

ISSN 2074-272X

**науково-практичний
журнал**

2016/1



ЕІЕ **Електротехніка і Електромеханіка**

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена
Електричні машини та апарати
Теоретична електротехніка та електрофізика
Техніка сильних електричних та магнітних полів.
Кабельна техніка
Електричні станції, мережі і системи

За 2014р. журнал отримав індекс 79,35
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»)

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



«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
Kyrylenko 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"
Грецько О.М.	відповідальний секретар , к.т.н., НТУ "ХПІ"
Баранов М.І.	д.т.н., НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Боев 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 НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Міліх 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.I.	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"
Baranov M.I.	Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI"
Boev V.M.	Professor, NTU "KhPI"
Veprik Yu.M.	Professor, NTU "KhPI"
Gryb O.G.	Professor, NTU "KhPI"
Guryan 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"
Rudakov V.V.	Professor, NTU "KhPI"
Soskov A.G.	Professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
Tkachuk V.I.	Professor, Lviv Polytechnic National University
Shynkarenko V.F.	Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

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

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 (Грецько Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

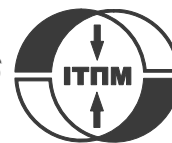
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2016
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2016

Підписано до друку 26.02.2016 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-01-2016. Ціна договірною.

Дизайн та оформлення обкладинки Вировець Л.П. e-mail: vsv_2007@ukr.net

Надруковано ТОВ "Друкарня "Мадрид", Україна, 61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 11



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славені імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 30: Портрет харьковского математика, механика и кибернетика Владимира Логвиновича Рвачева.....	3
--	---

Електричні машини та апарати

Волкова О.Г., Жорняк Л.Б. Исследование характера механического взаимодействия рабочих поверхностей сильнотоковых разрывных контактов	12
Заблудский Н.Н., Плюгин В.Е., Петренко А.Н. Применение принципов объектно-ориентированного проектирования в разработке электрических машин	17
Клименко Б.В., Ереско А.В., Варшамова И.С., Лелюк Н.А. Исследование возможности применения интерфейсных реле в системах гибридной коммутации обмоток бистабильных актуаторов.....	21
Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений в турбогенераторах автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM	26
Панченко В.И., Ципленков Д.В., Гребенюк А.М., Кириченко М.С., Бобров О.В. Машинно-трансформаторный агрегат для вітроенергетичних установок.....	33
Петрушин В.С., Беликова Л.Я., Плоткин Ю.Р., Еноктаев Р.Н. Сравнение эксплуатационных характеристик многофазных регулируемых асинхронных двигателей	38

Теоретична електротехніка та електрофізика

Сокол Є.І., Резинкіна М.М., Сосіна О.В., Гриб О.Г. Чисельний розрахунок електричних полів при наявності криволінійної границі розділу між провідним та непровідним середовищами	42
---	----

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Баранов М.И., Рудаков С.В. Экспериментальные исследования электротермической стойкости проводов и кабелей к воздействию нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 аperiodического импульса тока искусственной молнии.....	48
---	----

Електричні станції, мережі і системи

Gapon D.A., Bederak Ya.S. Guaranteeing the trouble-free operation of capacitor banks in power-supply systems of industrial enterprises.....	56
Матусевич О.О. Методика визначення показника якості системи технічного обслуговування силового електрообладнання тягових підстанцій.....	59
Мороз А.Н., Черемисин Н.М., Черкашина В.В., Холод А.В. Нейро-сетевое моделирование в задачах прогнозирования режимов работы электрических сетей.....	65
Сиротин Ю.А., Иерусалимова Т.С. Уравнения мгновенных и интегральных мощностей несинусоидальных 3-фазных процессов	69

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 30: Portrait of the Kharkov mathematician, mechanical engineer and cyberneticist Vladimir Logvinovich Rvachev.....	3
---	---

Electrical Machines and Apparatus

Volkova O.G., Zhornyak L.B. Investigation of high-current interrupting contacts working surfaces mechanical interaction nature	12
Zabludskii N.N., Pliugin V.E., Petrenko A.N. Using of object-oriented design principles in electric machines development.....	17
Klymenko B.V., Eres'ko A.V., Varshamova I.S., Lelyuk N.A. Research of the applications possibility of interface relay in hybrid switching systems of bistable actuators windings	21
Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM	26
Panchenko V.I., Tsyplenkov D.V., Grebeniuk A.M., Kyrychenko M.S., Bobrov O.V. Machine-transformer units for wind turbines	33

Petrushin V.S., Bielikova L.Y., Plotkin Y.R., Yenoktaiev R.N. Comparison of adjustable high-phase order induction motors' merits.....	38
---	----

Theoretical Electrical Engineering and Electrophysics

Sokol E.I., Rezinkina M.M., Sosina E.V., Gryb O.G. Numerical computation of electric fields in presence of curvilinear interface between conductive and non-conductive media	42
--	----

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Baranov M.I., Rudakov S.V. Experimental researches of electro-thermal resistibility of send-offs and cables to action rationed on the International Standard of IEC 62305-1-2010 of aperiodic impulse of current of artificial lightning	48
--	----

Power Stations, Grids and Systems

Gapon D.A., Bederak Ya.S. Guaranteeing the trouble-free operation of capacitor banks in power-supply systems of industrial enterprises.....	56
Matuskevych O.O. Methodology of determination of quality index of maintenance service system of power equipment of traction substations.....	59
Moroz A.N., Cheremisin N.M., Cherkashina V.V., Kholod A.V. Neural network modeling in problems of prediction modes of electrical grids.....	65
Sirotin Iu.A., Ierusalimova T.S. Instantaneous and integral power equations of nonsinusoidal 3-phase processes.....	69

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2016 рік – 289,26 грн., на два місяці – 48,21 грн., на чотири місяці – 96,42 грн., на шість місяців – 144,63 грн., на вісім місяців – 192,84 грн., на десять місяців – 241,05 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

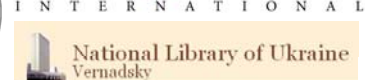
Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано Наказом МОН України № 1328 від 21 грудня 2015 р. 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 (<http://nbuv.gov.ua/>) в розділі «Наукова періодика України», а також на офіційному сайті журналу (<http://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 (<http://eie.khpi.edu.ua/>), розміщеному на платформі «Наукова періодика України» (<http://journals.urau.ua/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 30:
ПОРТРЕТ ХАРЬКОВСКОГО МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА И КИБЕРНЕТИКА
ВЛАДИМИРА ЛОГВИНОВИЧА РВАЧЕВА**

Наведено короткий науково-історичний нарис про відомого вченого-математика Харківщини – академіка АН УРСР (НАН України) Рвачева В.Л. і про його видатний внесок у світову математичну науку. Бібл. 43, рис. 13.

Ключові слова: історія, математика, механіка, кібернетика, Харківська область, видатні наукові досягнення.

Приведен краткий научно-исторический очерк об известном ученом-математике Харьковщины – академике АН УССР (НАН Украины) Рвачеве В.Л. и о его выдающемся вкладе в мировую математическую науку. Библ. 43, рис. 13.

Ключевые слова: история, математика, механика, кибернетика, Харьковская область, выдающиеся научные достижения.

*90-літтю Володимира Логвиновича Рвачева –
видатного українського математика,
механіка і кібернетика присвячується.*

Введение. В [1, 2] автором ранее были описаны портреты ряда выдающихся математиков Харьковщины – советских украинских и российских академиков Погорелова А.В., Марченко В.А. и Садовниченко В.А., а также член-корр. АН УССР Ахизера Н.И., ставших во второй половине 20-го и в начале 21-го столетий олицетворением интеллектуального облика г. Харькова и близкой многим из нас Слобожанщины. Продолжением этого академического «математического» ряда известных отечественных ученых-математиков для такого ведущего научного и учебного центра Украины, как г. Харьков, несомненно является и наш прославленный земляк – д.ф.-м.н., проф., академик АН УССР (НАН Украины) Владимир Логвинович Рвачев [3]. Свою основную зрелую творческую и научно-педагогическую жизнь он провел в «стенах» Института проблем машиностроения (ИПМаш) им. академика А.Н. Подгорного НАНУ и Харьковского политехнического института (ХПИ). Автору в 1976 г. при обучении в очной аспирантуре ХПИ посчастливилось прослушать курс лекций по прикладной математике и основам так называемых R -функций, проводимых этим известным ученым-математиком и прекрасным педагогом. Вспоминая с долей ностальгии то «золотое» время научного поиска, требований максимализма во многих проявлениях своей молодости, творческого увлечения и обучения, могу сказать о том, что пустых мест в учебной аудитории на занятиях ученого-мэтра В.Л. Рвачева обычно не было. Эти занятия инициативно с целью профессионального роста посещали молодые специалисты и из других ведущих харьковских ВУЗов. Пришла пора его многочисленным ученикам и знавшим этого выдающегося харьковского математика специалистам из других сфер научной деятельности поближе познакомить широкого читателя с этой значительной для отечественной и международной общественности научной и человеческой фигурой. Поэтому постараемся в форме короткого научно-исторического очерка на основе научных трудов Рвачева В.Л., известных литературных источников, материалов музея ХПИ, фотоматериалов из семейного архива нашего прославленного ученого и сведений из Интернет «нарисовать» портрет этой неординарной личности с описанием его ос-

новных выдающихся научных результатов в области прикладной математики, механики и математической физики.

