТМ-10/350 между его массивными прямоугольными стальными электродами.

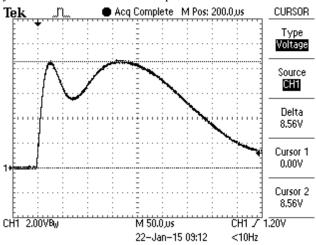


Рис. 7. Осциллограмма апериодического импульса тока 10/350 мкс положительной полярности при разряде генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 на эквивалент электрической нагрузки (масштаб по вертикали — 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали — 50 мкс/клетка; $I_m \approx 96,4$ кА; $\tau_p \approx 325$ мкс; $t_m \approx 24$ мкс; $J_a \approx 2,43 \cdot 10^6$ А $^2 \cdot$ с; $q_i \approx 45,7$ Кл)

На рис. 8 приведена осциллограмма импульса тока в цепи генератора ГИТМ-10/350 амплитудой I_m до 100 кА, протекающего через оцинкованный молниеотвод с оцинкованным универсальным зажимом.

При этом составные части молниеотвода были подключены к сильноточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 (при зарядных постоянных напряжениях его конденсаторов $U_{1-3} \approx 17$ кВ и $U_4 \approx 2.5$ кВ) согласно данным рис. 5. Из рис. 7, 8 видно, что подключение к низкоомной и малоиндуктивной цепи разряда конденсаторов генератора ГИТМ-10/350 [7] испытываемых молниеотводов из-за внесения в нее дополнительного внешнего индуктивного и активного сопротивлений вызывает определенную деформацию импульса тока временной формы 10/350 мкс. Несмотря на такую деформацию, получаемые в этом случае АВП испытательного импульса тока искусственной молнии продолжают удовлетворять жестким требованиям международного ІЕС 62305-1: 2010 [1], российского национального ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 [5] и немецкого национального DIN EN 50164-1:2008 [6] стандартов.

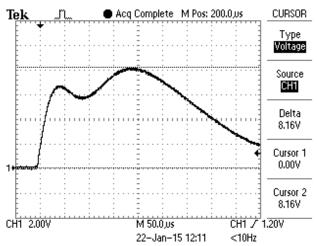


Рис. 8. Осциллограмма испытательного апериодического импульса тока положительной полярности при одновременном разряде генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 на оцинкованный стальной молниеотвод с оцинкованным стальным универсальным зажимом (масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка; $I_m \approx 91,9$ кА; $\tau_p \approx 345$ мкс; $J_a \approx 2,34 \cdot 10^6$ А 2 ·с; $q \approx 46,2$ Кл)

На рис. 9 представлена осциллограмма импульса тока искусственной молнии в цепи генератора ГИТМ-10/350 амплитудой I_m до 50 кА, протекающего через оцинкованный стальной молниеотвод с оцинкованным стальным универсальным зажимом.

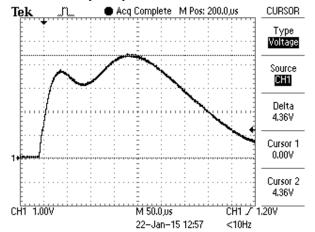


Рис. 9. Осциллограмма испытательного апериодического импульса тока положительной полярности при одновременном разряде генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 на оцинкованный стальной молниеотвод с оцинкованным стальным универсальным зажимом (масштаб по вертикали – 11,26 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка; I_m \approx 49,1 кА; τ_p \approx 340 мкс; J_a \approx 0,66·10⁶ A²·c; q \approx 24,7 Кл)

В табл. 1 приведены основные АВП, значения J_a и q_l для испытательных импульсов тока временной формы 10/350 мкс, использованных нами при исследовании поведения рассматриваемых металлических молниеотводов с указанными металлическими универсальными зажимами в условиях прямого воздействия на них принятых импульсов тока искусственной молнии. Сравнение численных значений АВП, интеграла действия J_a и протекшего заряда q_l для фактически примененных нами испытательных импульсов тока имитированной молнии с их соответствующими количественными показателями согласно требований

основных действующих зарубежных нормативных документов (например, международного IEC 62305-1-2010 [1], российского национального ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 [5] и немецкого национального DIN EN 50164-1 стандартов [6]) показывает, что они удовлетворяют необходимым количественным характеристикам импульсов тока искусственной линейной молнии, приведенным в указанных стандартах и применяемым при испытаниях на молниестойкость технических сооружений и их инженерных коммуникаций.

Таблица 1 Количественные характеристики основных параметров испытательных импульсов тока искусственной линейной молнии в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 [7]

Наименование параметра	Требования зару- бежных стандартов IEC 62305-1-2010, ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010, DIN EN 50164-1	Фактически при испытаниях молниеотводов с универсальными зажимами
Амплитуда им-	50±5	45,1-49,1
пульса тока I_m , кА	100±10	91,9-96,4
Длительность им- пульса тока τ_P , мкс	350±35	325-345
Интеграл действия импульса тока J_a , A^2 ·с	$(0.63 \pm 0.22) \cdot 10^6 \cdot$ (для I_m =50 кA) $(2.5 \pm 0.875) \cdot 10^6 \cdot$ (для I_m =100 кA)	$0.66 \cdot 10^6$ (для $I_m \approx 49.1$ кА) $2.43 \cdot 10^6$ (для $I_m \approx 96.4$ кА)
Количество про- текшего по мол-	25±10 (для <i>I_m</i> =50 кА)	24,7 (для <i>I_m</i> =49,1 кА)
ниеотводам электрического заряда q_l , Кл	50±10 (для <i>I_m</i> =100 кА)	45,7 (для <i>I_m</i> ≈96,4 кА)

- 4. Результаты испытаний молниеотводов с универсальными зажимами на стойкость к воздействию импульсов тока искусственной молнии. В процессе высоковольтных испытаний на генераторе ГИТМ-10/350, формирующем апериодические импульсы тока 10/350 мкс искусственной молнии на металлических молниеотводах с универсальными металлическими зажимами, на стойкость последних к прямому воздействию таких токовых импульсов нами были использованы следующие конфигурации и материалы молниеотводов и универсальных зажимов:
- оцинкованные перпендикулярно подключенные в универсальном оцинкованном стальном зажиме стальные молниеотводы (см. рис. 5);
- медные перпендикулярно подключенные в универсальном медном зажиме молниеотводы (см. рис. 1);
- медные перпендикулярно подключенные в универсальном нержавеющем стальном зажиме молние-отводы;
- медные параллельно подключенные в универсальном медном зажиме молниеотводы (см. рис. 2);
- оцинкованные параллельно подключенные в универсальном оцинкованном стальном зажиме стальные молниеотводы;
- медные и оцинкованные части перпендикулярно подключенных в универсальном нержавеющем стальном зажиме молниеотводы.

На рис. 10. 11 показаны типовые виды испытываемых частей оцинкованного стального молниеотвода с универсальным оцинкованным стальным зажимом в разобранном состоянии соответственно до и после воздействия на них апериодического импульса тока 10/350 мкс амплитудой $I_m \approx 91.9$ кА (см. рис. 8).



Рис. 10. Внешний вид параллельно устанавливаемых в зажиме друг относительно друга круглых частей оцинкованного стального молниеотвода и двух разъемных частей универсального оцинкованного стального зажима специального профиля с центральным болтовым соединением до воздействия на них импульса тока 10/350 мкс амплитудой $I_m \approx 91.9$ кА

При этом виде испытаний (H– класс по [6]) указанных частей круглого молниеотвода с плоским универсальным зажимом было установлено следующее:



Рис. 11. Внешний вид параллельно устанавливаемых в зажиме друг относительно друга круглых частей оцинкованного стального молниеотвода и двух разъемных частей универсального оцинкованного стального зажима специального профиля с центральным болтовым соединением после воздействия на них импульса тока 10/350 мкс амплитудой $I_m \approx 91.9$ кА ($\tau_P \approx 345$ мкс; $J_a \approx 2.34 \cdot 10^6$ А $^2 \cdot$ с; $q \approx 46.2$ Кл)

• электродинамического повреждения как круглых оцинкованных стальных стержней молниеотвода, так и его плоского универсального оцинкованного стального зажима не наблюдается. Никакого повреждения изоляционных держателей молниеотвода и используемых совместно с ними керамических элементов «конька» крыши здания также не происходит;

- в контактной зоне плоского оцинкованного стального универсального зажима специального профиля с центральным болтовым соединением его двух разъемных частей после прохождения по нему и двум соединяемым им частям круглого оцинкованного стального молниеотвода испытательного апериодического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии имеет место незначительное электротермическое повреждение наружных поверхностей стержней молниеотвода и внутренних поверхностей разъемных частей зажима в виде локальных прижогов диаметром до 5 мм с наличием в их области очагов сажи;
- активное сопротивление R_k в контактной зоне универсального оцинкованного стального зажима как до, так и после воздействия испытательного импульса тока искусственной молнии составляло около 1 мОм.

Необходимо отметить, что результаты испытаний на молниестойкость в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 с импульсами тока 10/350 мкс искусственной молнии амплитудой I_m в 50 кА (N– класс по [6]) и 100 кА (H– класс по [6]) всех остальных конфигураций и материалов жестко закрепляемых между собой частей молниеотводов и универсальных зажимов, указанных в начале раздела 4, свидетельствуют об их аналогичных локальных повреждениях в зоне универсального зажима и численных значениях R_k .

Следует заметить, что контроль активного сопротивления R_k в контактной зоне испытываемых металлических молниеотводов с универсальными металлическими зажимами проводился на постоянном токе до 200 мА с помощью метрологически поверенного французского измерителя сопротивления заземления типа СА6470N (рис. 12) как до протекания по ним от высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 соответствующих импульсов тока формы 10/350 мкс с заданными по [1-6] амплитудами I_m (см. рис. 8, 9 и данные табл. 1), так и сразу после их протекания.



Рис. 12. Общий вид момента измерения активного сопротивления R_k для медных молниеотводов в контактной зоне нержавеющего стального универсального зажима с помощью измерителя сопротивления заземления типа CA6470N

Выводы.

1. Проведенные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на генераторе импульсов тока искусственной молнии ГИТМ-10/350 испытания круглых металлических молниеотводов (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м)

- с двумя соединяемыми под прямым углом частями и плоскими металлическими универсальными зажимами специального профиля при центральном болтовом соединении их разъемных частей на молниестойкость к прямому воздействию на них апериодических импульсов тока временной формы 10/350 мкс амплитудой I_m в 50 и 100 кА с нормированными по действующим зарубежным стандартам допусками показали, что все испытанные в сборе молниеотводы с изоляционными держателями и керамическими элементами «конька» крыши здания выдержали электродинамические и электротермические воздействия короткого удара искусственного грозового разряда.
- 2. При испытаниях значения АВП импульсов тока грозового разряда, интеграла действия тока искусственной линейной молнии или удельной энергии (с размерностью Дж/Ом) J_a и протекавшего по молниеотводам электрического заряда q_l соответствовали международным требованиям.
- 3. Активное сопротивление R_k в контактной зоне медного, оцинкованного стального и нержавеющего стального разъемных универсальных зажимов примененного профиля с центральным болтовым соединением их двух частей как до, так и после прямого воздействия для используемых N— и H— классов токового нагружения с АВП согласно действующих требований зарубежных стандартов на все испытанные молниеотводы с подобными зажимами оказывается равным примерно 1 мОм. Данный результат может свидетельствовать об отсутствии каких-либо механических нарушений в контактной зоне универсального зажима после прохождения по ней указанных токов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *I.* IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning.— Part 1: General principles».
- 2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning.— Part 2: Risk management».
- 3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning.— Part 3: Physical damage to structures and life hazard».
- **4.** IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning.— Part 4: Electrical and electronic systems within structures».
- 5. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». М.: Стандартинформ, 2011. 46 с.
- Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001).
 Blitzschutzbauteile. Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile. 16 n
- 7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Мощный высоковольтный генератор апериодических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами // Електротехніка і електромеханіка. 2015. №1. С. 51-56.
- 8. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, кн. 1 / Под ред. И.Н. Орлова и др. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880 с.
- 9. Баранов М.И. Термическая стойкость неизолированных проводов при прямом ударе молнии // Технічна електродинаміка. 1997. №6. С. 9-15.
- 10. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. -2008. -№3. №3.

- 11. МІL-STD-464A. Военный стандарт США «Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем». Изд-во Минобороны, 2002. С. 1-162.
- **12.** Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость металлической обшивки летательного аппарата к прямому воздействию импульсного тока молнии // Электричество. − 2012. − №12. − С. 18-26.

REFERENCES

- *I.* IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles».
- 2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. Part 2: Risk management».
- 3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard».
- **4.** IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures».
- 5. GOST R MEK 62305-1-2010. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii «Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy» [GOST R IEC 62305-1-2010. National Standard of the Russian Federation. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).
- 6. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbauteile. Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile [German Norms DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Protecting from Lightning of Buildings and their Parts. Part 1: Requirements on Parts Buildings and of Connection]. 16 p. (Ger).
- 7. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A powerful high-voltage generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters rated on an International Standard IEC 62305-1-2010. *Elektrotekhnika i elektromekhanika Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 51-56. (Rus).
- 8. Orlov I.N. Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoj energii. Tom 3, kn. 1 [Electrical Engineering Handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, book 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 880 p. (Rus).
- 9. Baranov M.I. Thermal stability bare wires for direct lightning strikes. *Tekhnichna elektrodynamika Technical electrodynamics*, 1997, no.6, pp. 9-15. (Rus).
- 10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskyi O.S., Dnyschenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of technical objects. *Pribory i tekhnika eksperimenta Instruments and experimental techniques*, 2008, no.3, pp. 81-85. (Rus).
- 11. MIL-STD-464A. Voennyj standart USA. «Elektromagnitnye i ekologicheskie effekty vozdejstvija molnii. Trebovanija interfejsa i kriterii proverki system» [USA military standard. Electromagnetic and ecological effects of lightning. Requirements interface and testing criteria systems]. Ministry of Defense Publ., 2002, pp. 1-162. (Rus).
- 12. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance of the metal skin of an aircraft to the direct effects of lightning impulse current. *Elektrichestvo Electricity*, 2012, no.12, pp. 18-26. (Rus).