1. Основные этапы жизненного и творческого пути харьковского академика-математика. Родился Рвачев В.Л. (рис. 1) 21 октября 1926 г. в г. Чигирине (Черкасская обл.) в семье учителей [3, 4]. После окончания средней школы в тяжелые годы Второй мировой войны работал учеником токаря на заводе «Ташсельмаш» (г. Ташкент). В 1944 г. был призван на службу в Военно-Морской Флот (ВМФ) СССР. После демобилизации в 1947 г. он поступил на физико-математический факультет Львовского университета им. И. Франко. В 1952 г. Рвачев В.Л. с отличием окончил это высшее учебное заведение СССР (рис. 2).



Рис. 1. Выдающийся советский украинский математик, механик и кибернетик, д.ф.-м.н., проф., академик АН УССР (НАН Украины), лауреат Государственной премии УССР в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины, почетный доктор НТУ «ХПИ» и других ВУЗов Владимир Логвинович Рвачев (1926-2005 гг.) [4]

Кстати, на 4-ом курсе указанного выше университета он был Сталинским стипендиатом [4]. После

© М.И. Баранов

окончания обучения в Львовском университете им. И. Франко и будучи уже женатым на своей однокурснице Ирине Константиновне Семирай полный творческих планов Рвачев В.Л. снова оказывается в рядах ВМФ СССР, работая в чине лейтенанта советского ВМФ старшим преподавателем в Военно-морском училище (г. Пушкино, Ленинградская обл.) [3, 4]. Несмотря на все эти суровые жизненные обстоятельства, он в 1955 г. успешно защищает кандидатскую диссертацию на тему «*Расчет бесконечной балки, лежащей на упругом основании*» (научный руководитель – проф. М.Я. Леонов) и становится к.ф.-м.н. [3, 4]. По семейным причинам (из-за срочной необходимости в смене климата для жены) Рвачев В.Л. и Рвачева И.К. в 1955 г. переезжают к теплему Азовскому морю и оба становятся преподавателями кафедры высшей математики в Бердянском педагогическом институте [3, 4].



Рис. 2. Целеустремленный математик Рвачев В.Л. после окончания физико-математического факультета Львовского университета им. И. Франко (1952 г., г. Львов) [4]

Считается, что в начальный период научного и жизненного становления Рвачева В.Л. именно Бердянский период (1955-1963 гг.) его жизни и научной деятельности оказался для него наиболее ярким и плодотворным [5-10]. В 1960 г. он успешно защищает в Институте проблем механики АН СССР докторскую диссертацию на тему «*Пространственная контактная задача теории упругости и некоторые ее приложения*» [3, 4]. Принято считать, что в завершающий момент подготовки к защите этой научной работы по механике он «*подошел к основному результату своего будущего математического открытия*» [4]. Открытие это касается специальных R -функций («*функций Рвачева*»), позволяющих решить проблему учета сложной геометрической конфигурации (информации) для любого технического объекта на аналитическом уровне. Базовой научной работой при этом для принципиально нового направления в математике – *теории R -функций* стала его небольшая статья [11].

В 1963 г. д.ф.-м.н., проф. Рвачев В.Л. был приглашен на работу в Харьковский институт горного машиностроения, автоматики и вычислительной техники (в недалеком будущем Харьковский институт радиоэлектроники – ХИРЭ) на должность заведующего кафедрой вычислительной математики [3, 4]. Начало Харьковского периода (1963-2005 гг.) трудовой деятельности для Рвачева В.Л. (рис. 3) совпало с периодом бурного развития в СССР кибернетики и вычислительной техники. В этой связи Рвачев В.Л. крайние задачи механики стал рассматривать уже с общих позиций теории информатики. Именно поэтому его внимание привлекла проблема учета геометрической информации, характерная для обширного класса задач оптимизации и математической физики и решаемая с помощью электронно-вычислительных машин – ЭВМ [3]. Считается, что *математическая теория R -функций*, предложенная Рвачевым В.Л., возникла на стыке классических методов прикладной математики, методов кибернетики и математической логики [3, 4].



Рис. 3. Заведующий кафедрой вычислительной математики ХИРЭ, д.ф.-м.н., проф. Рвачев В.Л. (третий справа) перед отлетом из аэропорта г. Парижа на родину и после успешного участия в международной конференции по проблемам вычислительной математики и кибернетики (1966 г.) [4]

Возглавив с 1967 г. отдел прикладной математики и вычислительных методов в ИПМаш АН УССР, д.ф.-м.н., проф. Рвачев В.Л. (рис. 4) совместно с коллегами в период 1960-х – 1980-х гг. разрабатывает математический аппарат теории R -функций [12-19].

Развивая теорию R -функций, Рвачев В.Л. особое внимание обращает на конструктивные средства ее практической реализации. Именно отсутствие подобных конструктивных средств так долго сдерживало применение классических вариационных методов для построения в явном виде координатных функций, точно удовлетворяющих заданным краевым условиям для областей сложной геометрической формы [3, 4]. Рвачев В.Л. совместно со своими учениками с помощью конструктивного аппарата теории R -функций разработал единый подход к проблеме построения координатных последовательностей для основных известных вариационных и проекционных методов [20]. При этом речь шла о решении ими задач механики, электродинамики, теплофизики и математической физики с краевыми условиями различных типов для областей практически произвольной формы [20]. Математический *метод R -функций* в дальнейшем получил общепризнанную в мире аббревиатуру *RFM* [4].



Рис. 4. Заседание Ученого совета ИПМаш АН УССР под председательством его директора, чл.-корр. АН УССР Анатолия Николаевича Подгорного, обсуждающего достижения академика АН УССР В.Л. Рвачева (крайний справа) и его учеников в области разработки и практического применения математического аппарата R -функций в механике, кибернетике, теплофизике, электродинамике, радиофизике и в других технических приложениях (1985 г., г. Харьков) [4]

В 1969 г. д.ф.-м.н., проф. Рвачев В.Л. был приглашен ректором ХПИ д.т.н., проф. Семко М.Ф. на заведывание кафедрой теоретической и математической физики при постоянном месте его работы в ИПМаш АН УССР [4]. В этот временной период поиск эффективной организации численного решения краевых задач математической физики привел Рвачева В.Л. к пониманию необходимости создания **новой технологии программирования** [3]. В 1970 г. под его научным руководством в отделе прикладной математики и вычислительных методов ИПМаш АН УССР начались проводиться работы по созданию первых версий автоматизированных программирующих систем семейства «ПОЛЕ» [3, 4]. В дальнейшем созданные в указанном институте системы «ПОЛЕ» стали инструментальной базой для проведения численных экспериментов и решения многих практических задач, освобождающей математиков и инженеров различного профиля от самого процесса программирования [3].

В 1972 г. д.ф.-м.н., проф. Рвачев В.Л. был избран чл.-корр. АН УССР, а в 1978 г. – действительным членом АН УССР [3, 4]. В 1980 г. за разработку, создание и внедрение в народное хозяйство страны теории R -функций авторскому коллективу сотрудников ИПМаш АН УССР в составе Рвачева В.Л. (руководитель работ) и его учеников Стояна Ю.Г., Проценко В.С., Манько Г.П., Слесаренко А.П., Шейко Т.И. и Синькопа Н.С. была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники [3, 4]. Укажем, что результаты исследований Рвачева В.Л. в области предложенного им и доведенного его учениками до использования на практике математического метода R -функций (RFM) за период его активной трудовой деятельности отражены в более чем 350 работах [3]. Автор же из-за ограниченности объема этого очерка сослался лишь пока на их два десятка. В их число необходимо включить еще как минимум две монографии академика НАНУ Рвачева В.Л., определяющие определенные этапы и перспективы развития

в науке «**функций Рвачева**». Это изданные в Украине следующие книги: в 1967 г. «**Геометрические приложения алгебры логики**» [21] и в 1974 году «**Методы алгебры логики в математической физике**» [22].

На мой взгляд, одним из главных факторов, приведших именно нашего героя-ученого к математическому открытию специальных R -функций, является то, что этот человек обладал энциклопедическими знаниями. Он был высочайшим специалистом не только в вопросах чистой математики, но и технической кибернетики (науке о закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах [23]), а также классической механики, математической физики и математической логики (булевой алгебры, базирующейся на логических операциях, аналогичных действиям над множествами [23]). Именно синтез этих уникальных способностей и знаний, сосредоточившихся в нем, и привел Рвачева В.Л. к рассматриваемому открытию. Потребности практики в решении сложных научно-технических задач в указанных областях знаний и умение Рвачева В.Л. в комплексе охватить подобные задачи и привели его к научному озарению – созданию **теории R -функций**.

21 октября 1986 г. академическая общественность г. Харькова и нашей страны в целом торжественно отметила 60-летний юбилей выдающегося ученого современности, академика АН УССР Рвачева Владимира Логвиновича, прошедший по месту его долгой работы в родном ИПМаш АН УССР (рис. 5).



Рис. 5. Директор ИПМаш АН УССР, чл.-корр. АН УССР Подгорный А.Н. (слева) тепло поздравляет с 60-летием своего дорогого коллегу, юбиляра-академика АН УССР Рвачева В.Л. (справа) (1986 г., ИПМаш АН УССР, г. Харьков) [4]

Последующие десятилетия своей плодотворной научно-педагогической деятельности в ИПМаш АН УССР (НАН Украины) и НТУ «ХПИ» (с 1971 года в должности профессора указанной выше кафедры университета, называемой с 1981 г. кафедрой прикладной математики, по совместительству) наш отечественный ученый-мэтр Рвачев В.Л. посвятил отдельным актуальным прикладным направлениям в области механики (контактным задачам теории упругости и нелинейным задачам теории пластин сложной формы), теплофизики, магнитогидродинамики, радиофизики, кибернетики (задачам автоматизации программирования при решении краевых задач) и математики (задачам теории

приближений и атомарным функциям), развиваемым им и его многочисленными учениками на основе созданной данным всемирно известным творцом математической теории R -функций [24-38].

Академик НАНУ Рвачев В.Л. (рис. 6) в начале 21-го века продолжал в меру своих морально-волевых и физических сил работать на «нивах» учебной и научной сфер в качестве ученого-консультанта ИПМаш НАНУ, «своей» кафедры прикладной математики в НТУ «ХПИ», ХИРЭ и аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт» вплоть до своей кончины, наступившей 26 апреля 2005 г. [4, 39-42].



Рис. 6. Члены оргкомитета международной конференции по нелинейной динамике «Nonlinear Dynamics» (слева направо: д.т.н., проф. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., академик НАН Украины Рвачев В.Л., д.т.н., проф. МОРАЧКОВСКИЙ О.К., д.т.н., проф. КУРПА Л.В., к.т.н., проф. КРАВЕЦ В.А., 2004 г., НТУ «ХПИ», г. Харьков) [4]

23 октября 2006 г. в НТУ «ХПИ» в честь выдающегося ученого XX века в области математики и механики, автора научной идеи по созданию *теории R -функций*, академика НАН Украины Рвачева В.Л. была открыта мраморная мемориальная доска (рис. 7).



Рис. 7. Общий вид мраморной мемориальной доски в честь выдающегося советского украинского математика, механика и кибернетика, академика НАН Украины, почетного доктора НТУ «ХПИ» Владимира Логвиновича Рвачева (1926-2005 гг.), открытой в НТУ «ХПИ» в 2006 г. и закрепленной на кирпичной стене математического корпуса университета

2. Основные научные достижения харьковского академика-математика. Научную известность д.ф.-м.н., проф. В.Л. Рвачеву принесли оригинальные результаты его работы по решению на основе нового математического подхода краевых задач в области классической механики, математической физики, теп-

лофизики, электродинамики, радиофизики и магнито-гидродинамики. Постараемся ниже на основе материалов его ряда научных работ [3, 5-22, 24-38] сформулировать основные фундаментальные научные результаты, полученные известным математиком, академиком АН СССР (НАН Украины) В.Л. Рвачевым в указанных областях физико-математических знаний:

- Сформулировал на современном математическом уровне знаний *многовековую научную проблему*, восходящую к основоположнику аналитической геометрии – великому французскому математику и физику Рене Декарту (1596-1650 гг.) и состоящую в построении уравнения геометрического объекта произвольной формы по его изначально заданному графическому очертанию или чертежу (1960-е гг.);

- Разработал применительно к решению краевых задач классической механики, теплофизики, математической физики, электродинамики, радиофизики и магнито-гидродинамики новый математический метод построения полных систем базисных (координатных) функций для геометрических объектов произвольной конфигурации с краевыми условиями различного типа и произвольной функциональной формы записи, использующий оригинальные специальные *R -функции (функции Рвачева)* (1960-е гг.);

- Разработал основы новой *математической теории R -функций* с ее многочисленными техническими приложениями, одним из основных результатов которой является решение обратной задачи аналитической геометрии, заключающееся в математическом установлении уравнения для заданного геометрического объекта произвольной формы, описывающего его геометрию и соответственно координаты его внешних границ для различных областей в двух- и трехмерном евклидовом пространстве (1960-е гг.);

- Представил искомое *уравнение для обратной задачи аналитической геометрии* и соответственно координат внешних границ (координатных функций граничных условий для краевых задач в технических приложениях) для геометрических объектов сложной формы в виде единого аналитического выражения, содержащего элементарные функции (1970-е гг.);

- Детально развил и довел до практического применения при решении различных краевых задач классической механики, теплофизики, математической физики, электродинамики, радиофизики и магнито-гидродинамики теорию R -функций, являющуюся по мнению авторитетных ученых одним из великих научных открытий в области прикладной математики второй половины 20-го столетия (1970-е гг.) [40-42];

- На основе конструктивной универсальности теории R -функций создал принципиально *новую технологию программирования*, реализованную под его научным руководством в отделе прикладной математики и вычислительных методов ИПМаш АН СССР применительно к прямым методам решения краевых задач механики и математической физики, описываемых уравнениями с частными производными, в виде автоматизированных программирующих систем семейства «ПОЛЕ» (1970-е – 1980-е гг.);

- Решил большой комплекс прикладных линейных и нелинейных двух- и трехмерных краевых задач в

области теории упругости пластин, стержней, полых цилиндров и других металлоконструкций сложной формы, нестационарной теплопроводности твердых тел конечных размеров и теории электромагнетизма применительно к антенным системам радиотехники и МГД-генераторам с привлечением математического метода R -функций (RFM) (1970-е гг. – 2000-е гг.);

- С помощью развитой им теории R -функций обобщил и конструктивно реализовал в функциональных пространствах широко применяемые на практике формулы Лагранжа–Тейлора–Эрмита, что позволило открыть новый класс финитных бесконечное число раз дифференцируемых функций (**атомарных функций**), имеющих важное прикладное значение для дальнейшего развития теории аппроксимации, методов цифровой обработки электрических сигналов и методов решения многообразных краевых задач математической физики (1980-е гг.);

- Внёс существенный вклад в развитие **неархимедова исчисления**, являющегося алгебраически изоморфным классическому исчислению по Архимеду, и адаптировал его к фундаментальным задачам современной астрофизики дальнего космоса (1990-е гг.);

- Сформировал всемирно признанную **харьковскую научную школу** по математическому методу R -функций (1970-е гг. – 2000-е гг.).

Вот тот далеко неполный перечень значимых для мирового физико-математического сообщества научных результатов, полученных академиком АН УССР (НАНУ) Рвачевым В.Л. за многие годы его активного и плодотворного труда в области прикладной математики, классической механики, теплофизики, математической физики, кибернетики и электричества. Причем, таких результатов, которыми может гордиться настоящий математик и которые вошли в сокровищницу мировой математической науки [3, 4, 39-43].

Указанные результаты научной и педагогической деятельности Рвачева В.Л. получили признание в обществе и были отмечены следующими высокими государственными наградами и знаками отличия [4, 39]:

- орденом Трудового Красного Знамени (1961 г.);
- избранием чл.-корр. АН УССР (1972 г.) и действительным членом АН УССР (1978 г.);
- орденом «Знак Почета» (1976 г.);
- присуждением премии им. академика А.Н. Динника АН УССР (за выдающийся вклад в развитие математической физики, 1976 г.);
- присуждением Государственной премии Украины в области науки и техники (за создание, развитие и внедрение в практику теории R -функций, 1980 г.);
- орденом Дружбы народов (1986 г.);
- присвоением звания «Заслуженного деятеля науки и техники Украины» (1997 г.);
- орденом князя Ярослава Мудрого V степени (2001 г.);
- присвоением звания «Почетного доктора» Национального технического университета «ХПИ», Харьковского национального университета радиоэлектроники и Висконсинского университета (США).

3. Научная школа харьковского академика-математика. Из данных, приведенных в разделе 2,

следует, что главной научной разработкой ученого-математика Рвачева В.Л. является созданная им математическая теория R -функций с ее многочисленными техническими приложениями [3, 4, 42]. Благодаря комплексной работе, проводимой под научным руководством академика Рвачева В.Л. в течение ряда десятилетий в ИПМаш АН УССР (НАНУ), НТУ «ХПИ», ХИРЭ и ХАИ в направлении развития и практического применения метода R -функций (RFM), им была сформирована общепризнанная в мире научная школа [3, 4]. Ниже на рис. 8-12 приведены некоторые из ученых, составивших «костяк» этой научной школы.