Поступила (received) 23.02.2015

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с., Колиушко Георгий Михайлович¹, к.т.н., с.н.с., Кузьминский Евгений Викторович², коммерческий директор, Мысюк Юрий Игорьевич³, директор, Рудаков Сергей Валерьевич⁴, к.т.н., доц., ¹ НИПКИ «Молния» Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua ² ООО «ЕФ-ЕР-ТІ-ГРУП». 02660, Киев, ул. Магнитогорская, 1, оф. 316,

тел/phone +38 050 9167205, e-mail: e.kuzminskiy@gmail.com ³ OOO «ГРОМОВИК»,

79066, Львов, ул. Кавалеридзе, 17, кв. 9, тел/phone +38 067 9234645, e-mail: gromovyklviv@gmail.com ⁴ Национальный университет гражданской защиты Украины, 61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94, тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg 73@i.ua

M.I. Baranov¹, G.M. Koliushko¹, E.V. Kuzminskiy², Yu.I. Mysyuk³, S.V. Rudakov⁴

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² Company Limited Liability «EF-EP-TI-GRUP»,

1, Magnitogorskaya Str., office 316, Kiev, 02660, Ukraine.

³ Company Limited Liability «GROMOVIK», 17, Kavaleridze Str., ap. 9, Lviv, 79066, Ukraine.

⁴ National University of Civil Protection of Ukraine,

94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Results of tests of lightning-rods with universal clamps by the aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters rationed on foreign standards.

Purpose. Test in obedience to the requirements of row of operating foreign standards of round metallic lightning-rods with the flat metallic universal clamps of the special type on firmness to direct action of aperiodic impulses of current of temporal form $10/350~\mu s$ by amplitude of $50~\kappa A~(N-~class)$ and $100~\kappa A~(H-~class)$ class). Methodology. The order of leadthrough of these tests is certain the followings normative documents: International IEC 62305-1: 2010, Russian national GOST R IEC 62305-1-2010 and German national DIN EN 50164-1:2008 Standards. Results. Conducted on a powerful high-voltage pulsed current of artificial linear lightning with the peak-temporal parameters and admittances of test rationed on the indicated foreign standards rationed that all of the lightning-rods tested in collection with universal clamps, isolating holders and ceramic elements of roof of technical building were survive electrodynamics and electrothermal action of in-use single short blow of an artificial storm digit. Originality. First in domestic practice the similar model tests of lightning-rods are conducted with universal clamps, executed from different explorer materials, on firmness to flowing to on by it the indicated large impulsive currents of artificial lightning. Practical value. Real firmness to lightning of round copper and zincked steel lightning-rods is certain with the flat copper, zincked steel and non-rusting steel universal clamps of the special execution. References 12, table 1, figures 12.

Key words: metallic lightning-rods with metallic universal clamps, generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning, test on firmness to lightning.

Д.О. Волонцевич, М.В. Барбашова, Е.С. Радченко

РАСЧЁТ ПОЛЕЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ – ИНСТРУМЕНТАХ РИХТОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

У статті представлена конструкція комбінованої індукторної системи – інструменту зовнішнього рихтування вм'ятин в металевих покриттях автомобільних кузовів. Запропоновано використання низькочастотного плоскопаралельного замість кругового високочастотного магнітного поля для створення умов трансформації природного відштовхування в притягання листового провідника. В індукторній системі низькочастотне поле генерується за допомогою плоского круглого витка, а плоскопаралельне магнітне поле – витком прямокутної форми. У даній конструкції низькочастотне поле проникає крізь листову заготовку, але плоскопаралельне магнітне поле, як показує теорія та експеримент, у вільний півпростір практично, не дифундує. Виведення розрахункових співвідношень для аналізу процесів магнітно-імпульсного притягання в даній системі заснований на рішенні рівнянь Максвелла для ненульових складових напруженостей електромагнітного поля, перетворених по Лапласу з урахуванням нульових початкових умов. При цьому застосовувалося інтегральне синус-перетворення Фур'є. Завдання вирішується в наближенні плоских хвиль, для яких справедлив прямо пропорційний зв'язок між дотичними складовими векторів електромагнітного поля на поверхні провідника. У результаті була отримана повна сукупність розрахункових виразів для аналізу процесів у комбінованій індукторній системі для магнітно-імпульсного «витягування» заданої ділянки металевого листа, яка представляє собою суперпозицію низькочастотних кругового і плоскопаралельного магнітних полів. Показано, що магнітний тиск на металевий лист, який зумовлений силовим впливом з боку збуджуваних полів, визначається виключно амплітудою поля, що проникло, і направлений у бік робочої поверхні індуктора. Зрештою, має місце притягання заданої ділянки листового металу. Робоча частота плоскопаралельного поля може бути досить малою. Цей вибір не впливає на дифузійні процеси в системі, але дозволяє реалізувати режим найбільш ефективного виконання заданої виробничої операції. Бібл. 6, рис. 2.

Ключові слова: комбінована індукторна система, зовнішнє рихтування, низькочастотне магнітне поле.

В статье представлена конструкция комбинированной индукторной системы – инструмента внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов. Предложено использование низкочастотного плоскопараллельного вместо кругового высокочастотного магнитного поля для создания условий трансформации естественного отталкивания в притяжение листового проводника. В индукторной системе низкочастотное поле генерируется с помощью плоского круглого витка, а плоскопараллельное магнитное поле – витком прямоугольной формы. В данной конструкции низкочастотное поле проникает сквозь листовую заготовку, но плоскопараллельное магнитное поле, как показывает теория и эксперимент, в свободное полупространство, практически, не диффундирует. Вывод расчетных соотношений для анализа процессов магнитно-импульсного притяжения в данной системе основан на решении уравнений Максвелла для ненулевых составляющих напряженностей электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условия. При этом применялось интегральное синус-преобразование Фурье. Задача решается в приближении плоских волн, для которых справедлива прямо пропорциональная связь между касательными составляющими векторов электромагнитного поля на поверхности проводника. В результате была получена полная совокупность расчётных выражений для анализа процессов в комбинированной индукторной системе для магнитно-импульсного «вытягивания» заданного участка металлического листа, которая представляет собой суперпозицию низкочастотных кругового и плоскопараллельного магнитных полей. Показано, что магнитное давление на металлический лист, которое обусловлено силовым воздействием со стороны возбуждаемых полей, определяется исключительно амплитудой проникшего поля и направлено в сторону рабочей поверхности индуктора. В конечном итоге, имеет место притяжение заданного участка листового металла. Рабочая частота плоскопараллельного поля может быть достаточно малой. Этот выбор не влияет на диффузионные процессы в системе, но позволяет реализовать режим наиболее эффективного выполнения заданной производственной операции. Библ. 6, рис. 2. Ключевые слова: комбинированная индукторная система, внешняя рихтовка, низкочастотное магнитное поле.

Введение. Актуальность промышленных технологий с использованием энергии электромагнитных полей на современном этапе научно технического прогресса не вызывает сомнений. Помимо известных традиционных операций кузнечно-штамповочного производства, получивших достаточно широкое распространение в авиа- и автомобилестроении, наиболее востребованными являются способы рихтовки вмятин в покрытиях из тонкостенных металлов. Известными достоинствами магнитно-импульсных технологий такого рода является возможность реализации с внешней стороны корпуса или кузова, высокая скорость выполнения операции, возможность сохранения защитного лакокрасочного слоя и др. [1].

Обзор литературы. Постановка задачи. Среди различных способов магнитно-импульсного устранения вмятин в корпусах самолётов, доведенных до уровня реального практического осуществления, в первую очередь, следует выделить разработки инженеров концерна «Боинг». Физическая сущность сформулированных предложений состоит в использовании низко-(НЧ) и высокочастотных (ВЧ) магнитных полей. Первое проникает сквозь металл с вмятиной. Второе концентрируется только со стороны источника поля — индуктора. Результатом их суперпозиции является нуль напряжённости с одной и её не нулевая амплитуда с другой стороны обрабатываемого объекта. Возникающая

© Д.О. Волонцевич, М.В. Барбашова, Е.С. Радченко

сила магнитного давления деформирует заданный участок листового металла с вмятиной и осуществляет его притяжение к источнику поля — индуктору. Конструктивно, предлагаемые инструменты метода обладают круговой симметрией, что объясняется традиционными представлениями о характере протекающих электромагнитных процессов [2, 3].

Отбрасывая второстепенные факторы, основным требованием к инструменту данного принципа действия является формирование проникающего (НЧ) и не проникающего (ВЧ) магнитных полей.

Избежать проникновения можно не только за счёт повышения рабочей частоты действующего поля. Решить данную задачу можно с помощью природного эффекта, в соответствии с которым касательная составляющая напряжённости магнитного поля не проникает сквозь проводящий слой в свободное полупространство. Практически, реализовать отмеченный эффект можно с помощью комбинированных индукторных систем, генерирующих круговые и плоскопараллельные магнитные поля [4].

Цель работы — предложить конструкции и вывод расчётных соотношений для анализа процессов магнитно-импульсного притяжения в комбинированной индукторной системе — инструменте внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов.

Вывод расчетных соотношений. На рис. 1, схематически, представлена индукторная система, в которой низкочастотное поле генерируется с помощью плоского круглого витка, а плоскопараллельное магнитное поле — витком прямоугольной формы.

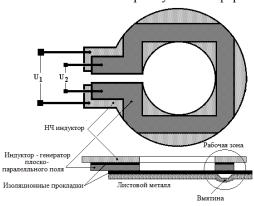


Рис. 1

В данной конструкции низкочастотное поле (так же как и ранее) проникает сквозь листовую заготовку, но плоскопараллельное магнитное поле, как показывает теория и эксперимент, в свободное полупространство, практически, не диффундирует [4]. И если в рабочей зоне индукторной системы амплитуда плоскопараллельного магнитного поля равна амплитуде низкочастотного поля над заготовкой, то давление на заготовку со стороны её внешней поверхности (фактически — это притяжение к индукторам) будет обеспечиваться только величиной напряжённости проникшего низкочастотного магнитного поля.

То есть, в такой конструкции индукторной системы нет жёстких требований на временные параметры дополнительного сигнала, устраняющего поле над

заготовкой, и позволяющего реализовать эффект её притяжения.

Касательная компонента напряжённости магнитного поля в цилиндрической системе координат, связанной с витком низкочастотного индуктора была вычислена ранее авторами научного издания [5].

Перепишем их.

В предположении равномерного распределения плотности тока было найдено, что

а) над листом:

$$H_{1}(t, r, z = 0) \approx \frac{-j_{1}(t)}{2} \cdot \int_{0}^{\infty} \left[\int_{(\lambda \cdot R_{1})}^{(\lambda \cdot R_{2})} x \cdot J_{1}(x) dx \right] \times \frac{e^{-\lambda \cdot H}}{\lambda} \cdot J_{1}(\lambda \cdot r) d\lambda;$$

$$(1)$$

б) пол листом:

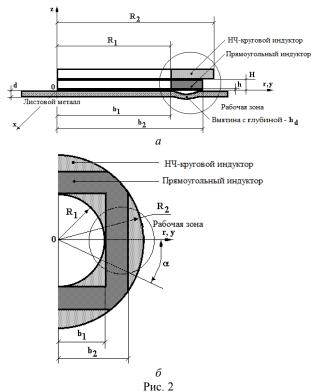
$$H_{1}(t, r, z = -d) \approx \frac{-j_{1}(t)}{2} \cdot \int_{0}^{\infty} \left[\int_{(\lambda \cdot R_{1})}^{(\lambda \cdot R_{2})} x \cdot J_{1}(x) dx \right] \times \frac{e^{-\lambda \cdot (H+d)}}{\lambda} \cdot J_{1}(\lambda \cdot r) d\lambda,$$
(2)

где $j_1(t)$ — плотность тока в катушке, $j_1(t) = \frac{I_1(t) \cdot w_1}{(R_2 - R_1)}$,

 $I_1(t)$ и w_1 — ток и число витков в катушке, соответственно

Вычислим напряжённость плоскопараллельного поля, генерируемого прямоугольным индуктором в декартовой системе координат, связанной с индуктором.

Для вычисления результата суперпозиции возбуждаемых полей совместим координатные системы в рабочей зоне соответственно рис. 2. На рис. 2,a- в поперечном сечении рабочей зоны, рис. $2,\delta-$ по ширине круглого и прямоугольного индукторов.



Вычисление касательной компоненты напряжённости магнитного поля прямоугольного индуктора в рабочей зоне проведём при следующих допущениях:

- имеет место геометрическая симметрия системы относительно координатной плоскости *ZOX*;
- заготовка металлический лист достаточно больших поперечных размеров с толщиной d и электропроводностью γ ;
- наличием разреза и токоподводов для подключения к источнику питания пренебрегаем, индуктор представляем замкнутым квадратным витком, по которому течёт ток I(t) (по противоположным сторонам в противоположных направлениях);
- вдоль оси абсцисс система обладает достаточно большой протяжённостью, так что электромагнитные процессы в рабочей зоне не зависят от поля, возбуждаемого боковыми токоподводами и $\partial/\partial x=0$;
- толщина индуктора пренебрежимо мала. Расстояние между поверхностью индуктора и заготовки h, а также толщины экрана и заготовки d много меньше всех характерных размеров системы, то есть $h/(b_{1,2})<<1$, $d/(b_{1,2})<<1$.

Задача решается в приближении плоских волн, для которого справедлива прямо пропорциональная связь между касательными составляющими векторов электромагнитного поля на поверхности проводника, отделяющего источник поля от свободного полупространства [4]:

$$H_{\tau} = \pm (\gamma \cdot d) \cdot E_{\tau} \,, \tag{3}$$

где γ , d — электропроводность и толщина проводника (в данной задаче — это листовая заготовка).

В пространстве между индуктором и листовой заготовкой $z \in [0,h]$ уравнения Максвелла для ненулевых составляющих напряжённостей электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\begin{cases}
\frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z); \\
\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z); \\
\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z),
\end{cases} (4)$$

где $j_x(p,y,z)$ — плотность стороннего тока — тока в индукторе, $j_x(p,y,z)=j(p)\cdot f(y)\cdot \delta(z-h),\ j(p)=I(p)/L,\ I(p)\leftrightarrow I(t),$ L — ширина индуктора в рабочей зоне, $L=b_1-b_2$; $f(y)=\eta(y-b_1)-\eta(y-b_2)$ — функция поперечного распределения плотности тока; $\eta(y),\ \delta(z)$ — ступенчатая и импульсная функции, соответственно; $E_x(p,y,z)\leftrightarrow E_x(t,y,z);\ H_{y,z}(p,y,z)\leftrightarrow H_{y,z}(t,y,z)$.

Из дифференциальной системы (4) можно получить уравнение для $E_x(p,y,z)$:

$$\frac{\partial^2 E_x(p,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p,y,z)}{\partial z^2} = p\mu_0 j(p,y,z).$$
 (5)

Для решения уравнения (5) применим интегральное синус-преобразование Фурье. Допустимость данного математического подхода обусловлена электрической асимметрией рассматриваемой задачи относительно плоскости *ZOX* [6].

Таким образом, имеем

$$\begin{cases} E_{x}(p,y,z) = \int_{0}^{\infty} E_{x}(p,\lambda,z) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda; \\ j_{x}(p,y,z) = \int_{0}^{\infty} j_{x}(p,\lambda,z) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda, \end{cases}$$
(6)

ГД€

$$j_x(p,\lambda,z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty j_x(p,y,z) \cdot \sin(\lambda y) dy = j(p) f(\lambda) \delta(z);$$

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{b_1}^{b_2} f(y) \cdot \sin(\lambda y) dy = \frac{4}{\pi \cdot \lambda} \sin(\lambda (b_2 + b_1)) \cdot \sin(\lambda (b_2 - b_1)).$$

С учётом преобразований и дальнейшего решения поставленной задачи изображение касательной составляющей напряженности магнитного поля имеет вид:

$$H_{y}(p,\lambda,z) = j(p) \cdot f(\lambda) (\eta(z-h) \cosh(\lambda(z-h)) -$$

$$-e^{-\lambda h} \left(\cosh(\lambda z) - \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda z}}{(\lambda + p\mu_0 \gamma d)} \right)$$
 (7)

Из формулы (7) при z = 0 находим напряжённость магнитного поля на поверхности листовой заготовки:

$$H_{y}(p,\lambda,0) = -f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{p \cdot j(p)}{\left(\frac{\lambda}{\mu_{0} \gamma d} + p\right)}.$$
 (8)

Выполняем в (8) обратные синус-Фурье и преобразования Лапласа и учтём вид функции $f(\lambda)$ из системы (6).

После тождественных преобразований получим, что

$$H_{y}(t,y,0) = -\frac{4}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{\sin(\lambda(b_{2} + b_{1})) \cdot \sin(\lambda(b_{2} + b_{1}))}{\lambda} \times e^{-\lambda h} \cdot \frac{dj_{2}(t)}{dt} \cdot e^{-\frac{\lambda \cdot t}{\mu_{0} \gamma d}} d\lambda.$$
(9)

Результирующие магнитные поля в системе находятся суперпозицией соответствующих решений:

а) над листом (алгебраическая сумма зависимостей (1) и (9)):

$$H_s^{(over)}(t, r, z = 0) = H_r(t, r, z = 0) + H_y(t, y, z = 0), (10)$$

б) под листом (выражение (2)):

$$H_s^{(under)}(t, r, z = -d) \approx H_1(t, r, z = -d)$$
. (11)

Магнитное давление на металлический лист, обусловленное силовым воздействием со стороны возбуждаемых полей, пропорционально разности квадратов напряжённостей на граничных поверхностях листа [4]. Его величина в соответствии с выражениями (10) и (11) будет определяться зависимостью:

$$P = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(\left(H_r(t, r, z = 0) + H_y(t, y, z = 0) \right)^2 - H_1^2(t, r, z = -d) \right)$$
(12)

Как видно из формулы (12), при равенстве и противоположной направленности напряжённостей полей, возбуждаемых круговым и прямоугольным индукторами, алгебраическая сумма в первых скобках стремится к нулю. Выражение (12) принимает вид:

$$P = -\frac{\mu_0}{2} \cdot H_1^2(t, r, z = -d).$$
 (13)

Полученная зависимость (13) свидетельствует о том, что сила магнитного давления определяется исключительно амплитудой проникшего поля и направлена в сторону рабочей поверхности индуктора. В конечном итоге, имеет притяжение заданного участка листового металла.

Формулы (10) – (13) представляют собой полную совокупность расчётных выражений для анализа процессов в комбинированной индукторной системе для магнитно-импульсного «вытягивания» заданного участка металлического листа за счёт суперпозиции низкочастотных кругового и плоскопараллельного магнитных полей.

Подчеркнём, что рабочая частота плоскопараллельного поля может быть достаточно малой. Этот выбор не влияет на диффузионные процессы в системе, но позволяет реализовать режим наиболее эффективного выполнения заданной производственной операции.

Выводы. Предложена и развита идея использования плоскопараллельного магнитного поля для создания условий трансформации естественного отталкивания в магнитно-импульсное притяжение. Предложена конструкция комбинированной индукторной системы, реализующая принцип суперпозиции кругового и плоскопараллельного магнитных полей. Получены аналитические зависимости для анализа электродинамических процессов в предложенном инструменте внешней магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *І.* Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бажинов А.В., Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов. // Труды межд. научн.-техн. конф. «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития». Самара, 18-19 сентября 2007. С. 3-13.
- 2. US Patent no.3,998,081, Hansen et al. (The Boeing Company, 1976).
- 3. US Patent no.4,986,102, Hendrickson et al. (The Boeing Company, 1991).
- 4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю. В. Х.: МОСТТорнадо, 2003. 284 с.
- 5. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. Под ред. проф. Ю.В. Батыгина. Х.: Изд. ХНАДУ, 2009. 249 с.
- **6.** Г. Корн, Т. Корн, Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 831 с.

REFERENCES

- I. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Bazhinov A.V. Magnetic pulsed methods and systems for attraction of thin sheet metal. *Trudy mezhd. nauchn.-tekhn. konf. «Magnitno-impul'snaya obrabotka metallov. Puti sovershenstvovaniya i razvitiya»* [Proceedings of Int. Sci.-Tech. Conf. «Magnetic pulsed treatment of metals. Ways to improve and develop»]. Samara (Russia), 18-19 September, 2007, pp. 3-13. (Rus).
- 2. Hansen et al. (The Boeing Company). Patent US, no.3.998.081, 1976.
- 3. Hendrickson et al. (The Boeing Company). Patent US, no.4.986.102, 1991.

- 4. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Khimenko L.T. *Impul'snyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 1. Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye.* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.1. 2nd edition, revised and enlarged.] Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 284 p. (Rus).
- 5. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 3: Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami.* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.3: Theory and experiment attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields]. Kharkov, KHNADU Publ., 2009. 249 p. (Rus).
- 6. Korn G., Korn T., *Spravochnik po matematike* [Mathematical Handbook]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 831 p. (Rus).

Поступила (received) 20.04.2015

Волонцевич Дмитрий Олегович¹, д.т.н., проф., Барбашова Марина Викторовна², ассистент, Радченко Евгения Сергеевна², студент,

1 Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, e-mail: vdo@kpi.kharkov.ua

² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: barbashova1987@gmail.com

D.O. Voloncevich¹, M.V.Barbashova², E.S. Radchenko²

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

² Kharkov National Automobile and Highway University,

25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Calculation of fields in a combined inductor system as a tools of straightening of metal coating of car body.

In the paper construction of combined inductor system realizing the principle of superposition of circular and plane-parallel magnetic fields is proposed. This inductor system is the instrument of external straightening of dents in the metal coating of car body. The use of low-frequency plane-parallel magnetic field instead of a high-frequency magnetic field to create conditions for the transformation of the natural repulsion to attraction of sheet conductor is suggested. The low-frequency field is generated by inductor system by dint of flat circular turn. The plane-parallel magnetic field is generated by a rectangular turn. The low-frequency field penetrates the sheet workpiece in the construct. The theory and experiment indicate that plane-parallel magnetic field doesn't diffuse almost. Conclusion calculated ratios to analyze the processes of magnetic pulse attraction in the system based on the solution of Maxwell's equations for non-zero intensity components of the electromagnetic field. The Maxwell's equations are transformed by Laplace zero initial conditions. In this case the integral sinus-transformation Fourier are applied. The problem is solved in the plane-wave approximation. Valid for plane waves directly proportional relationship between the tangent vector components of the electromagnetic field on the surface of conductor. For the analysis of processes in combined inductor system for a magneticpulsed «pulling» a predetermined part of the metal sheet were obtained the population of calculated expressions. The magnetic pressure on the metal sheet is caused by force action on the part of the excited fields. It is determined solely amplitude of penetrate field and is directed towards the working surface of the inductor. Finally, there is a predetermined part of the attraction of the sheet metal. The operating frequency of the plane-parallel field can be quite small. This choice doesn't influence the diffusion processes in the system, but allows for the most efficient mode of implementation of a given production operation. References 6, figures 2. combined inductor

Key words: combined inductor system, externa straightening, low-frequency magnetic field.

УДК 621.331:621.311.025

И.В. Доманский

РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УСТРОЙСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В статті проведена порівняльна оцінка регульованих установок компенсації реактивної потужності та розроблена методика вибору їх параметрів і місць розміщення в електротяговій мережі. Проведені дослідження та аналіз режимів роботи електротягових мереж і ліній енергосистем, що їх живлять. Виділені фактори, які в найбільшій мірі впливають на енергозбереження. Бібл. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, енергозбереження, система тягового електропостачання, режими роботи, фактори, що впливають, енергетична безпека.

В статье дана сравнительная оценка регулируемых установок компенсации реактивной мощности и разработана методика выбора их параметров и мест размещения в электротяговой сети. Проведены исследование и анализ режимов работы электротяговых сетей и питающих линий энергосистем. Выделены факторы, которые в наибольшей степени влияют на энергосбережение. Библ. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, энергосбережение, система тягового электроснабжения, режимы работы, влияющие факторы, энергетическая безопасность.

Введение и постановка проблемы. Минимизация потерь электроэнергии в тяговой сети является целевой задачей участия системы тягового электроснабжения (СТЭ) в формировании энергетической эффективности электрической тяги в целом [1]. Наименьшая мощность СТЭ требуется при наиболее равномерном распределении поездов (по их числу и типу) во времени. Повышение энергетической эффективности режимов работы СТЭ переменного тока с нерациональными потоками реактивной мощности и наличием транзита мощности из-за межсистемных перетоков требует применения автоматического регулирования напряжения на тяговых подстанциях и ввода в работу рациональных мощностей компенсирующих устройств.

Эффективность применения конденсаторных установок в электроэнергетике известна давно [2-6]. Они позволяют повысить провозную способность железных дорог при больших нагрузках за счет повышения напряжения в тяговой сети до нормируемых значений. С их помощью также нормализуется баланс по реактивной мощности в рассматриваемом узле электроснабжения для обеспечения приемлемого режима напряжения для потребителя, решаются вопросы снижения потерь мощности и в целом повышается качество электроэнергии.

Практика доказала приемлемость в тяговом электроснабжении установок поперечной (КУ) и продольной (УПК) емкостной компенсации для повышения эффективности и надежности работы железных дорог. Тем не менее, проблема совершенствования КУ и УПК с учетом современных требований к электроснабжению является первоочередной и требует выполнять их регулируемыми и переключаемыми, учитывая основные нормативно-правовые документы [7].

Для эффективного распределения инвестиций при модернизации СТЭ важно путем технико-экономических расчетов на имитационных моделях [8, 9] определить наиболее влияющие факторы на энергосбережение. Необходимо разработать новую методику выбора параметров и мест размещения

поперечной и продольной компенсации в СТЭ во взаимосвязи с режимами работы систем внешнего электроснабжения (СВЭ).

Цель статьи — системный анализ режимов работы внешнего и тягового электроснабжения и выбор параметров и мест размещения устройств компенсации, позволяющих обеспечить энергосбережение в тяговых сетях переменного тока и экономичность процесса перевозок.

Сравнительная оценка регулируемых установок компенсации реактивной мощности. В зависимости от способов регулирования рассмотрим следующие группы перспективных регулируемых КУ и УПК для тягового электроснабжения:

- 1. Плавно регулируемая установка КУ с нерегулируемой конденсаторной батареей и с параллельно включенным трансреактором, регулируемым тиристорным блоком, и фильтрами для снижения гармоник, образованных работой тиристорного блока.
- 2. Ступенчато регулируемая КУ с несколькими переключаемыми секциями конденсаторных батарей.
 - 3. Переключаемые УПК.

В настоящее время в тяговых сетях, сетях 35 кВ и выше применяются схемы с реактором, регулируемом тиристорами (СТК), рис.1,a. Изменяя угол регулирования тиристоров от 0 до $\pi/2$, изменяется величина тока, протекающая через реактор, от номинального значения до нуля. Недостаток схемы с управляемыми тиристорами — наличие высших гармоник в токе, который потребляется реактором из сети. В схеме с реактором, управляемом тиристорами, обязательно должны быть фильтры Φ , настроенные на нечетные гармоники [10, 11].

Вместо реактора может применяться реактортрансформатор для снижения напряжения на коммутируемых тиристорах. Проект этой схемы выполнен в Словакии для тягового электроснабжения. Известны схемы с включением КБ через понижающий трансформатор (автотрансформатор), обеспечивающие возможность работы СТК на пониженном напряжении.

© И.В. Доманский

СТК мощностью 10 Мвар и напряжением 25 кВ с реакторной группой ТРГ, управляемой тиристорами, и мощными фильтро-компенсирующими цепями введен в эксплуатацию на участке тяговой сети 25 кВ с односторонним питанием в Chathill (Англия). В часы пик потеря напряжения в конце линии составляла 8-9 кВ, установка СТК обеспечила снижение потери напряжения на 3 кВ при максимальной мощности нагрузки.