В начале 21-го столетия данная научная школа насчитывала 22 доктора технических и физико-математических наук и более 70 кандидатов технических и физико-математических наук [4, 42]. Среди талантливых ученых-учеников академика АН Украины Рвачева В.Л. есть и два чл.-корр. АН Украины – Александр Евгеньевич Божко и Юрий Григорьевич Стоян, работающие ныне в ИПМаш НАНУ [4, 41].



Рис. 8. Чл.-корр. АН УССР Рвачев В.Л. на отдыхе со своими учениками из ИПМаш АН УССР и будущими д.т.н. и лауреатами Государственной премии Украины в области науки и техники за 1980 г.: Шейко Т.И. (первая слева) и Слесаренко А.П. (по центру) (1972 г., пригород г. Харькова) [4]



Рис. 9. Академик АН УССР Рвачев В.Л. (по центру) со своими учениками-последователями из ИПМаш АН УССР: д.т.н. Гончарюком И.В. (слева) и будущим чл.-корр. НАНУ и лауреатом Государственной премии Украины в области науки и техники за 1980 г., д.т.н. Стояном Ю.Г. (справа) (1978 г., ИПМаш АН УССР, г. Харьков) [4]



Рис. 10. Академик АН УССР Рвачев В.Л. (слева) со своим учеником д.ф.-м.н., лауреатом Государственной премии Украины в области науки и техники за 1980 г. Проценко В.С. (справа) (1986 г., ИПМаш АН УССР, г. Харьков) [4]



Рис. 11. Академик НАН Украины Рвачев В.Л. со своей талантливой ученицей, д.т.н., проф. Курпа Лидией Васильевной – заведующей кафедрой прикладной математики в НТУ «ХПИ» (1999 г., НТУ «ХПИ», г. Харьков) [4]

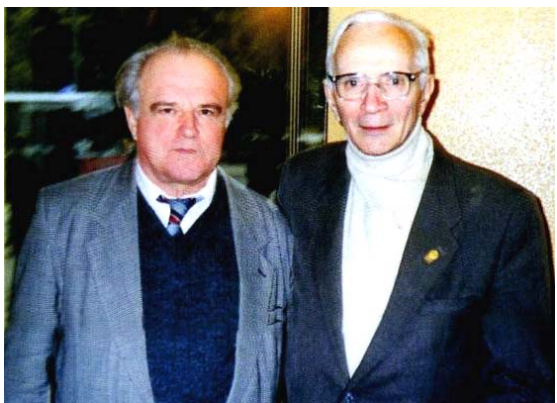


Рис. 12. Академик НАН Украины Рвачев В.Л. (справа) и его ученик, д.т.н. Кравченко В.Ф. (слева) (1999 г., г. Харьков) [4]

Один из его учеников, д.ф.-м.н. Литвин Олег Николаевич стал лауреатом престижных премий им. академика В.М. Глушкова и им. академика М.В. Остроградского НАН Украины [41, 42]. Другой его ученик, д.т.н. Кравченко Виктор Филиппович стал заслуженным деятелем науки и техники РФ [43]. В разделе 1 были приведены фамилии шести ученых-учеников из ИПМаш АН УССР, ставших в 1980 г. лауреатами Государственной премии Украины в области науки и техники. Многие из учеников Рвачева В.Л. возглавляют или возглавляли учебные кафедры в ВУЗах г. Харькова и других городов Украины (например, Б.Н. Борисенко, В.П. Бузько, В.Н. Вержиковский, И.В. Гончарюк,

В.Д. Кожухов, Л.В. Курпа, Л.Н. Куценко, О.Н. Литвин, В.С. Проценко, Н.С. Синеккоп, И.Б. Сироджа, В.П. Федько, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко, Т.И. Шейко, Л.И. Шкляр, А.В. Шматко и др.) [4, 43].

4. Особенности личности и образа жизни харьковского академика-математика. Каким был Владимир Логвинович вне его научных интересов и работы? Из воспоминаний его учеников следует, что их учитель «*был воплощением Добра и Любви к людям*» [42]. В этом умном, образованном и талантливом человеке, ставшим математиком мирового масштаба, органично воплотились и соединились совесть, умение сострадания и оказания помощи другому человеку, умение радоваться успехам других людей и умение наставничества в науке [4, 42]. Им, много повидавшим в жизни и прошедшим в юности через многие страдания и лишения в период 1930-х гг. (из-за надуманного по политическим причинам ареста, осуждения и последовавшей в конце концов реабилитации его мужественных родителей), воспитано целое поколение ученых-математиков, называемое себя «*рвачевцами*» и гордящееся этим званием [4]. Находясь на отдыхе или дома, он как «*трудоголик*» твердо придерживался выработанного годами правила: «*хотя бы один час посвятить научной работе, хотя бы одну страницу в день написать о результатах проведенных исследований*» [4]. Математика была, как говорится, в «*крови*» семьи Рвачевых: его родители Логвин Федорович и Ксения Алексеевна были школьными педагогами-математиками, сестра Екатерина Логвиновна, пройдя свой нелегкий жизненный путь, стала известным ученым-математиком (одной из первых в СССР программисток и чл.-корр. НАН Украины) и жена Ирина Константиновна (рис. 13), ставшая с 1952 г. педагогом-математиком в высшей школе УССР и надежной опорой в жизни Владимира Логвиновича [4, 41]. Вместе с ней и своими детьми – сыном Валерием и дочерью Ириной они достойно «*прошли по жизни, перенося все радости и горести*» [4, 42].



Рис. 13. Любимая жена и жизненная опора академика НАН Украины Рвачева В.Л., преподаватель математики Харьковского танкового училища (с марта 2003 г. это учебное заведение вошло в качестве факультета в состав ХПИ) Ирина Константиновна Рвачева (Семирай) (1965 г., г. Харьков) [4]