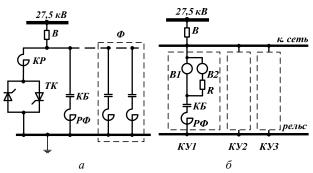


Рис. 1. Регулируемые КУ с плавной регулировкой (a), и ступенчатые (б): КР — компенсирующий реактор; Φ — фильтро-компенсирующие цепи; Р Φ — фильтровый реактор; ТК — тиристорный компенсатор

На тяговой подстанции Villenoy (Франция) в 2003 г. включены три однофазных СТК на каждую фазу с тем, чтобы дополнительно снижать несимметрию тяговой нагрузки путем пофазного регулирования мощности СТК.

Украинские железные дороги также имеют опыт применения плавно регулируемой установки КУ. Так на тяговой подстанции Александрия Одесской железной дороги в 2009 г. введено в работу три установки КУ (производитель ČKD ELEKTROTEXNIKA), общей мощностью 18,4 Мвар, (рис. 1,а). В фазу А и фазу В включены регулируемые установки СТК с конденсаторами типа CUEFS 23-8.7/600/WF и реакторами компенсирующим и декомпенсирующим соответственно KTL-182/155 и KTL-192/210 с $Q_A = 7609$ квар и $Q_B = 7565$ квар. Нерегулируемая установка КУ с конденсаторами КЭК1-1,05-63-1У1 и реактором ФРОМ-3200/35 У1, мощностью Q = 5699 квар включается в фазу А или В. Для обеспечения компенсации (декомпенсации) реактивной мощности и фильтрации высших гармонических составляющих напряжения и тока применяется общая схема динамической компенсапри которой преобразователь СОМРАСТ осуществляет регулировку величины фазного тока декомпенсирующих реакторов. В основе этой системы - блок полупроводникового преобразователя, который включает в себя оптотиристры с защитными резисторно-конденсаторными элементами и блок сигнализации. До установки КУ среднесуточное потребление электроэнергии тяговой подстанции в 2009 г. составляло S = 250-j80 MBA, tg ϕ =0,32. Для такой нагрузки, установленные мощности конденсаторов (18,4 Мвар) превышают правильно рассчитанные по реактивной мощности, режиму напряжения, несимметрии, гармоникам в несколько раз [10]. В частности, мощность потерь только в стали сердечников реакторов ФРОМ-3200/35 У1составляет 10,5 кВт.

Известный вариант регулируемых КУ – ступенчатые, когда КУ состоит из нескольких секций и в зависимости от регулируемого параметра (напряжение, ток, реактивная мощность и т.д.) включаетсяотключается очередная секция (рис. 1,6, секции КУ1, КУ2, КУ3). В каждой секции включены конденсаторная батарея КБ, реактор РФ и главный выключатель В1 с демпфирующей цепочкой В2 – R. Задача демпфирующей цепи снизить до допустимых значений броски тока и напряжения при включении одиночной секции и при включении очередной секции параллельно включенным секциям.

Из секций формируются ступени мощности КУ. Обычно значения мощностей секций КУ соответствуют геометрической прогрессии (например, 2, 4, 8). В частности, если КУ состоит из двух секций 2 и 4 Мвар, то формируются следующие три ступени мощности: 2, 4 и 2 + 4 = 6 Мвар. В качестве секций могут быть секции КУ включены или фильтркомпенсирующие устройства (ФКУ). Типовой вариант двухрезонансной ФКУ в целом соответствует предъявленным требованиям в договорах электроснабжения, однако отличается высоким значением соотношения установленной к полезной мощности (2,25) и высокой стоимостью. Заслуживает внимания схема установки КУ с функцией фильтрации высших гармоник КУф модульного типа [12].

Необходимость модульного построения диктуется тем, что в общем случае степень необходимого снижения потребляемой реактивной мощности и высших гармонических составляющих тока (напряжения) в соответствии с нормативами на каждой тяговой подстанции различна. Поэтому в ФКУ должна быть возможность изменения соответствующих параметров путем включения (отключения) соответствующих модулей. Проблема отключения КУ в настоящее время решена: вакуумные выключатели надежно отключают емкостные токи КУ без бросков тока и напряжения. Поэтому основное внимание при переходных режимах обращают на процессы включения устройств. Таким образом, наряду с компенсацией реактивной мощности обеспечивается электромагнитная совместимость СТЭ с СВЭ, ЭПС, с цепями автоматики и телемеханики и устройствами проводной и радио связи.

Установка УПК для СТЭ с непрерывно изменяющимися нагрузками - мощное техническое решение повышения и стабилизации напряжения на токоприемнике ЭПС грузонапряженных участков железных дорог. Для повышения напряжения на токоприемниках ЭПС, а также для симметрирования напряжения на шинах 27,5 кВ УПК следует включить в отсасывающую линию тяговой подстанции (рис. 2). УПК должна быть, как правило, переключаемой с двумя секциями. При работе одного трансформатора работает одна секция, которая определяет первую ступень УПК по сопротивлению и мощности. При работе двух трансформаторов подключается вторая секция, и тем самым совместно с первой секцией формирует вторую ступень УПК. Если на подстанции всегда в работе один трансформатор, то УПК должна содержать одну секцию. С ростом сопротивления X_S СВЭ повышается эффективность работы УПК. С учетом опыта работы УПК рекомендуется устанавливать ее на тяговых подстанциях, где сопротивление X_S больше 0,5 Ом.

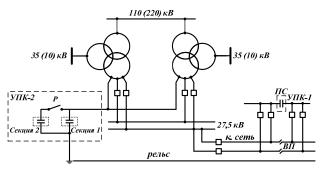


Рис. 2. Продольная емкостная компенсация в СТЭ

Целесообразность такого способа включения была проверена многолетним опытом эксплуатации на Горьковской и Восточно-Сибирской ж.д. Такой способ включения повышает уровень напряжения в контактной сети (особенно на плече питания от отстающей фазы), и, что очень важно, симметрирует напряжение на шинах 27,5 кВ. В результате снижается несимметрия напряжения на линиях ДПР и АБ (автоблокировки) [13, 14].

Известно, что нормативы по показателям качества электрической энергии относятся к шинам балансовой принадлежности (для тяговых подстанций, к шинам 110 (220) кВ). Несимметрия и несинусодальность на этих шинах зависит не только от тяговой нагрузки, но и растет от увеличения X_S СВЭ. Реализация энергоэффективного режима СТЭ и возможный разброс X_S СВЭ требует применения устройства контролирующего X_S .

Опыт эксплуатации УПК в странах Западной Европы и России показывает, что нет необходимости в большой степени компенсации УПК: во первых, при больших нагрузках включается второй трансформатор и уменьшается сопротивление подстанции; во вторых, большая степень компенсации УПК приводит к большим уравнительным токам по тяговой сети и перегрузке трансформаторов тяговых подстанций. Поэтому следует по возможности снижать степень компенсации до допустимого значения K = 0,7.

Далее ограничимся рассмотрением двух вариантов регулируемых КУ (плавно и ступенчато) для тяговой сети переменного тока. Краткая характеристика и оценка указанных вариантов по критериям стабилизации напряжения, компенсации реактивной мощности и снижению потерь электроэнергии в СТЭ показывает:

1. Краткая характеристика. Вариант 1. Главное преимущество — плавное регулирование компенсирующей (емкостной) реактивной мощности с заданным быстродействием, реагирует на реальный график тяговой нагрузки. При этом практически отсутствуют броски тока и напряжения при регулировании реактивной мощности. Для реализации плавно регулируемой установки введено следующее силовое оборудование, что определяет повышенную стоимость установки: нерегулируемая КУ с резонансной настройкой

на 150 Гц; трансреактор; тиристорный регулятор; фильтры снижения гармоник; коммутационная аппаратура указанного оборудования. Вариант 2. Главное преимущество – простота исполнения, что определяет пониженную стоимость установки. Указанное КУ выполнено с демпфирующим устройством, обеспечивающим коммутацию секций с допустимыми бросками тока и напряжения. Оборудование установки: ступенчатая регулируемая с несколькими секциями конденсаторных батарей, настроенными на 150 (250) Гц (не более 2-3 секций); коммутационная аппаратура для секций. Так как регулирование происходит путем включения-отключения секций коммутационным аппаратом (принимаем однофазный вакуумный выключатель 27,5 кВ), то важно определить ресурс выключателя при коммутации секций КУ. По паспортным данным электрический ресурс коммутационной стойкости: при номинальном токе (1250 A) – 20000 циклов ВО. Механический ресурс - 60000 циклов ВО (при условии замены вакуумных камер с механическим ресурсом 30000 циклов). Срок службы выключателя – 30 лет. Следует учесть, что выключатель отключаетвключает активно-емкостной ток секции не более 200 А (при включении-отключении секции вводится резистор 80 Ом). Поэтому реальный электрический ресурс будет значительно больше (30000-40000 циклов и более). Если считать, что в течение суток будет происходить 10-20 переключений выключателя одной секции, то камеры следует заменить через (30000-40000)/[(10-20)×30×12] = 5,5-8 лет. Указанный срок работы установки свидетельствует на приемлемость этого варианта для эксплуатации.

- 2. Стабилизация напряжения в тяговой сети. Допустимое напряжение на токоприемнике грузового ЭПС 21-29 кВ [7]. Поэтому быстродействие КУ с тиристорным регулятором СТК не имеет решающего преимущества. Единственно, что важно учесть - резкое повышение напряжения сверх нормированного 29 кВ при сбросе тяговой нагрузки. Но в этом случае должна работать защита КУ без выдержки времени. Таким образом, с точки зрения поддержания напряжения на токоприемнике нет необходимости в быстродействии КУ и для условий эксплуатации достаточно использовать ступенчатое регулирование КУ. Следует учесть, что главная составляющая доходной части регулирования КУ, необходимая для техникоэкономических расчетов, составляет эффект в эксплуатационной работе железных дорог от повышения и стабилизации напряжения.
- 3. Компенсация реактивной мощности. При расчете КУ по критерию повышения пропускной способности железнодорожных участков по напряжению всегда будет обеспечена компенсация реактивной мощности до нормативных значений. Поэтому с этой точки зрения, рассматриваемые варианты идентичны.
- 4. Снижение потерь электроэнергии. Здесь следует рассмотреть снижение потерь мощности при переходе от нерегулируемых КУ к регулируемым, что подробно рассмотрено в [10]. С учетом специфики изменяющейся тяговой нагрузки указанное снижение сравнительно небольшое и составляет несколько процентов от полных потерь мощности без КУ. Причем

с ростом пропускной способности эффект снижения потерь от регулирования реактивной мощности снижается и вряд ли стоит ориентироваться на окупаемость регулирования КУ за счет дополнительного снижения потерь мощности. Вместе с тем потери мощности в КУ с тиристорным регулированием (вариант 1) на порядок и более превышают потери в ступенчато регулируемой КУ (вариант 2). Вполне возможно, что при тщательном сравнительном расчете вариантов окажется, что потери мощности в тяговой сети при включении СТК будут превосходить потери мощности при отключенном её состоянии.

5. Технико-экономические расчеты показывают, что для тяговых сетей отечественных железных дорог в настоящее время применение СТК связано с большими капитальными вложениями, что определяет большие сроки окупаемости инвестиций (более 10-15 лет). Поэтому применение СТК в тяговом электроснабжении требует упрощения и удешевления, прежде всего тиристорно-реакторной группы регулирования. В тоже время нормативные документы для тягового электроснабжения допускают большой разброс напряжений на токоприемнике ЭПС: 21(24) – 29 кВ, а быстродействие СТК в регулировании напряжения не имеет решающего значения для работы ЭПС. Поэтому естественно желание применить более простые технические решения для регулирования мощности КУ в тяговых сетях.

6. Перспективы применения вариантов. Регулируемая КУ с тиристорным регулятором СТК (вариант 1) не имеет решающего технического преимущества перед ступенчато регулируемым КУ. В то же время стоимость КУ с тиристорным регулированием СТК в 4-6 раз и более превышает стоимость ступенчато регулируемую КУ. На современном этапе и в ближайшей перспективе для массового внедрения регулируемых КУ в тяговой сети целесообразен вариант 2 схемы ступенчатого регулирования КУ.

Методика выбора параметров и мест размещения установок поперечной компенсации в СТЭ. Известно, что компенсация реактивной мощности направлена в основном на экономию (уменьшение потерь) при эксплуатации тяговых сетей и одновременно на улучшение качества напряжения. Для нахождения наилучшего решения необходимо сопоставлять стоимость установки компенсирующих устройств и дополнительной аппаратуры к ним (с учетом расходов на эксплуатацию) с экономией на стоимости потерь в тяговых сетях, а также с выигрышем, полученным за счет улучшения качества напряжения ЭПС и нетяговых потребителей. Эффективный вариант компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки - распределенная система КУ в тяговой сети, когда КУ включены на постах секционирования и на тяговых подстанциях (рис. 3).

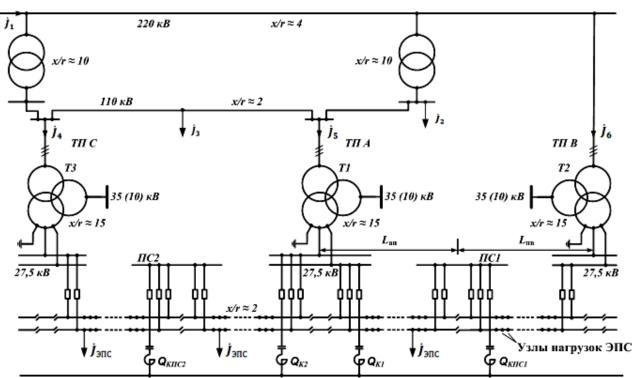


Рис. 3. Фрагмент внешнего электроснабжения тяговой сети с распределенной поперечно емкостной компенсацией

Для выбора номинальной мощности КУ следует выполнить расчет наименьшего действующего напряжения на токоприемнике ЭПС для заданных размеров движения по нормальной (проектной) схеме СТЭ с учетом сгущения поездов в интенсивный час. Расчеты во всех случаях следует выполнять с использованием программных комплексов с имитацией взаимосвязанных мгновенных схем движущихся нагру-

зок ЭПС [2, 8, 9, 15]. Так для каждой из межподстанционных зон рассматриваемого участка (рис. 3) при заданных размерах движения и нормальной схеме питания определяется фактическое наименьшее напряжение на токоприемнике ЭПС $U_{\text{мин.ф.}}$:

$$\dot{U}_{\text{мин.}\Phi.} = \left(\sum_{i=1}^{n} \dot{U}_{\text{III}i} - \Delta \dot{U}_{\text{max}i}\right) / n, \qquad (1)$$

где $\dot{U}_{\mathrm{m}i}$ – мгновенное значение напряжения на шинах тяговой подстанции; $\Delta \dot{U}_{\mathrm{max}i}$ – мгновенное максимальное падение напряжения в векторе $\Delta \hat{U}$ падений напряжений от узлов нагрузок ЭПС до базисного узла; п - количество решенных мгновенных схем за время моделирования T.

Падение напряжения на участке сети от любого узла до базисного находится по выражению

$$\Delta \dot{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{M}_{at}^{-1} \dot{\boldsymbol{U}}_{a} \,, \tag{2}$$

где \boldsymbol{M}_{at}^{-1} – транспонированная обратная первая матинциденций дерева ДЛЯ $\dot{m{U}}_{lpha} = m{Z}_{lpha} \, \dot{m{I}}_{Blpha} - \dot{m{E}}_{lpha}$ – вектор падения напряжения на ветвях дерева схемы; \dot{E}_{α} – э.д.с. в ветвях дерева схемы. Здесь для определения токов в ветвях схемы по известным нагрузкам поездов и нагрузкам внешней системы электроснабжения используется выражение

$$\dot{\boldsymbol{I}}_{B} = \boldsymbol{N}_{t} \left\{ (\boldsymbol{N} \boldsymbol{Z}_{B} \boldsymbol{N}_{t})^{-1} \left[\boldsymbol{N} \left(\dot{\boldsymbol{E}}_{\zeta} + \dot{\boldsymbol{E}}_{\tau} \right) - \boldsymbol{N} \boldsymbol{Z}_{B} \begin{pmatrix} \boldsymbol{M}_{\alpha}^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\boldsymbol{J}} \right] \right\} + \left(\boldsymbol{M}_{\alpha}^{-1} \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\boldsymbol{J}}, \tag{3}$$

где $M_{\mathrm{m} \times \mathrm{n}}$ и $N_{\mathrm{k} \times \mathrm{n}}$ – первая и вторая матрицы инциденций; m – количество узлов; n – количество ветвей; k = n - m – количество независимых контуров; \mathbf{Z}_{B} – матрица сопротивлений ветвей; $\dot{\boldsymbol{J}} = (\dot{\boldsymbol{J}}_1, \dot{\boldsymbol{J}}_2, ..., \dot{\boldsymbol{J}}_m)$ – вектор задающих токов; $\dot{\boldsymbol{E}}_{\xi}$ – вектор э.д.с. в ветвях дерева и хорд без трансформаций; $\dot{\boldsymbol{E}}_{\tau}$ – вектор э.д.с. в ветвях дерева и хорд с трансформациями; M_{α}^{-1} – обратная матрица инциденций для дерева схемы. Здесь элементы τ в векторах \dot{E}_{τ} и \dot{I}_{B} связанные зависимостями $\dot{E}_{lpha au}=\dot{K}\,\dot{E}_{eta au}$ и $-K\,\dot{I}_{lpha au}=\dot{I}_{eta au}$ где \dot{K} — квадратная матрица коэффициентов трансформации размерностью т; α – ветви дерева схемы; β – ветви хорд схемы; ξ – ветви дерева и хорд не связанные с трансформациями.

В задачах, не требующих расчета токораспределения, вектор падения напряжения определяется по формуле:

$$\Delta \dot{\boldsymbol{U}} = \dot{\boldsymbol{Y}}^{-1} \, \dot{\boldsymbol{J}} \,\,, \tag{4}$$

где $\dot{Y} = M Z_B^{-1} M_t$ – матрица узловых проводимостей.

Вначале принимаем вариант с размещением КУ на постах секционирования (на рис. 3 $Q_{\rm K\Pi C1}$ и $Q_{\rm K\Pi C2}$). Расчетная мощность КУ, необходимая для повышения напряжения до нормированного значения Q^*_{κ} , определяется разностью наименьших значений нормированного и фактического действующего напряжения на токоприемнике ЭПС ($U_{\text{мин.норм.}} - U_{\text{мин.ф.}}$) и входным индуктивным сопротивлением до КУ (X_{BX}) по формуле, Мвар:

$$Q_{\text{к}}^* = U_{\text{ном}}^2 \left(U_{\text{мин.норм.}} - U_{\text{мин.ф.}} \right) / \left(U_{\text{мин.норм.}} \cdot X_{\text{вх}} \right)$$
, (5) где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение КУ ($U_{\text{ном}}$ = 27,5 кВ); $X_{\text{вх}}$ – входное индуктивное сопротивление до КУ.

Входное индуктивное сопротивление до КУ поста секционирования при двустороннем питании контактной сети от смежных подстанций ТП А и ТП В (рис. 3) определяется по формуле, Ом:

$$X_{\rm BX} = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{\mathbf{A} + \mathbf{B}},\tag{6}$$

где A = $X_{\text{тс.a}}$ + $2X_{\text{тр.a}}$ + $2X_{\text{с.a}}$, B = $X_{\text{тс.в}}$ + $2X_{\text{тр.в}}$ + $2X_{\text{с.в}}$; $X_{\text{тс.a}}$ и $X_{\text{тс.в}}$ – индуктивные сопротивления тяговой сети соответственно от подстанций ТП А и ТП В до КУ, Ом; $X_{\text{тр.а}}$ и $X_{\text{тр.в}}$ – индуктивные сопротивления включённых в работу трансформаторов на подстанциях ТП А и ТП В, Ом; $X_{c.a}$ и $X_{c.b}$ – индуктивные сопротивления системы внешнего электроснабжения соответственно до подстанций ТП А и ТП В, Ом.

Индуктивное сопротивление включенных в работу трансформаторов на подстанции ТП А (ТП В) определяется по формуле, Ом:

$$X_{\rm TP} = U_{\rm K3} \cdot U_{\rm HOM}^2 / 100 \cdot n \cdot S_{\rm TP} ,$$
 (7)

где U_{κ_3} – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение трансформатора ($U_{\text{ном}}$ = 27,5 кВ); $S_{\text{тр}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А, п - количество включённых в работу трансформаторов.

Индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения определяется по формуле, Ом:

$$X_{\rm c} = U_{\rm HOM}^2 / S_{\rm K3} , \qquad (8)$$

 $X_{\rm c} = U_{\rm HOM}^2 \big/ S_{\rm K3} \;, \tag{8}$ где $S_{\rm K3}$ – мощность трехфазного короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговой подстанции, МВ·А.

Индуктивное сопротивление тяговой сети для узловой схемы питания (рис. 3) определяется по формуле:

$$X_{ca} = x_{22} \cdot L_{au}; \quad X_{cB} = x_{22} \cdot L_{uB},$$
 (9)

 $X_{\rm c.a} = x_{22} \cdot L_{\rm an}; \quad X_{\rm c.B} = x_{22} \cdot L_{\rm пв},$ (9) где $x_{22} = 0,278$ Ом/км — удельное индуктивное сопротивление для узловой схемы питания с контактной подвеской состоящей из несущего троса, контактного провода и рельсовой сети; $L_{\rm an}$ и $L_{\rm ns}$ – расстояния до поста секционирования соответственно от подстанций ТП А и ТП В.

Для предотвращения частых отключений КУ посекционирования от повышенного напряжения при малых нагрузках в тяговой сети номинальная мощность КУ не должна превышать среднюю реактивную мощность тяговой нагрузки рассматриваемой межподстанционной зоны (Q_{TC}):

$$Q_{\text{KIIC}} \leq Q_{\text{TC}}.$$
 (10)

Для межподстанционной зоны, например, между подстанциями ТП А и ТП В (рис. 3) средняя реактивная мощность определяется по формуле, Мвар:

$$Q_{\text{тс}} = (W_{Q_{\text{TC},B}} + W_{Q_{\text{TC},B}}) / (24 \cdot D_{\text{H}}),$$
 (11) где $W_{Q_{\text{TC},a}}$ – расход реактивной энергии в тяговой сети от подстанции ТП А за интенсивный месяц, Мварч; $W_{Q_{\text{TC},B}}$ – то же от подстанции ТП В; D_{H} – число суток

интенсивного месяца. Значения $W_{Q_{\mathrm{TC},\mathrm{B}}}$ и $W_{Q_{\mathrm{TC},\mathrm{B}}}$ определяются: для проектируемых участков - по результатам тяговых и электрических расчётов; для участков, находящихся в эксплуатации - по данным технического учёта элек-

троэнергии.

Если неравенство (10) не выполняется, то номинальную мощность КУ, размещаемого на посту секционирования, ограничивают значением, не превышающим $Q_{\text{тс}}$, и предусматривают дополнительное КУ на одной из смежных тяговых подстанций.

Для определения мощности КУ, размещаемого на тяговой подстанции, повторяют расчёт по формуле (5),

учитывая в составе исходных данных выбранную мощность КУ на посту секционирования. При этом следует определить не только значение $U_{\text{мин.ф.}}$, но и место межподстанционной зоны, в котором это значение наиболее вероятно.

Дополнительное КУ необходимо разместить на той из двух тяговых подстанций, которая питает данную межподстанционную зону отстающей фазой. Если отстающие фазы с обеих сторон данной межподстанционной зоны, то для размещения КУ выбирают тяговую подстанцию, ближайшую к тому месту межподстанционной зоны, в котором значение $U_{\text{мин.ф.}}$ наиболее вероятно.

При выполнении расчётов применительно к эксплуатируемым участкам железных дорог достоверность исходных данных, подлежащих использованию при расчётах, должна быть проверена путём измерений. Окончательный выбор параметров и мест размещения КУ следует выполнять путём сравнения их стоимостных показателей.

Имитационное моделирование и анализ режимов работы СТЭ и СВЭ. Параллельно работающие электротяговая сеть 27,5 кВ и сеть 110 или 220 кВ (рис. 3) разнородны (имеют различные отношения реактивного сопротивления к активному, X/R) и передача мощности по ним происходит при увеличенном значении потерь активной мощности и энергии, то есть при сниженной экономичности работы сети в целом. Для приведенной схемы, условия нагрева проводов сети низшего напряжения ограничивают пропускную способность всей сети. Часть сети более высокого напряжения (220 кВ, 110 кВ) недогружается, а часть сети с менее высоким напряжением перегружается. Переток мощности идет по тяговой сети.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы результаты тяговых расчетов и экспериментально измеренные нагрузки ЭПС, параметры СТЭ и СВЭ и размеры движения. При этом была принята вероятностная модель графика движения поездов. Имелась возможность имитации работы не регулируемых и регулируемых компенсирующих устройств, как на тяговой подстанции, так и на посту секционирования. Использовался принцип последовательного моделирования взаимосвязанных мгновенных схем нагрузок ЭПС (рис. 3).

Результаты имитационного моделирования активных и реактивных потерь энергии получены для типичной межподстанционной зоны двухпутного участка с узловой схемой питания, среднестатистической длины (44 км), с колебаниями напряжения на шинах 27,5 кВ, ΔU max = ΔU min = 1500 В и средним квадратичным отклонением $\sigma_0 = 300$ В. Сопротивление тяговой сети определяется изменением типов подвесок ПБСМ70+МФ100 и ПБСМ95+МФ100 при рельсах Р65. Максимальная разнотипность поездов составляет 8 типов, в том числе пассажирский массой 1000 т, порожний массой 1200 т, грузовые поезда с массой 2000, 2500, 3000, 3500 и 4000 т, а минимальная - два типа: пассажирский и грузовой средневзвешенный. Степень использования пропускной способности N/N0 изменяется от 0,53 до 0,8. Отношение времени хода поезда по фидерной зоне ко времени его хода под током α изменяется в пределах от 1,2 до 1,8 по нечетному пути и от 1,15 до 2,1 по четному.

Потери энергии на выбранной зоне исследованы путем проведения многовариантных расчетов полнофакторного эксперимента при имитации работы системы тягового электроснабжения в течение суток. Предварительный анализ позволил выделить влияющие на потери энергии факторы: X_1 — уравнительный ток; X_2 — сопротивление тяговой сети; X_3 — степень использования пропускной способности; X_4 — разнотипность поездов; X_5 — отношение полного времени хода поезда по межподстанционной зоне ко времени его хода под током.

Учет фактора изменения тока компенсирующего устройства зависит от места расположения компенсирующего устройства. В этой связи целесообразно было исследовать на имитационной модели влияние изменения тока компенсирующего устройства на потери энергии при нахождении остальных факторов на средних уровнях. Результаты режимов работы СТЭ на имитационной модели приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 Процент Суточные потери Ток компен-Суточный расактивсирующего ход энергии на энергии на зоне, ных устройства, А зоне, МВ·А·ч кВ·А·ч потерь, % Схема узлового питания с КУ на посту секционирования 0 129,0+i102,21615,9+*j*3532,2 1,25 1,21 1,24 25 129,3+j86,2 1564,4+*j*3412,1 50 1609,7+*j*3476,6 129,6+*j*69,9 1,52 100 130,4+*j*37,2 1987,4+*j*4179,5 Схема узлового питания с КУ в отстающей фазе тяговой подстанции 128,8+j102,1 1594,1+*i*3496,4 1,24 50 128,7+*j*69,7 1582,6+*j*3473,8 1.23 100 128,4+*j*36,9 1571,7+*j*3457,6 1,22

Таблица 2

		Таблица 2			
П	Значения параметров при коэффициенте неравномерности нагрузки путей 1,05				
Параметры	без учета уравнительных токов и КУ	с учетом уравнительных токов и КУ			
Суточный расход энергии на зоне, МВ·А·ч	154,5+ <i>j</i> 134,0 154,5+ <i>j</i> 134,0	157,65+ <i>j</i> 624,8 157,65+ <i>j</i> 624,8			
Суточные потери энергии на зоне, кВ·А·ч	1894,5+ <i>j</i> 4158,0 1788,0+ <i>j</i> 3972,0	2262,0+j5016,0 2158,0+j4838,0			
Процент активных потерь	1,22 1,16	1,43 1,37			
Снижение активных потерь энергии при при- менении схемы с тремя пунктами параллельного соединения, %	5,6	4,6			
То же реактивных, %	4,3	3,5			
Примечание. В числител	е для схемы узлов	вого питания;			

Примечание. В числителе для схемы узлового питания; в знаменателе – для параллельной схемы.