В [4, 42] достойная и преданная ученица академичка НАНУ Рвачева В.Л., д.т.н., проф., заведующая кафедрой прикладной математики НТУ «ХПИ» Лидия Васильевна Курпа о своем учителе написала следующие замечательные слова: «...*Политехники будут всегда хранить светлую память об этом талантливом Ученом, великом Учителе и незаурядном Человеке*».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 26: Три портрета всемирно известных математиков Харьковщины // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №3. – С. 3-13.
2. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 27: Портрет харьковского математика Наума Ильича Ахиезера // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №4. – С. 3-6.
3. Владимир Логвинович Рвачев / АН УССР (Биобиблиография ученых Укр. ССР). Сост. Л.М. Гопко, Л.К. Кравченко. Отв. ред. академик А.К. Шидловский. – Киев: Наукова думка, 1988. – 52 с.
4. Рвачев Владимир Логвинович. Се человек. Много званных – Мало избранных: Биограф. сб. / Редкол.: Курпа Л.В., Шматко Т.В., Шматко А.В. Под общ. ред. проф. Л.В. Курпа. – Харьков: Новое слово, 2006. – 80 с.
5. Рвачев В.Л. Давление на упругое полупространство штампа, имеющего в плане форму полосы // *Прикладная математика и механика*. – 1956. – Т.20. – Вып.2. – С. 248-254.
6. Моссаковский В.И., Рвачев В.Л. К задаче о горизонтальном гидродинамическом ударе сферы // *Прикладная математика и механика*. – 1958. – Т.22. – Вып.6. – С. 847-849.
7. Рвачев В.Л. О характере распределения давления под штампом, очерченным в плане двумя соприкасающимися окружностями // *Известия АН СССР. Механика и машиностроение*. – 1959. – №2. – С. 147-158.
8. Раков А.Х., Рвачев В.Л. Контактна задача теорії пружності для півпростору, модуль пружності якого є степенева функція глибини // *Доповіді АН УРСР*. – 1961. – №3. – С. 286-290.
9. Білик Г.І., Рвачев В.Л. Про основне інтегральне рівняння контактної задачі теорії пружності для півпростору, модуль пружності якого є степенева функція глибини // *Доповіді АН УРСР*. – 1962. – №8. – С. 1041-1044.
10. Рвачев В.Л. Об аналитическом описании некоторых геометрических объектов // *Доклады АН СССР*. – 1963. – Т.153. – №4. – С. 765-768.
11. Рвачев В.Л. До розв'язку однієї задачі теорії потенціалу // *Доповіді АН УРСР*. – 1958. – №2. – С. 144-146.
12. Рвачев В.Л., Ющенко Е.Л. Некоторые вопросы аналитического описания геометрических объектов сложной логической структуры. – Киев: Знание УССР, 1965. – 53 с.
13. Рвачев В.Л., Стоян Ю.Г. К вопросу об оптимальном раскрое материала // *Вопросы теоретической кибернетики*. – Киев: Наукова думка, 1965. – С. 189-199.
14. Волков А.П., Кравченко В.Ф., Манько Г.П., Рвачев В.Л. О решении одной краевой задачи методом R -функций // *Дифференциальные уравнения*. – 1967. – Т.3. – №9. – С. 1602-1605.
15. Рвачев В.Л., Шкляров Л.Й. R_x -функції // *Доповіді АН УРСР. Сер. А*. – 1968. – №5. – С. 415-417.
16. Рвачев В.Л., Учішвілі Л.О. Розрахунок вільно опертих пластинок методом R -функцій // *Доповіді АН УРСР. Сер. А*. – 1968. – №10. – С. 935-937.
17. Рвачев В.Л., Ракова Л.В. Застосування методу R -функцій до розв'язку задачі про визначення частот і форм власних коливань пластин складної форми // *Доповіді АН УРСР. Сер. А*. – 1969. – №10. – С. 902-905.
18. Кравченко В.Ф., Поляков В.Ф., Рвачев В.Л. К решению задачи дифракции плоской волны на системе из двух металлических лент методом R -функций // *Радиотехника*. – 1970. – Вып.13. – С. 168-176.
19. Рвачев В.Л., Ярмолюк В.К. Про застосування методу R -функцій для розв'язання стаціонарних задач теплопровідності та електродинаміки // *Доповіді АН УРСР. Сер. А*. – 1971. – №11. – С. 1003-1005.
20. Рвачев В.Л. Теория R -функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наукова думка, 1982. – 552 с.
21. Рвачев В.Л. Геометрические приложения алгебры логики. – Киев: Наукова думка, 1967. – 212 с.
22. Рвачев В.Л. Методы алгебры логики в математической физике. – Киев: Наукова думка, 1974. – 259 с.
23. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
24. Рвачев В.Л., Слесаренко А.П. Об одной модификации структурного метода при решении смешанных краевых задач теплопроводности для областей сложной формы // *Математическая физика*. – 1974. – Вып.15. – С. 137-140.
25. Кравченко В.Ф., Полевой В.И., Рвачев В.Л. К расчету основных параметров антенн сложной формы методом R -функций // *Метрологические вопросы радиофизики*. – Л.: ВНИИ метрологии, 1974. – С. 87-106.
26. Рвачев В.Л., Шейко Т.И. К вопросу распределения электрического потенциала при течении проводящей жидкости в неоднородном магнитном поле // *Математическая физика*. – 1975. – Вып.18. – С. 135-139.
27. Рвачев В.Л., Слесаренко А.П. Алгебра логики и интегральные преобразования в краевых задачах. – Киев: Наукова думка, 1976. – 287 с.
28. Рвачев В.Л., Проценко В.С. Контактные задачи теории упругости для неклассических областей. – Киев: Наукова думка, 1977. – 235 с.
29. Рвачев В.Л., Слесаренко А.П. Алгебро-логические и проекционные методы в задачах теплообмена. – Киев: Наукова думка, 1978. – 140 с.
30. Рвачев В.Л., Рвачев В.А. Теория приближений и атомарные функции. – М.: Знание, 1978. – 64 с.
31. Рвачев В.Л., Рвачев В.А. Неклассические методы теории приближений в краевых задачах. – Киев: Наукова думка, 1979. – 196 с.
32. Рвачев В.Л., Синекон Н.С. Формулы свертки в методе R -функций и их применение к построению структур решений краевых задач // *Доклады АН СССР*. – 1980. – Т.255. – №1. – С. 80-83.
33. Рвачев В.Л., Синекон Н.С. Приближенное решение плоской задачи теории упругости для ортотропного тела методом R -функций // *Доповіді АН УРСР. Сер. А*. – 1981. – №10. – С. 61-64.
34. Рвачев В.Л., Манько Г.П. Автоматизация программирования в краевых задачах. – Киев: Наукова думка, 1983. – 230 с.
35. Рвачев В.Л., Курпа Л.В., Шевченко А.Н. Метод R -функций в задачах о нестационарных колебаниях пластин // *Проблемы прочности*. – 1984. – №6. – С. 22-25.
36. Рвачев В.Л., Курпа Л.В. Метод R -функций в задачах об изгибе анизотропных пластин // *Доклады АН СССР*. – 1985. – Т.280. – №2. – С. 314-317.
37. Рвачев В.Л., Курпа Л.В. R -функции в задачах теории пластин. – Киев: Наукова думка, 1987. – 175 с.
38. Рвачев В.Л., Манько Г.П. Теория R -функций в математическом моделировании физических полей // *Электронное моделирование*. – 1987. – Т.9. – №2. – С. 3-6.
39. https://ru.wikipedia.org/wiki/Рвачёв,_Владимир_Логвинович.
40. <http://rvachev.narod.ru>.
41. <http://www.ipmach.kharkov.ua/PersonPages/Rvachev.htm>.
42. <http://polytechnic.kpi.kharkov.ua/ViewArticle.aspx?id=1171>.
43. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1289464>.

REFERENCES

1. Baranov M.I. an anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 26: Three portraits of worldwide known mathematicians of Kharkov region *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 3-13. (Rus).
2. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 27: Portrait of the Kharkov mathematician Naum Il'ich Akhiezer. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 3-6. (Rus).
3. Gopko L.M., Kravchenko L.K., Shidlovskij A.K. *Vladimir Logvinovich Rvachev. AN USSR (Biobibliografija uchenyh Ukr. SSR)*. [Vladimir Logvinovich Rvachev. Ukrainian Academy of Sciences (Biobibliography scientists Ukr. SSR)]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 52 p. (Rus).
4. Kurpa L.V., Shmatko T.V., Shmatko A.V. *Rvachev Vladimir Logvinovich. Se chelovek. Mnogo zvanyh – Malo izbrannyh* [Rvachev Vladimir Logvinovich. It homo. Many are called – Not selected]. Kharkov, Novoe slovo Publ., 2006. 80 p. (Rus).
5. Rvachev V.L. The pressure on the elastic half-space stamp, in terms of having a band shape. *Prikladnaja matematika i mekhanika – Applied Mathematics and Mechanics*, 1956, vol.20, no.2, pp. 248-254. (Rus).
6. Mossakovskiy V.I., Rvachev V.L. On the problem of horizontal hydrodynamic shock sphere. *Prikladnaja matematika i mekhanika – Applied Mathematics and Mechanics*, 1958, vol.22, no.6, pp. 847-849. (Rus).
7. Rvachev V.L. The character of the pressure distribution under the stamp, outlined in the plan two contiguous circles. *Izvestija AN SSSR. Mekhanika i mashinostroenie – Proceedings of Academy of sciences of the USSR. Mechanics and machine construction*, 1959, no.2, pp. 147-158. (Rus).
8. Rakov A.Kh., Rvachev V.L. Contact task theories of resiliency for half-space the module of resiliency of which is the sedate function of depth. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR*, 1961, no.3, pp.286-290. (Ukr).
9. Bilik G.I., Rvachev V.L. About main integral equalization of contact task theories of resiliency for half-space the module of resiliency of which is the sedate function of depth. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR*, 1962, no.8, pp. 1041-1044. (Ukr).
10. Rvachev V.L. An analytical description of some geometric objects. *Doklady AN SSSR – Reports of Academy of sciences of the USSR*, 1963, vol.153, no.4, pp. 765-768. (Rus).
11. Rvachev V.L. To the decision of one task of theory of potential. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR*, 1958, no.2, pp. 144-146. (Ukr).
12. Rvachev V.L., Yushchenko E.L. *Nekotorye voprosy analiticheskogo opisaniia geometricheskikh ob'ektov slozhnoi logicheskoi struktury* [Some questions the analytical description of geometric objects with complex logic structure]. Kiev, Znanie USSR Publ., 1965. 53 p. (Rus).
13. Rvachev V.L., Stoyan Yu.G. On the optimal cutting material. *Voprosy teoreticheskoy kibernetiki – Questions of theoretical cybernetics*, 1965, pp. 189-199. (Rus).
14. Volkov A.P., Kravchenko V.F., Man'ko G.P., Rvachev V.L. On the solution of boundary task method by R- functions. *Differencial'nye uravnenija – Differential equations*, 1967, vol.3, no.9, pp. 1602-1605. (Rus).
15. Rvachev V.L., Shklyarov L.I. R_x - functions. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR. Ser. A – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR. Ser. A*, 1968, no.5, pp. 415-417. (Ukr).
16. Rvachev V.L., Uchishvili L.O. Calculation freely being plates by a method R- functions. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR. Ser. A – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR. Ser. A*, 1968, no.10, pp. 935-937. (Ukr).
17. Rvachev V.L., Rakova L.V. Use of method for the decision of task on determination of frequencies and forms of vibrations of plates of difficult form. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR. Ser. A – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR. Ser. A*, 1969, no.10, pp. 902-905. (Ukr).
18. Kravchenko V.F., Polyakov V.F., Rvachev V.L. Solution of the task of diffraction of a plane wave by a system of two metal strips by a method R- functions. *Radiotekhnika – Radio engineering*, 1970, no.13, pp. 168-176. (Rus).
19. Rvachev V.L., Yarmolyuk V.K. About the use method R- functions for the decision of stationary tasks of heat conductivity and electrodynamics. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR. Ser. A – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR. Ser. A*, 1971, no.11, pp. 1003-1005. (Ukr).
20. Rvachev V.L. *Teorija R- funkcij i nekotorye ee prilozhenija* [Theory R- functions and some its applications]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982. 552 p. (Rus).
21. Rvachev V.L. *Geometricheskie prilozhenija algebry logiki* [Geometric algebra application logic]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1967. 212 p. (Rus).
22. Rvachev V.L. *Metody algebry logiki v matematicheskoy fizike* [Methods of algebra of logic in mathematical physics]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 259 p. (Rus).
23. *Bol'shoy illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
24. Rvachev V.L., Slesarenko A.P. On a modification of the structural method for solving mixed boundary tasks of heat conduction for areas of complex shape. *Matematicheskaja fizika – Mathematical physics*, 1974, no.15, pp. 137-140. (Rus).
25. Kravchenko V.F., Polevoy V.I., Rvachev V.L. The calculation of the basic parameters of antennas complex shapes by R- functions. *Metrologicheskie voprosy radiofiziki – Metrological questions of radiophysics*, 1974. pp.87-106. (Rus).
26. Rvachev V.L., Sheyko T.I. On the question of the distribution of the electric potential in the course of conducting liquid in a nonuniform magnetic field. *Matematicheskaja fizika – Mathematical physics*, 1975, no.18, pp. 135-139. (Rus).
27. Rvachev V.L., Slesarenko A.P. *Algebra logiki i integral'nye preobrazovanija v kraevykh zadachah* [The algebra of logic and integral transformations in the boundary tasks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976. 287 p. (Rus).
28. Rvachev V.L., Procenko V.S. *Kontaktnye zadachi teorii uprugosti dlja neklassicheskikh oblastej* [The contact tasks theories of resiliency for non-classical areas]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 235 p. (Rus).
29. Rvachev V.L., Slesarenko A.P. *Algebro-logicheskie i proekcionnye metody v zadachah teploobmena* [Algebraic, logical and projection methods in tasks of thermal exchange]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 140 p. (Rus).
30. Rvachev V.L., Rvachev V.A. *Teorija priblizhenij i atomarnye funktsii* [Approximation theory and atomic functions]. Moscow, Znanie Publ., 1978. 64 p. (Rus).
31. Rvachev V.L., Rvachev V.A. *Neklassicheskie metody teorii priblizhenij v kraevykh zadachah* [Non-classical methods of approximation theory to boundary tasks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 196 p. (Rus).
32. Rvachev V.L., Sinekop N.S. Formula convolution method R- functions and their application to the construction of structures of solutions of boundary tasks. *Doklady AN SSSR – Reports of Academy of sciences of the USSR*, 1980, vol.255, no.1, pp. 80-83. (Rus).
33. Rvachev V.L., Sinekop N.S. An approximate solution of the plane task theories of resiliency for orthotropic body R- functions method. *Dopovidi AN Ukrainskoj SSR. Ser. A – Reports of Academy of sciences of the Ukrainian SSR. Ser. A*, 1981, no.10, pp. 61-64. (Rus).
34. Rvachev V.L., Man'ko G.P. *Avtomatizacija programmirovaniia v kraevykh zadachah* [Automation programming in of boundary tasks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 230 p. (Rus).

35. Rvachev V.L., Kurpa L.V., Shevchenko A.N. R– functions method in tasks of non-stationary vibrations of plates. *Problemy prochnosti – Problems durability*, 1984, no.6, pp. 22-25. (Rus).
36. Rvachev V.L., Kurpa L.V. Method R– functions in tasks of bending of anisotropic plates. *Doklady AN SSSR – Reports of Academy of sciences of the USSR*, 1985, vol.280, no.2, pp. 314-317. (Rus).
37. Rvachev V.L., Kurpa L.V. *R– funkcii v zadachah teorii plastin* [R– functions in of tasks theory of plates]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 175 p. (Rus).
38. Rvachev V.L., Man'ko G.P. Theory R– functions in the mathematical modeling of physical fields. *Elektronnoe modelirovanie – Electronic modeling*, 1987, vol.9, no.2, pp. 3-6. (Rus).
39. Rvachev Vladimir Logvinovich (Rvachev Vladimir Logvinovich) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Рвачёв_Владимир_Логвинович (accessed 28 February 2013). (Rus).
40. Available at: <http://rvachev.narod.ru> (accessed 08 October 2013). (Rus).
41. Available at: <http://www.impach.kharkov.ua/Person/Pages/Rvachev.htm> (accessed 20 August 2012). (Rus).
42. Available at: <http://polytechnic.kpi.kharkov.ua/ViewArticle.aspx?id=1171> (accessed 12 March 2014). (Rus).
43. Available at: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1289464> (accessed 11 May 2014). (Rus).

Поступила (received) 03.07.2015

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 30: Portrait of the Kharkov mathematician, mechanical engineer and cyberneticist Vladimir Logvinovich Rvachev.

Purpose. Description of basic scientific achievements, features of personality and way of life of the known Kharkov mathematician, mechanical engineer and cyberneticist, academician of NAS of Ukraine Rvachev V.L. in the short form is presented. **Methodology.** Existent scientific approaches for treatment and systematization of mathematical knowledges, modern achievements in area of methods of direct solution of linear (nonlinear) boundary problems of mechanics and mathematical physics with the scope terms of different types for the physical bodies of difficult geometrical form. Methods of historical method at research of development in society of analytical geometry, applied mathematics, classical mechanics and mathematical physics. **Results.** Short information is resulted about the basic creative and vital stages, and also fundamental scientific achievements of the indicated scientist-mathematician the scientific legacy of which entered in the treasure-house of world mathematical science. Are some personal qualities of this prominent soviet Ukrainian mathematician of the 20-th century, forming scientific school on the mathematical method of R–functions and leaving about itself kind memory for thankful students and descendants. **Originality.** First taught in 1970-th at the known mathematician of contemporaneity of Rvachev V.L. to bases of the applied mathematics and theory of R–functions by a scientist-electrophysicist from the Kharkov polytechnic institute presented for the wide circle of readers a short scientifically-historical essay about this large scientist-teacher, being based on his scientific labours, published biobibliographic materials and flashbacks of his devoted students-followers about him. **Practical value.** Scientific popularization of the special physical and mathematical knowledges and distinguished scientific achievements of the known Kharkov scientist-mathematician Rvachev V.L. in area of the applied mathematics, classical mechanics of continuous media, mathematical physics and technical cybernetics. References 43, figures 13.

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

О.Г. Волкова, Л.Б. Жорняк

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ

Характер взаємодії робочих поверхонь сильнострумних електричних контактів однозначно впливає на їх працездатність. До відмови в роботі контактів в основному приводять процеси, що виникають в результаті комплексу факторів деструктивно впливаючи на їх працездатність. При цьому не всі процеси докладно вивчені і піддаються моделюванню. Одним з істотних чинників, що впливає на роботу контактної пари, служить зусилля стискання контактних поверхонь. Стискання розривних контактів прямо пов'язане з процесами пружної і пластичної деформації контактних матеріалів, що наочно виявляються на контакт-деталях з порошкових або композиційних матеріалів. У статті основна увага приділяється пластичній деформації поверхневих шарів розривних контактів у процесі замикавання, оскільки вважається, що вона прямо пов'язана з механізмом провідності контактів. Як показано, істотний вплив на деформацію контактних поверхонь має і робоче середовище, зокрема трансформаторне масло. Оцінка впливу зусилля стиснення на деформацію контактної поверхні проводилася експериментально з використанням методу голографічної інтерферометрії. Наведено результати експериментальних досліджень, в яких вказується, що для компактних і порошкових матеріалів пластична деформація всередині і навколо зони мікроконтактів наводиться спрощено, що вимагає експериментального уточнення. Бібл. 7, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: електричні контакти, контактні поверхні, деформація контактних матеріалів, метод голографічної інтерферометрії.

Характер взаимодействия рабочих поверхностей сильноточных электрических контактов однозначно влияют на их работоспособность. К отказу в работе контактов в основном приводят процессы, возникающие в результате комплекса факторов деструктивно влияющих на их работоспособность. При этом не все процессы подробно изучены и поддаются моделированию. Одним из существенных факторов, влияющим на работу контактной пары, служит усилие сжатия контактных поверхностей. Сжатие разрывных контактов напрямую связано с процессами упругой и пластической деформации контактных материалов, что особенно наглядно проявляются на контакт-деталях из порошковых или композиционных материалов. В статье основное внимание уделяется пластической деформации поверхностных слоев разрывных контактов в процессе замыкания, поскольку считается, что она напрямую связана с механизмом проводимостью контактов. Как показано, существенное влияние на деформацию контактных поверхностей оказывает и рабочая среда, в частности трансформаторное масло. Оценка влияния усилия сжатия на деформацию контактной поверхности проводилась экспериментально с использованием метода голографической интерферометрии. Приведены результаты исследования, в которых указывалось, что для компактных и порошковых материалов пластическая деформация внутри и вокруг зоны микроконтактов указывается упрощенно, что требует экспериментального уточнения. Библ. 7, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: электрические контакты, контактные поверхности, деформация контактных материалов, метод голографической интерферометрии.