Анализируя данные табл. 1 и 2, можно сделать вывод о различной степени влияния на активные и реактивные потери энергии изменений токов компенсирующих устройств, схемы питания и уравнительного

тока. Если наименьшее напряжение $U_{\text{мин, ф}}$ на ЭПС меньше $U_{\text{мин, норм}}$ (21 кВ), а при скоростном движении (24 кВ), то установленная на посту секционирования КУ обеспечивает добавку напряжения до нормированного значения $\delta U_{\text{ку}} = U_{\text{мин, норм}} \cdot X_{\text{вх}} / X_{\text{ку}}$, где $X_{\text{ку}}$ – реактивное сопротивление компенсирующей установки, Ом.

Основное преимущество КУ на посту секционирования — эффективное снижение потерь напряжения и потерь мощности в контактной сети, что приводит к усилению пропускной способности электрифицированной линии. В тоже время существенным ограничением является необходимость постоянного обслуживания КУ вдали от ремонтных баз.

Преимущество КУ на тяговых подстанциях – более простые условия эксплуатации и меньшие затраты на обслуживание. В связи с более стабильным напряжением на шинах 27,5 кВ (по сравнению с напряжением на посту секционирования) генерируемая мощность больше на 20-30 %.

Распределенная система КУ в тяговой сети позволяет путем отключения, включения КУ регулировать напряжение и реактивную мощность и минимизировать перетоки мощности по тяговой сети (рис. 4).

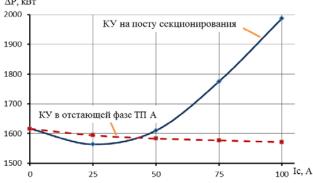


Рис. 4. Зависимость потерь энергии от тока КУ

В результате анализа полученных данных установлено:

- Наибольшее влияние на потери энергии оказывает уравнительный ток. Так, при наличии на межподстанционной зоне среднего уравнительного тока 100 А потери активной энергии увеличиваются на 57,9 %, а реактивной на 59,4 % по сравнению с вариантом, когда уравнительный ток отсутствует.
- Переход от схемы узлового питания к схеме параллельного питания при наличии уравнительного тока и работе компенсирующих устройств уменьшает потери активной энергии всего лишь на 4,6 %, а реактивной на 3,5 %. Дальнейшее увеличение числа параллельных соединений до 5 на фидерную зону уменьшает потери энергии на 2 %.
- Установка КУ в отстающей фазе тяговой подстанции с емкостным током 100 А позволяет снизить суточные потери активной и реактивной энергии на фидерной зоне с узловой схемой питания на 2,8 и 2,1 % соответственно. При установке КУ на посту секционирования с емкостным током 25 А активные потери снижаются на 3,2 % и реактивные на 3,4 %.

Выволы.

1. Технико-экономические расчеты показывают, что в настоящее время для тяговых сетей отечествен-

ных железных дорог применение плавно регулируемой установки КУ с нерегулируемой конденсаторной батареей и с параллельно включенным трансреактором, регулируемым тиристорным блоком, и фильтрами для снижения гармоник связано с большими капитальными вложениями, что определяет большие сроки окупаемости инвестиций (более 10-15 лет). Наиболее перспективными для тягового электроснабжения на сегодня являются ступенчато регулируемые устройства компенсации реактивной мощности.

2. Для эффективного применения устройств компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения переменного тока необходимо разработать нормативно-правовую документацию о необходимости применения и порядке выбора параметров и мест размещения устройств поперечной и продольной компенсации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *I.* Енергетична стратегія Укрзалізниці на період до 2015 р. і на перспективу до 2020 р. Затв. державною адміністрацією залізничного транспорту України 26.11.2013 р. К., 2013. 104 с.
- **2.** Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
- Рене Пелисье. Энергетические системы: пер. с франц. [предисловие и комент. В.А. Веникова]. – М.: Высш. шк., 1982. – 568 с.
- **4.** Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.
- **5.** Мамошин Р.Р., Герман Л.А. Выбор типа компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения // Вестник ВНИИЖТ. 1990. №5. С. 26-29.
- **6.** Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
- 7. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009: Затв. Наказ Укрзалізниці 24.12.2004 р., № 1010-ЦЗ. / Мін-во трансп. та зв'язку України. К., 2005. 80 с.
- 8. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор). К.: Транспорт Украины, 2004. 196 с.
- 9. Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте // Материалы 6-го межд. симпозиума «Элтранс-2011». — СПб.: ПГУПС, 2013. — 584 с.
- **10.** Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 315 с.
- 11. Статические компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей. Сб. статей. Под ред. В.И. Кочкина. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2010. 296 с.
- 12. Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Мизинцев А.В. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИ-ИЖТ. -2013. -№5. -C. 56-62.
- 13. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. -2013. -№2. С. 12-17.
- 14. Молин Н.И., Соколовский И.А., Щербаков В.С. Установка продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения переменного тока // Материалы 5-го межд. симпозиума «Элтранс-2009». СПб.: ПГУПС, 2010. С. 155-165.

15. Доманський І.В. Перспективи розвитку схемо-технічних рішень зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №5(979). – С. 54-65.

REFERENCES

- 1. Energetichna strategija Ukrzaliznici na period do 2015 r. i na perspektivu do 2020 r. Zatv. derzhavnoju administracieju zaliznichnogo transportu Ukrainu 26.11.2013 r. [Energy Strategy Railways for the period up to 2015 and for the future by 2020. Approved by State Administration of Railway Transport of Ukraine 11.26.2013]. Kyiv, 2013. 104 p. (Ukr).
- **2.** Markvard K.G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p. (Rus).
- 3. Rene Pelis'e. *Energeticheskie sistemy: per. s franc. predislovie i koment. V.A. Venikova* [Energy Systems: translation from French. Foreword and comments by V.A. Venikov]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 568 p. (Rus).
- 4. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. *Kondensatornye ustanovki elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Condenser units for electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983. 183 p. (Rus).
- 5. Mamoshin R.R., German L.A. Selecting the type of compensating device in the traction power supply. *Vestnik VNIIZhT Vestnik of Railway Research Institute*, 1990, no.5, pp. 26-29. (Rus).
- 6. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektrojenergii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo elektrojenergii* [Loss of electricity. Reactive power. Power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p. (Rus).
- 7. Pravila ulashtuvannja sistemi tjagovogo elektropostachannja zaliznits Ukrainy. № CE-0009: Zatv. Nakaz Ukrzaliznici 24.12.2004 r., № 1010-CZ. Min-vo transp. ta zvyazku Ukrainy [Terms ordering system traction power railways of Ukraine. Number IS-0009. Approved Order Railways 24.12.2004., no.1010-CH. Ministry of Transport and Communications of Ukraine]. Kyiv, 2005. 80 p. (Ukr).
- 8. Kornienko V.V., Kotel'nikov A.V., Domanskyi V.T. *Elektrifikacija zheleznyh dorog. Mirovye tendencii i perspektivy (Analiticheskij obzor)* [Electrification of railways. Global trends and perspectives (Analytical review)]. Kyiv, Transport of Ukraine Publ., 2004. 196 p. (Rus).
- 9. Electrification and energy infrastructure traction trains in railway transport. *Materialy 6 mezhd. simpoziuma «ELTRANS-2011»* [Proceedings of the 6th Int. symposium «ELTRANS-2011»]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2013, 584 p. (Rus).
- 10. German L.A., Serebryakov A.S. Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tjagovogo elektrosnabzhenija zheleznyh dorog: ucheb. posobie [Adjustable capacitive compensation systems, traction power supply of railways: a tutorial]. Moscow, FGBOU «Training Center on Education for rail transport» Publ., 2013. 315 p. (Rus).
- 11. Kochkin V.I. Staticheskie kompensatory reaktivnoj moshhnosti dlya elektricheskih setey. Sb. statey [Static var compensator for electrical networks. Collection of articles]. Moscow, Alex-CM Publ., 2010. 296 p. (Rus).
- 12. German L.A., Serebryakov A.S., Goncharenko V.P., Mizincev A.V. The effectiveness of filter-devices in traction AC. Vestnik VNIIZhT Vestnik of Railway Research Institute, 2013. no.5, pp. 56-62. (Rus).

- 13. German L.A., Goncharenko V.P. Modern longitudinal capacitive compensation scheme in the traction power supply. Vestnik RGUPS Bulletin of Rostov State Transport University, 2013. no.2. pp. 12-17. (Rus).
- *14.* Molin N.I., Sokolovskiy I.A., Shcherbakov V.S. Installing longitudinal capacitive compensation system traction power supply AC. *Materialy 5 mezhd. simpoziuma «ELTRANS-2009»* [Proceedings of the 5th Int. symposium «ELTRANS-2009»]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 155-165. (Rus).
- 15. Domanskyi I.V. Prospects of development schemes and technical solutions to external power railway traction substations. Visnyk NTU «KhPI» Bulletin of NTU «KhPI», 2013, no.5(979), pp. 54-65. (Ukr).

Поступила (received) 09.02.2015

Доманский Илья Валерьевич, к.т.н., доц., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 067 9621995, e-mail: dvt_nord@mail.ru

I.V. Domanskyi

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Modes of operation of the system of traction power AC using reactive power compensation devices.

The paper presents a systematic analysis of existing methods of reactive power compensation. The study of operating modes of the systems external and traction power supply is carried out. The methodology for selecting promising compensation schemes and energy-saving in the traction networks AC electrified railway lines is offered. The comparative evaluation of prospective controlled compensation devices shows that use of seamlessly adjustable devices with unregulated condensing the battery and with parallel translator regulated with thyristor unit and with filters to reduce harmonics bond to the large capital investments. For traction networks of domestic railways payback period is more than 10-15 years. The most promising for traction power supply today is a stepwise adjustable devices of reactive power compensation. For the efficient allocation of investments in programs and projects of modernization of system traction power supply developed by the methodology of selecting parameters and places placement devices transverse compensation in the system traction power supply, which is based on the use of software systems with imitation of interconnected instant circuits moving loads of electric rolling stock. Based on the results of multiple calculations full factor experiment when simulating work of the systems traction power supply during the day marked the most influencing factors on energy-saving in process freight on electric traction and established the extent of their influence. These include the overflows of power, the resistance of traction network, reactive power compensation, power supply circuits and the organization of trains. Innovative technologies energy-saving railways from positions of consideration their close connection with the systems external power supply are proposed. References 15, tables 2, figures 4.

Key words: reactive power compensation, energy saving, system traction power supply, regimes work, influencing factors, energy security.

Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко, Г.М. Колиушко

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТА В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ УКРАИНЫ

На основі аналізу результатів зондування отримано статистичний розподіл кількості шарів ґрунту в місцях розташування енергооб'єктів України, розроблено рекомендації щодо застосування метода еквівалентування багатошарових геоелектричних структур при визначені нормованих параметрів заземлювальних пристроїв. Доведена необхідність створення математичної моделі заземлювального пристрою, розташованого в трьохшаровому ґрунті, а також нової установки для зондування ґрунту, котра дозволить збільшити глибину зондування, та засобів інтерпретації. Бібл. 5, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: трьохшарова геоелектрична структура, вертикальне електричне зондування, заземлювальний пристрій, ґрунт, енергооб'єкт.

На основании анализа результатов зондирования получено статистическое распределение слоистости грунтов в местах расположения энергообъектов Украины, разработаны рекомендации о применимости метода эквивалентирования многослойных геоэлектрических структур при определении нормируемых параметров заземляющих устройств. Доказана необходимость создания математической модели заземляющего устройства, расположенного в трехслойном грунте, а также новой установки для зондирования грунта, позволяющей увеличить глубину зондирования, и средств интерпретации. Библ. 5, табл. 4, рис. 7.

Ключевые слова: трехслойная геоэлектрическая структура, вертикальное электрическое зондирование, заземляющее устройство, грунт, энергообъект.

Постановка проблемы. Заземляющее устройство (ЗУ) электроустановок играет исключительно важную роль в обеспечении безопасности обслуживающего персонала и надежной работы оборудования.

При проведении электромагнитной диагностики (ЭМД) ЗУ [1], осуществляется следующий комплекс работ: определение реального расположения естественных и искусственных заземлителей, измерение нормируемых параметров (напряжения прикосновения, потенциала на ЗУ и сопротивления ЗУ), а также проведение вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) грунта.

Ввиду того, что значения нормируемых параметров ЗУ существенно зависят от электрофизических характеристик грунта, результаты ВЭЗ являются одними из важнейших исходных данных для проведения расчета ЗУ как в процессе проведения предпроектных изысканий, так и при контроле состояния ЗУ действующей электроустановки.

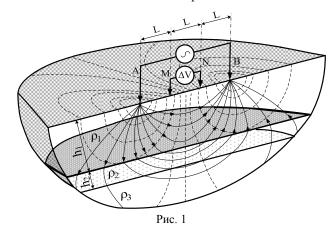
Накопленные данные (с 1997 по 2014 гг. сотрудниками НИПКИ «Молния» была проведена ЭМД ЗУ более чем для 1000 энергообъектов Украины) показывают, что существует значительный разброс удельных электрических сопротивлений (УЭС) и мощностей слоев, поэтому назрела необходимость анализа результатов зондирования грунта в местах расположения энергообъектов для последующего совершенствования программно-технических средств, используемых на расчетном этапе ЭМД ЗУ [2].