Введение. Механизм проводимости тока через контакты определяется состоянием контактных поверхностей и условиями контактирования. Известно, что усилие сжатия является одним из основных факторов, формирующих характер контактного взаимодействия. Без достаточного усилия сжатия растет переходное сопротивление, или полностью нарушается проводимость контактов. Проводимость пропорциональна усилию сжатия, приводящему вначале к упругой, а затем и к пластической деформации контактных поверхностей. Естественно, что вместе с изменением усилия сжатия, изменяется и внутреннее механическое напряжение в контактном материале. Картина пластической деформации порошковых и композиционных материалов имеет более сложный характер, чем для компактных (литых) материалов и оценка поведения поверхностей контакт-деталей из этих материалов должна опираться на экспериментальные наблюдения, а не упрощенные модели.

Целью статьи является демонстрация возможности использования метода голографической интерферометрии для оценки пластической деформации в зоне контактного взаимодействия.

Моделирование взаимодействия контактных поверхностей. Экспериментально доказано, что с уменьшением усилия сжатия в 2 раза, переходное

сопротивление контакт-деталей в зависимости от их размеров может увеличиться в 4 и более раз. Для сильноточных контактов существует эмпирическая зависимость [1], показывающая, что переходное сопротивление R_n , в основном, является функцией усилия сжатия, а роль других факторов, например поверхностных пленок – второстепенна и учитывается поправочными коэффициентами:

$$R_n = \frac{k \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T)}{(0,1 \cdot P_K)^m}.$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; T – температура нагрева контакта, $^\circ\text{C}$; P_K – сила сжатия контактов, Н; k , m – коэффициенты, учитывающие материал контактов и характер контактирования.

Желание найти общие закономерности переходного сопротивления от усилия сжатия приводит к моделированию контактных задач на упрощенных моделях. Например, при моделировании контактного взаимодействия в виде сжатия двух упругих сферических поверхностей. Согласно формуле Герца, радиус площадки контактирования такой модели будет равен:

© О.Г. Волкова, Л.Б. Жорняк

$$r = 0,9 \cdot 3 \sqrt{\frac{P_K r_{\text{пр}}}{E}},$$

где P_K – сила сжатия контактов; $r_{\text{пр}}$ – приведенный радиус кривизны контактных поверхностей; E – модуль упругости контактных материалов [2].

В этом случае переходное сопротивление может быть выражено формулой

$$R_{\text{п}} = \frac{\varepsilon}{P_K^{1/3}}.$$

В диапазоне усилия сжатия от 20 до 500 Н, что характерно для большинства коммутационных устройств, значения эмпирического коэффициента ε можно принять следующие: для меди $47 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{кг}^{1/3}$; для латуни $200 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{кг}^{1/3}$.

При пластическом характере контактного взаимодействия, когда радиус площадки смятия определяется уравнением

$$r = \sqrt{\frac{P_K}{\pi \sigma_{\text{см}}}},$$

где $\sigma_{\text{см}}$ – временное сопротивление смятию контактных материалов, то переходное сопротивление контакта оценивается как [2]

$$R_{\text{п}} = \frac{k}{P_K^{1/2}},$$

где коэффициент k для некоторых видов контактных материалов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Свойства контактных материалов

Материалы контактов	Коэффициент k для силовых контактов, Ом кг ^{1/2}
Медь	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Серебро	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Латунь	$6,7 \cdot 10^{-4}$
Сталь	$7,6 \cdot 10^{-4}$

Соотношение между приложенной нагрузкой и фактической площадью контакта может быть представлено как

$$P_{K1} = \zeta \cdot H \cdot A_i,$$

где $1/3 \leq \zeta \leq 1$ – коэффициент, учитывающий упругую составляющую деформации контактных поверхностей; H – твердость контактных материалов с учетом температуры; A_i – площадь фактического контакта.

Руководствуясь подобными моделями, контактную задачу на ЭВМ решают численными методами с одновременной оценкой зон контактного взаимодействия с упругой и пластической деформацией.

Существуют пакеты программ, позволяющие моделировать эти процессы и обеспечить их контроль. Таким требованиям во многом отвечают пакеты программ для конечно-элементного анализа (например ANSYS), которые в последнее время широко используются в расчетах различных механических конструкций.

Общий подход к решению задач контактного взаимодействия твердых поверхностей сводится к поэтапной реализации следующих базовых шагов расчета [3]:

1. Создание твердотельных объектов, которые отображают геометрию замыкаемых контактов, и их точное разбиение.

2. Установление контактной пары.

3. Назначение целевой и контактной поверхностей, элементы которых связаны между собой физическими постоянными и позволяют учесть кинематику контактной деформации.

4. Установление ключевых опций элементов и реальных постоянных контактирующих поверхностей.

5. Определение движения жесткой контактной поверхности.

6. Задание необходимых граничных условий.

7. Задание опций силового нагружения и решения задачи.

8. Решение контактной задачи.

9. Анализ результатов.

В качестве примера может быть рассмотрена двумерная картина контактного взаимодействия главных контактов контактора РПН типа КНОА 110/1000. На рис. 1 представлены элементы контактной пары в виде замкнутых упругопластических тел, покрытых сеткой конечных элементов (КЭ).

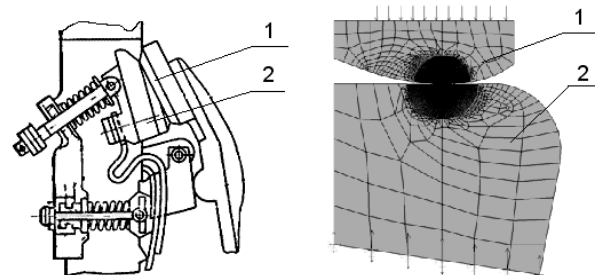


Рис. 1. Пример использования конечно-элементного анализа для изучения взаимодействия контактных пар:

1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт

Внедрение таких методик при условии стабильности механических свойств контактных поверхностей, позволит решать контактные задачи оперативно и с большей точностью. Однако при оценке влияния силы сжатия необходимо учитывать механические характеристики контактных материалов (при рабочих температурах), конфигурацию и микрогеометрию контактирующих поверхностей, а также механические и адгезионные свойства поверхностных пленок и др. Такое количество факторов позволяет утверждать, что аналитическим путем нельзя установить общую закономерность для усилия сжатия, гарантирующего оптимальную работу контактов [4].

Экспериментальное определение деформации контактной поверхности. Методы моделирования не позволяют достаточно полно учитывать реальный характер взаимодействия контакт-деталей при длительной эксплуатации, в силу развития деструктивных процессов на их поверхностях. Это не только экранирующее действие поверхностных пленок, влияние которых хорошо известно [5], но и пластическая деформация поверхности контактов. Причиной этому может служить завышенное значение силы сжатия контактных поверхностей, электротермические процессы, а также пластифицирующий эффект окружающей среды, например трансформаторного масла.

В целом, деформация поверхностного слоя имеет сложный механизм, поскольку пластичный контактный материал способен не только растекаться, но и внедряться в тело контакта. Под действием усилия сжатия изменяется и внутреннее механическое напряжение в контактном материале. Усилие сжатия, устанавливаемое в значениях максимально возможных для конкретной контактной пары, не только улучшает проводимость, но и приводит к деформации и разрушению контактных поверхностей при эксплуатации, а, следовательно, снижает их работоспособность.

Особенно наглядно эти процессы проявляются в контактных парах из порошковых и композиционных материалов. Широкое применение многокомпонентных порошковых материалов для разрывных контактов в силовых коммутационных устройствах является обычной практикой. Работа таких материалов вызывает интерес в силу их специфического поведения, что требует более подробного изучения.

Многокомпонентные порошковые и композиционные материалы, как правило, обладают достаточно высокой прочностью, что объясняется наличием каркасной структуры. Рассмотрим это на примере контактного материала КМК-Б20, применяемого для силовых контактов в контакторах РПН (рис. 2).

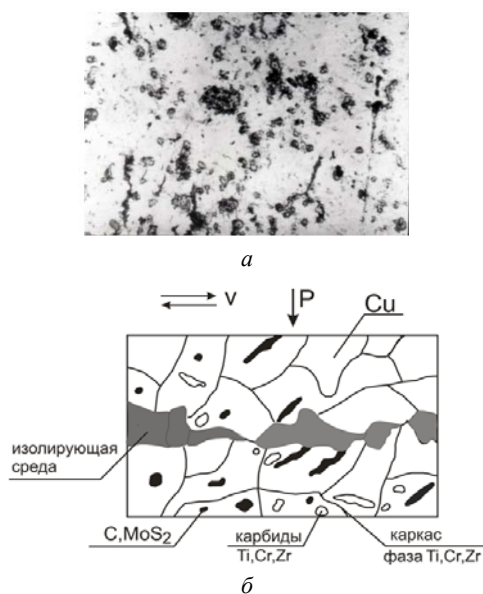


Рис.2. Структура многокомпонентного порошкового материала (а) и модель контактной поверхности (б)

Каркас, состоящий из твердых соединений на основе W, Ni или Ti, Cr, Zr воспринимает основную механическую нагрузку от усилия сжатия и смещения, что стабилизирует величину деформации внутри материала и на контактной поверхности. Для улучшения антифрикционности и обеспечения значений твердостей контактной пары в состав материала вводят твердые смазки в виде дисульфида молибдена, графита и ряда других. Пластичная электропроводная основа (медь) порошкового материала во многом разгружается от приложения усилия сжатия и усилия смещения, а ее только объемы, прилегающие к зоне непосредственного контакта, испытывают напряженное состояние.