Методика проведения ВЭЗ при ЭМД ЗУ. Целью проведения ВЭЗ является определение параметров геоэлектрической структуры путем инжектирования испытательного тока с помощью генератора в грунт и измерения падения напряжения на определенном участке его поверхности. При этом длина разноса токовых и потенциальных электродов обуславливается типом установки и глубиной зондирования. Электрофизические характеристики (ЭФХ) грунта (количество слоев, их УЭС и мощность) определяют

с использованием различных средств интерпретации результатов экспериментальных измерений (палеток или специальных расчетных программ).

Наиболее широкое применение в рамках проведения ЭМД ЗУ получила четырехэлектродная симметричная установка, или т.н. установка Веннера (см. рис. 1). К ее достоинствам следует отнести:

- слабая чувствительность к профильным включениям:
- прямая зависимость между разносом электродов и глубиной зондирования;
- более простые выражения для расчета кажущегося удельного электрического сопротивления за счет равенства межэлектродного расстояния между токовыми и потенциальными электродами.



В установке используется питающая цепь, образованная генератором и токовыми электродами A, B, а также измерительная цепь, образованная вольтметром и потенциальными электродами M, N. Токовые электроды рассматриваются как два точечных источника тока, а величина кажущегося УЭС равна произведению измеренного сопротивления на геометрический

© Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко, Г.М. Колиушко

коэффициент установки. Глубина зондирования установки Веннера оценивается как расстояние между двумя ближайшими электродами [3], которое выбирается исходя из размеров ЗУ.

Формулы для определения кажущегося УЭС ρ как функции от величины разноса электродов L в многослойной среде с плоскопаралельными границами раздела для установки Веннера будут иметь вид:

• при двухслойной структуре:

$$\rho = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K_{2,1}^{n} \left[\frac{L}{\sqrt{L^2 + (2nh)^2}} - \frac{L}{\sqrt{4L^2 + (2nh)^2}} \right] \right\},$$

где h — глубина раздела слоев в двухслойной и общая мера в трехслойной моделях, $K_{2,1} = \left[(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1) \right]$ — коэффициент неоднородности, n — номер члена ряда, L — расстояние между ближайшими электродами;

• при трехслойной структуре:

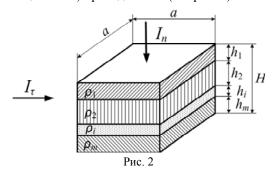
$$\rho = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} q_n^{-n} \left[\frac{L}{\sqrt{L^2 + (2nh)^2}} - \frac{L}{\sqrt{4L^2 + (2nh)^2}} \right] \right\},$$

где q_n – коэффициент разложения подынтегральной функции [4].

На основании указанных выражений для интерпретации результатов ВЭЗ разработана и реализована компьютерная программа «VEZ-3 EQ». Она позволяет:

- в интерактивном режиме определить параметры трехслойной и двухслойной моделей грунта;
- в автоматическом режиме найти параметры двухслойной модели грунта (на основании поиска глобального минимума по методу Хука-Дживса [5]);
- привести трехслойную геоэлектрическую структуру к эквивалентной одно- и (или) двухслойной модели грунта. При этом под эквивалентной понимается модель с такими характеристиками геоэлектрической структуры земли, при которых данный заземлитель будет обладать теми же электрическими параметрами, что и в исходной многослойной структуре.

При получении выражений для эквивалентирования рассматривается прямоугольный столб грунта со стороной a=1 м и высотой H. При протекании токов нормального и тангенциального направлений (I_n и I_{τ} соответственно) определяются суммарные поперечное (нормальное) сопротивление и продольная (тангенциальная) проводимость (см. рис. 2).



Для приведения многослойной геоэлектрической структуры к эквивалентной нами путем решения системы алгебраических уравнений на основании метода, предложенного в [3], были получены выражения для

определения эквивалентных УЭС ρ_3 и мощности эквивалентного слоя h_3 :

$$\rho_{9} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} h_{i} \cdot \rho_{i} \times \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{h_{i}}{\rho_{i}}\right)^{-1}}; \quad h_{9} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} h_{i} \cdot \rho_{i} \times \sum_{i=1}^{m} \frac{h_{i}}{\rho_{i}}},$$

где ρ_i и h_i –УЭС и мощность i-го слоя.

В связи с тем, что на значение потенциала на поверхности грунта, напряжение прикосновения и напряжение шага, больше всего влияет соотношение УЭС верхних слоев, а на сопротивление и потенциал на ЗУ – слои, находящиеся вблизи ЗУ и ниже него, то приведение многослойной геоэлектрической структуры к эквивалентной двухслойной, осуществляется с соблюдением инвариантности какого-либо из рассматриваемых параметров [3]. Таким образом, сформировалось два наиболее распространенных способа эквивалентирования при расчете нормируемых параметров ЗУ:

Способ №1 — верхний слой исходной геоэлектрической структуры рассматривают как первый слой эквивалентной двухслойной, а второй и последующие слои — как эквивалентный (считается, что данный способ позволяет с наименьшими погрешностями определить распределение потенциала на поверхности грунта и напряжение прикосновения);

Способ №2 — все верхние слои представляют в виде первого слоя эквивалентной геоэлектрической структуры, а нижний (или же находящиеся ниже относительно вертикальных элементов ЗУ остальные слои) — второго слоя (данный способ принято использовать при расчете сопротивления и потенциала ЗУ).

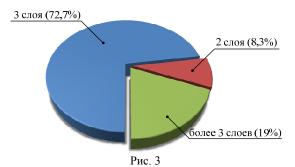
Статистический анализ результатов ВЭЗ. На основании результатов ВЭЗ, проведенных в период с 2007 по 2012 гг. включительно, с помощью описанных выше методики и средств была составлена база данных для 612 измерений, произведенных в различных областях Украины на территории энергообъектов.

Как указано в [2] ЭФХ грунта во многом определяют как глубинность зондирования, так и вообще возможность применения конкретной установки ВЭЗ, а также задают определенные требования к приборам с точки зрения мощности и чувствительности. Кроме этого число слоев геоэлектрической структуры формирует требования к математическим моделям для интерпретации результатов ВЭЗ и расчета нормируемых параметров ЗУ. Поэтому для решения задач, поставленных в [2], по разработке критериев выбора установки, средств интерпретации результатов ВЭЗ и расчета нормируемых параметров ЗУ в зависимости от особенностей объекта и ЭФХ грунта необходимо провести статистический анализ ЭФХ грунта для составленной базы данных по обследованным энергообъектам. Кроме этого на основании указанного анализа необходимо сформулировать четкие требования к используемым приборам при проведении ВЭЗ в зависимости от величины УЭС грунта и глубины зондирования.

На основании анализа экспериментальных кривых ВЭЗ, а также результатов их интерпретации было получено статистическое распределение грунтов почислу слоев (см. рис. 3).

Как видно из рис. 3, абсолютное большинство грунтов в местах размещения электрических станций и подстанций имеет трехслойную структуру и соответственно для снижения погрешности при проведении расчетов необходимо использовать математическую модель ЗУ, размещенного в грунте с числом слоев не менее трех.

На рис. 4 приведен аналогичный анализ, характеризующий распределение грунтов по числу слоев для ряда регионов Украины.



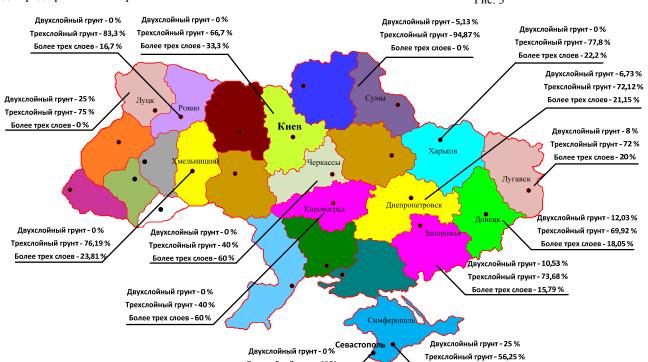


Рис. 4

Трехслойный грунт - 85 %

Более трех слоев - 15 %

По регионам процентное соотношение трехслойных грунтов изменяется в пределах от 40 % (Кировоградская область) до 94,8 % (Сумская область). Максимальный же процент двухслойных грунтов достигает лишь 25 % (Волынская область). Следовательно, используемая в настоящее время математическая модель для расчета нормируемых параметров ЗУ позволяет напрямую (без эквивалентирования) произвести расчет в среднем по Украине лишь для 8,3 % ЗУ.

В процессе анализа базы данных результатов ВЭЗ были определены их статистические характеристики: среднее, мода, медиана и т.д., которые приведены в табл. 1. При этом общее число трехслойных грунтов в статистическом анализе значений ЭФХ возросло и составило 592 из 612. Это связано с тем, что некоторая часть грунтов, ранее отнесенная к двухслойным, более точно описывается с помощью трехслойной модели, а также тем, что в виду отсутствия необходимых средств интерпретации кривые ВЭЗ с числом слоев более трех при проведении ЭМД интерпретируются в виде трехслойного грунта.

Как видно из табл. 1, УЭС грунтов на территории энергообъектов Украины для первого слоя лежит в пределах от 5,5 до 8700 Ом·м, при этом медиана составляет лишь 75 Ом·м, т. е. 50 % УЭС лежит в пределах от 5,5 до 75 Ом·м. С учетом полученных значений УЭС всех слоев, приборы для проведения ВЭЗ при ЭМД ЗУ, должны иметь предел измерения от 0,3 до 9000 Ом.м. Однако, следует отметить, что данные значения являются предельными. Для того, чтобы оценить оптимальные требования, воспользуемся гистограммами распределения данных параметров (на рис. 5,а распределение УЭС для трех слоев, а на рис. 5, 6 — мощности данных слоев).

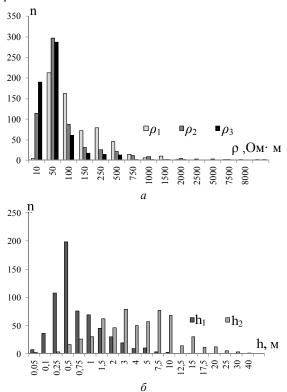
Трехслойный грунт - 56,25 %

Более трех слоев - 18,75 %

							Таб	лица 1
	ρ_1/ρ_2	ρ_2/ρ_3	ρ_1/ρ_3	ρ _{1.} Ом·м	ρ _{2.} Ом·м	ρ _{3.} Ом·м	<i>h</i> ₁ , м	<i>h</i> ₂ , м
Среднее	5,12	6,03	12,11	183,9	136,93	67,63	0,79	5,46
Медиана	2,75	2,29	4,31	75	29	18	0,45	4
Мода	5	0,5	2	200	15	30	0,2	10
Минимум	0,017	0,004	0,018	5,5	1,2	0,3	0,02	0,01
Максимум	83,3	416,7	625	8700	7000	9000	10	35
Выборка	612	592	592	612	612	592	612	592

Из анализа гистограмм, изображенных на рис. 5,а, при суммировании частоты для всех слоев и расчете относительной частости следует, что УЭС находящийся в пределах р∈[10; 2000] Ом⋅м охватывает 99 % случаев, а предел р∈[10; 1000] Ом·м – 98 %, что значительно уменьшает требуемый интервал измеряемых значений. Наиболее часто встречающиеся мощности (99 % случаев) лежат в пределах для $h_1 \in [0,1;7,5]$ м и для $h_2 \in [0,5;30]$ м.

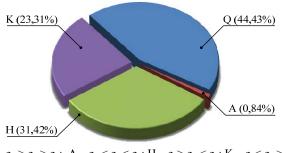
Таким образом, определены диапазоны предельных и наиболее часто встречающихся значений ЭФХ грунтов в местах расположения энергообъектов Украины.



Оценка влияния эквивалентирования. Применение методов эквивалентирования к ЭФХ многослойного грунта значительно влияет на результаты проведения расчетов нормируемых параметров ЗУ [3]. При этом, как показывает многолетняя практика выполнения подобных расчетов, приведение трехслойных грунтов к двухслойной модели методом эквивалентирования может давать значительные погрешности при вычислении потенциалов в зависимости от типа кривой ВЭЗ и порядкового номера слоя, в котором расположено ЗУ. Известно, что существует четыре типа кривых ВЭЗ [3], каждый из которых определяется по соотношению удельных сопротивлений слоев.

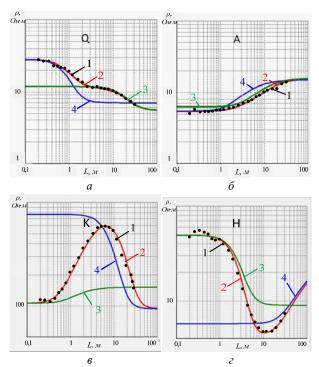
Рис. 5

Для базы данных результатов ВЭЗ был произведен анализ процентного распределения типов кривых ВЭЗ в среднем по Украине в местах расположения энергообъектов (см. рис. 6).



 $Q - \rho_1 > \rho_2 > \rho_3; \ A - \rho_1 < \rho_2 < \rho_3; \ H - \rho_1 > \rho_2 < \rho_3; \ K - \rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ Puc. 6

На рис. 7 приведены графики экспериментально измеренных значений кажущегося УЭС, описывающих трехслойную геоэлектрическую структуру, а также аппроксимирующие их кривые, полученные при интерпретации четырех типов кривых ВЭЗ.



1 – экспериментальные точки; 2 – интерпретация трехслойной моделью; 3 – эквивалентирование по способу №1; 4 – эквивалентирование по способу №2

Рис. 7

В работе был проведен анализ влияния способов эквивалентирования на точность расчета нормируемых параметров при интерпретации различных типов кривых ВЭЗ. Для этого были проведены расчеты потенциала электрического поля ЗУ, выполненного в виде квадрата со стороной 5 м и расположенного параллельно слоям геоэлектрической структуры. Значения потенциала были получены при протекании тока плотностью 1 А/м в вершинах исследуемого ЗУ для различных способов эквивалентирования и на разных глубинах: на поверхности грунта (при z = 0 м, что соответствует расчету напряжению прикосновения), вблизи самого 3Y (z = t, что соответствует расчету потенциала на ЗУ и сопротивлению ЗУ) и на глубине равной трем диагоналям (z = 3D, где поле 3У приближается к полю точечного источника тока).

За истинные значения потенциала приняты значения, полученные при расчете потенциала электрического поля этого же 3У с помощью разработанной авторами математической модели 3У, размещенного в трехслойном грунте, которая позволяет определить распределения потенциала электрического поля при стекании с 3У тока заданной плотности [4]. При расчете 3У, размещенного в первом слое на глубине t=0,8 м в качестве значений УЭС, взяты предельные значения грунтов из табл. 1, а h_1 и h_2 , равные средним значениям -0,79 м и 5,46 м соответственно. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип кривой		Q	K	H	A
Паналаган	ρ₁, Ом∙м	8700	184	8700	5,5
Параметры грунта:	ρ₂, Ом∙м	137	7000	137	137
трунта.	ρ₃, Ом∙м	0,3	30	9000	9000
П	z = 0 M	6,5	76,9	-108	12,1
Погрешность способа №1	z = t	2,2	71,0	-39,4	11,7
Chocooa Nº1	z = 3D	-709	-661	-58,5	31,1
	z = 0 M	73,3	-172	64,8	-36,6
Погрешность способа №2	z = t	88,0	-266	84,3	-59,9
	z = 3D	-19,6	-55,8	-423	-23,7

В табл. 3 показаны результаты аналогичного расчета для ЗУ, размещенного во втором слое на глубине t = 1,2 м, а в качестве значений УЭС и мощности слоев взяты соответственно $\rho_i = 10$; 100; 1000 Ом м, $h_1 = 1$ м и $h_2 = 8$ м.

Как следует из полученных результатов, эквивалентирование с помощью способа Nel для типов грунта Q и A, если 3У расположено в первом слое, дает довольно низкую погрешность (до 12,1 %), и до - 32,3 % для 3У расположенного во втором слое.

Таблица 3

Тип кривой		Q	K	Н	A
Поположения	ρ1, Ом·м	10	10	1000	10
Параметры грунта:	ρ₂, Ом∙м	100	1000	10	100
грунта.	ρ3, Ом·м	1000	10	1000	1000
Погрешность способа №1, %	z = 0 M	-28,0	49,3	37,2	-12,6
	z = t	-32,3	89,3	-40,2	-174
	z = 3D	-3,6	-639	66,8	16,6
Погрешность способа №2, %	z = 0 M	73,8	-256	85,0	-28,3
	z = t	76	36,6	68,4	-5,1
	z = 3D	-60,2	-1366	97,5	-3,7

В табл. 4 приведен анализ результатов расчета (знаком «+» отмечено завышение потенциала более чем на 20%, знаком «-» занижение более чем на 20%, «0», если погрешность не превышает \pm 20%).

Таблица 4

Способ№1/ Способ№2	ЗУ находится:								
	в первом слое				во втором слое				
	Q	K	A	H	Q	K	A	Н	
z = 0 M	0/+	+/-	0/-	-/+	-/+	+/-	0/-	+/+	
z = t	0/+	+/-	0/-	-/+	-/+	+/+	-/0	-/+	
$z = 3 \cdot D$	-/0	-/-	+/-	-/-	0/-	-/-	0/0	+/+	

На основании результатов расчета в табл. 2-4 показано, что точность определения потенциала, созданного при стекании токов КЗ с 3У, при помощи метода эквивалентирования многослойного грунта существенно зависит от типа кривой ВЭЗ.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать ряд выводов:

- наиболее распространенными геоэлектрическими структурами в местах расположения энергообъектов Украины, как в отдельных регионах, так и в целом по Украине являются трехслойные грунты (72,7 % в среднем по Украине);
- необходимо разработать средства интерпетации результатов ВЭЗ при проведении ЭМД ЗУ моделью грунта с числом слоев более трех, так как применяемые

- в настоящее время охватывают не более 81% случаев диагностики;
- используемая в настоящее время математиеская модель ЗУ, размещенного в двухслойном грунте, позволяет напрямую без эквивалентирования производить расчеты лишь для 8,3 %;
- существует корреляция между типом грунта, глубиной залегания ЗУ и завышением (занижением) величины потенциала, полученной в результате применения способов эквивалентирования;
- применение того или иного способа эквивалентирования должно определятся не только типом требуемого расчета, как считалось ранее, (напряжения прикосновения или потенциала на ЗУ), а и типом эквивалентируемого трехслойного грунта, и порядковым номером слоя, в котором расположено ЗУ;
- применение эквивалентирования является корректным для грунтов типа Q и A, при этом если 3V находится в первом слое, то следует использовать способ N1 (результаты расчета могут быть завышены не более чем на 12,1 %);
- используемая в настоящее время математическая модель ЗУ, расположенного в двухслойном грунте не позволяет корректно производить расчет нормируемых параметров ЗУ, расположенных в грунтах типа К и H, которые составляют почти 55 % от всех грунтов Украины;
- разработка математической модели ЗУ, расположенного в трехслойном грунте, является первоочередной задачей с точки зрения повышения точности расчета нормируемых параметров, т.к. используемая в настоящее время модель охватывает лишь 22,5 % всех ЗУ (8,3 % двухслойных грунтов и 14,2 % ЗУ расположенных в первом слое грунтов типа Q и A).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *I.* Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009— [Чинний від 2010-03-29].— К.: Мінпаливенерго України, 2010.—54 с.—(Національний стандарт України).
- 2. Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок // Електротехніка і електромеханіка. 2014. №4. С. 65-70.
- 3. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983 168 с.
- 4. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Математическая модель заземляющего устройства энергообъекта при наличии подстилающего слоя // Электронное моделирование. 2014. Т.36. №2. С. 89-97.
- 5. Пєтков О.О., Коліушко Д.Г., Лінк І.Ю. Визначення параметрів двошарової моделі грунту за результатами вертикального електричного зондування, проведеного в районі розташування підстанцій // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2004. №2(7). С. 3-11.

REFERENCES

- 1. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. [SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
- 2. Koliushko G.M., Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of

active electrical installation ground grids. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 65-70. (Rus).

- 3. Kostruba S.I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchikh ustroistv* [Measurement of electrical parameters of the earth and ground grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. (Rus).
- 4. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer. *Elektronnoe modelirovanie Electronic modeling*, 2014, vol.36, no.2, pp. 89-97. (Rus).
- 5. Petkov A.A., Koliushko D.G., Link I.Y. Determination of parameters two-layer model of ground on the results for the vertical electric sounding conducted in the vicinity of substation. *ElektrifIkatsIya ta avtomatizatsIya silskogo gospodarstva Electrification and automation of agriculture*, 2004, no.2(7), pp. 3-11. (Ukr).

Поступила (received) 12.02.2015

Колиушко Денис Георгиевич¹, к.т.н., с.н.с., Руденко Сергей Сергеевич¹, аспирант, м.н.с., Колиушко Георгий Михайлович¹, к.т.н., в.н.с., ¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, e-mail: nio5 molniya@ukr.net

D.G. Koliushko¹, S.S. Rudenko¹, G.M. Koliushko¹
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine.

Purpose. Definition of the direction for further research to improve accuracy of the calculation of rated parameters of ground grids based on the analysis of statistical databases of electrophysical characteristics of the soil. **Methodology**. To solve this problem we compiled the statistical base of soil of Ukraine in

the location of electrical substation, we performed the statistical analysis for the number of layers of geoelectric structure, and electrical characteristics. In the experiments implemented the comparing of accuracy calculation of the most typical three-layer soil in the Ukraine, by the new three-layer model of ground grids and the equivalent two-layer model, which used previously. Results. On the results of analysis the ranges of the electrical resistivity and statistical distribution for electro-physical characteristics of the soil are determined. The resulting distributions allow to develop criteria for instruments, installations and means of interpretation during the sounding of soil, as well as the requirements for mathematical models of ground grids. It was found that the most typical for places of locations the electrical substations in Ukraine are three-layer geoelectric structures. In the paper the statistical distribution for three-layer soil by type (Q, K, H, A) are described. The results of numerical experiments show that the use of methods to simplify of the multilayers soil does not allow the calculation of grounding grids with high accuracy. In the work recommendations for applicability the method equivalenting depending on the type of geoelectric structure are developed. Originality. For the first time, we obtained the statistical distribution of stratification of the soil in the location of power plant in Ukraine, determined the accuracy of the method to simplify a multi-layer soil in determining the rated parameters of grounding grids. In the paper the necessity to develop a mathematical model of the grounding device located in the three-layer soil is shown, as well as a new installation of soil sounding, which allows to increase the depth of sounding and new means of interpreting the results of sounding Wenner installing a four-layers geoelectric structure. Practical value The resulting recommendations for the applicability of equivalenting of multilayer soil, as well as research in specific work areas would help to reduce costs on materials and labours during the modernization and upgrade of grounding devices, moreover it will increase the electrical safety and reliable operation of electrical substation. Reference 5, tables 4, figures 7.

Key words: three-layer geoelectric structure, vertical electrical sounding, ground grids, soil, substation.

КОЛИУШКО ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ

(к 75-летию со дня рождения)

Исполнилось 75 лет со дня рождения известного учёного и специалиста в области техники высоких напряжений и диагностики состояния заземляющих

устройств, лауреата премии Совета Министров СССР (1988 г.), лауреата Государственной премии Украины в области науки и техники (2004 г.), Почетного энергетика Украины (2010 г.), кандидата технических наук Георгия Михайловича Колиушко.

Георгий Михайлович родился 1 июня 1940 г. в г. Винница. После окончания в 1963 году электромашиностроительного факультета Харьковского политехнического института по распределению был направлен в Научно-исследовательскую лабораторию техники

высоких напряжений и преобразователей тока ХПИ (в настоящее время НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»), где и работает и поныне уже более 50 лет.

Георгий Михайлович Колиушко является признанным авторитетом в области разработки уникальных высоковольтных испытательных установок, некоторые из которых и на сегодняшний день не имеют аналогов в мире. Его работы широко известны не только в Украине, но и практически во всех странах бывшего Советского Союза. Под его руководством и при непосредственном участии были разработаны многие испытательные высоковольтные стенды, такие как: высоковольтная испытательная установка для испытаний автоматических систем управления технологическими процессами на воздействие электромагнитных полей по ГОСТ 29280 («ХАРТРОН», г. Харьков), установка для оценки молниестойкости бортового оборудования самолета АН-140 к импульсным наводкам, индуцируемым в бортовых электрических цепях АНТК-1 (АНТК «АНТОНОВ», г. Киев), комплексы электрофизических установок, обеспечивающие проведение нормативных испытаний серийно выпускаемых элементов ограничителей перенапряжения в электрических сетях широкого класса напряжения (НИИ ВН г. Славянск), установки «ТИР-2» (ФИАН им. Лебедева, г. Москва), ЕНЭ-320 кДж (ГОИ, г. Ленинград), ЕНЭ-1500 кДж «Луч» (институт «Астрофизика», г. Москва), «Лира» (НПО «Взлет», г. Москва), генератор импульсов тока к установке ИЭМИ-6 «Сплав» и др.

К особо значимым достижениям в области техники высоких напряжений следует отнести разработку и ввод в эксплуатацию высоковольтной установки «Аксамит» (6 МДж) (г. Ленинград) и испытательного комплекса ИЭМИ-12 «ЭФЕС» (г. Ленинград). Оригинальные решения, заложенные при проектировании данных установок, не превзойдены и до настоящего времени. Комплекс «ЭФЕС» внесен в Международный реестр уникальных испытательных мировых центров ЭМИ (IEC 61000-4-32).

Г.М. Колиушко является основоположником нового научного направления, востребованного энер-

гетиками Украины – диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов, которое позволяет оптимально сочетать меры по обеспечению электро-

> безопасности персонала и электромагнитной совместимости на объекте. При его непосредственном участии разработан первый в Украине нормативный документ, регламентирующий правила испытания и контроля состояния заземляющих устройств СОУ 31.2-21677681-19 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок», утвержденный приказом Минтопэнерго Украины, который используется специалистами всех существующих энергосис-Украины. Под руководством Г.М. Колиушко коллектив сотрудников

провел государственные испытания, которые позволили ввести в Государственный реестр средств измерительной техники Украины три измерительных комплекса «КДЗ-1У», «ИК-1У» и «ИКП-1У».

В последние десятилетия отдел, возглавляемый Георгием Михайловичем, плодотворно сотрудничает в области повышения безопасности работы объектов со специалистами всех атомных станций Украины (Запорожская, Ровенская, Южно-Украинская, Хмельницкая), НЭК «Укрэнерго», НАК «Укрнафта» и многими облэнерго.

Являясь одним из авторов глав 1.7 и 4.2 «Правил улаштування електроустановок» Г.М. Колиушко принимал активное участие в разработке справочнометодического пособия «Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 2 Загальні методи та засоби діагностування, випробувань та вимірювань електрообладнання, виведеного з роботи».

Георгий Михайлович – автор более 300 печатных работ, 20 изобретений и патентов, ряда нормативных документов.

Среди коллег и специалистов организаций, сотрудничающих с НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», Георгий Михайлович пользуется заслуженным авторитетом и уважением за высокий профессионализм, тактичность, доброту, отзывчивость и готовность прийти на помощь. А для молодого поколения ученых Г.М. Колиушко является примером в целеустремленности, умении решать поставленные научные и технические задачи, желании не останавливаться на достигнутом и открывать новые направления в работе.

Ректорат НТУ «ХПИ», друзья, коллеги и ученики поздравляют с юбилеем и желают глубокоуважаемому Георгию Михайловичу крепкого здоровья, хорошего настроения, дальнейших творческих успехов в работе и научно-технических исследованиях.

Редакция журнала «Електротехніка і електромеханіка» искренне присоединяется к этим теплым пожеланиям.