Кроме диссипации механической энергии вследствие сжатия и трения контактных поверхностей при переключении, происходит и накопление остаточных напряжений на площадках фактического контакта [6]. Вследствие случайности формы и размеров шероховатостей, а также их местоположения на поверхности трения, остаточные напряжения случайным образом распределяются по поверхности и во времени. Существенную роль при этом играет и пористость структуры. Если на одних участках в данный момент времени идет накопление внутренней энергии (упругая деформация), то на других этот процесс может, достигнув максимума затухать с выделением тепла или образованием очагов разрушения. Область повышенной пластичности в общем случае, совпадает с областью наибольших механических напряжений, т.е. с центральной областью площадки касания. После многократных циклов замыкания-размыкания контактов создаются предпосылки для зарождения трещин, приводящие к разрушению рабочих поверхностей контактной пары. Наличие стохастически расположенной в порошковом материале пористости проявляется трещинами разрушения и податливостью в зоне контактирования.

Отклонения в поведении поверхностей контактов из компактных и порошковых материалов, можно наблюдать на модели контактной пары в конструкции РПН типа РНТА 35/320. Для сравнения материалами подвижных контактов были выбраны медь М1 и порошковый материал КМК-Б20. Материалом неподвижного контакта в обоих случаях была латунь ЛС59-1.

В эксперименте была использована методика исследования контактного взаимодействия твердых тел с помощью голографической интерферометрии, позволяющая регистрировать вектор смещения точек приконтактной области путем двойной экспозиции объекта наблюдения при освещении источником когерентного излучения.

В процессе эксперимента контакты закреплялись в опорной призме с нагружающим устройством и являлись объектом съемки в голографической схеме, как показано на рис. 3. Первоначально проводилась съемка контактов на пластинку в ненагруженном состоянии. В дальнейшем проводится повторное экспонирование нагруженных контактов силами сжатия P , Q_1 , Q_2 на ту же фотопластинку.

Если полученную таким образом дважды экспонированную голограмму осветить копией опорной волны, то наблюдается голографическое изображение контактной пары с наложением сетки интерференционных полос. Полосы локализованы как на объекте съемки, так и на прилегающей к нему зоне. Фотокопии таких голограмм представлены на рис. 4.

Количественная оценка деформации контактной поверхности проводилась путем отслеживания отклонения интерференционных полос от так называемой полосы нулевого порядка. В нашем случае интерференционная полоса нулевого порядка определяется как единственная, не изменяющая своего положения при двойном экспонировании. Визуально это определяется как максимально яркая полоса на интерферограмме [7].

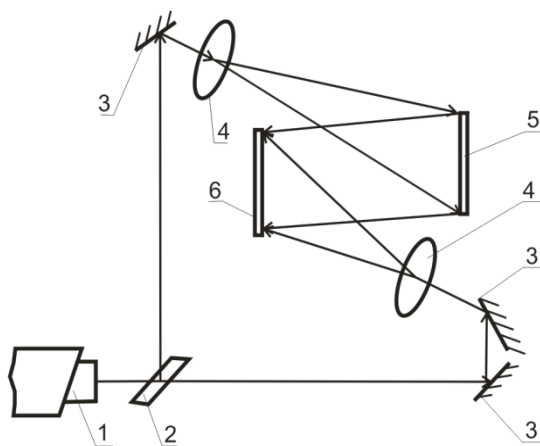


Рис. 3. Схема голографического интерферометрирования по методу двойной экспозиции: 1 – лазер ЛГ-38; 2 – делитель; 3 – зеркало; 4 – линза; 5 – объект; 6 – фотопластинка

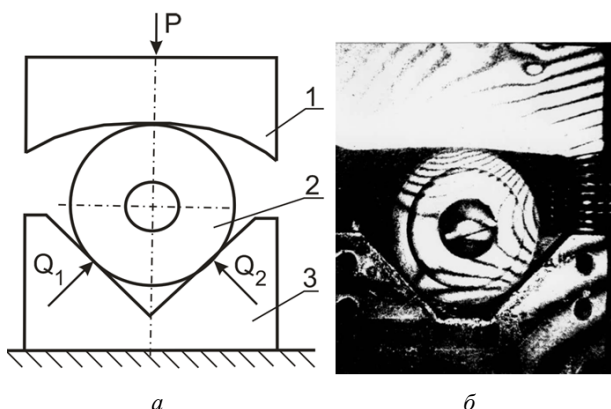


Рис. 4. Схема нагружения (а) и голограмма контактной пары (б): 1, 2 – неподвижный и подвижный контакты; 3 – опорная призма

Определение деформации проводилось по снимкам с учетом положения интерференционной полосы нулевого порядка и вектора перемещения направленного перпендикулярно поверхности контактирования. Различие в податливости участков контактных поверхностей хорошо заметно по количеству полос интерференции. Чем теснее их сетка, тем больше перемещение. На это наглядно указывает разница полос на стальной призме и на контакте.

Расчет перемещения контактной поверхности сводился к умножению порядкового номера интерференционного максимума на численное значение длины волны источника излучения (в нашем случае 0,3162 мкм). Условно обозначив на снимке порядковыми номерами светлые полосы, определяли смещение по формуле

$$Z(x) = \frac{N\lambda}{2}.$$

где $Z(x)$ – перемещение, мкм; N – число полос; λ – длина волны, мкм.

Изучение перемещений контактной поверхности проводилось в статическом режиме. В процессе эксперимента силу P изменяли ступенчато в диапазоне изменения силы сжатия контактов реального устройства. При этом была возможность в зону контактирования подавать трансформаторное масло, что имити-

ровало условия работы контактов в маслonaполненных коммутационных устройствах. Данные, полученные в результате использования следующей методики, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные перемещения контактных поверхностей при различных условиях нагружения, мкм

Материал	Нагрузка P , Н			Твердость НВ
	1300	2700	4000	
М1	0,632/1,264*	1,264/3,160*	4,100/8,010*	100-110
КМК-Б20	0,630/1,900*	1,900/6,320*	4,480/8,220*	120-150

*присутствие трансформаторного масла в зоне контакта

По результатам эксперимента видно, что сравнение степени деформации контактных поверхностей из компактных (литых) и порошковых материалов по критерию их твердости не достаточно корректно, поскольку на деформацию контактной поверхности большое влияние оказывают неоднородность структуры и пористость порошковых материалов.

Данным методом возможно определять предельную нагрузку для контактных материалов не прибегая к их разрушению, а также прогнозировать поведения контактов при длительной эксплуатации.

Выводы.

1. Методом голографической интерферометрии возможно исследовать взаимодействие поверхностей разрывных контактов сильноточных коммутационных устройств. Экспериментально полученные результаты дают более точную картину деформации контактной поверхности с учетом множества факторов, которые нельзя учесть при моделировании.

2. Обнаружено влияние на деформацию контактных поверхностей внешней среды в маслonaполненных коммутационных устройствах, которая при больших нагрузках более чем в два раза увеличивает перемещение контактной поверхности без видимых повреждений при сжатии.

3. Использование экспериментального метода определения перемещения приконтактной области позволяет оптимизировать работу разрывных контактов из композиционных и порошковых материалов. Например, установлено, что для контактора РПН РНТА 35/320 усилие сжатия не должно превышать 4060 Н, а максимальная деформация контактной поверхности значений 8-11 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таев И.С. Электрические аппараты управления. – М.: Высшая школа, 1984. – 243 с.
2. Буткевич Г.В. Основы теории электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
4. Мерл В. Электрический контакт. Теория и применение на практике. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 82 с.
5. Мышкин Н.К. Электрические контакты. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 560 с.
6. Кашеев В.Н. Процессы трения в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 211 с.

7. Гинзбург В.М., Степанова Б.М. Голография. Методы и аппаратура. – М.: Советское радио, 1974. – 376 с.

REFERENCES

1. Taev I.S. *Elektricheskie apparaty upravleniia* [Electrical control apparatus]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1984. 243 p. (Rus).
2. Butkevich G.V. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Basic theory of electrical apparatus]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1970. 600 p. (Rus).
3. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow, Komp'iuter Press Publ., 2002. 224 p. (Rus).
4. Merl V. *Elektricheskii kontakt. Teoriia i primeneniia na praktike* [Electrical contact. Theory and practical application]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 82 p. (Rus).
5. Myshkin N.K. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2008. 560 p. (Rus).
6. Kashcheev V.N. *Protsessy treniia v zone friktsionnogo kontakta metallov* [Friction process in metal contact frictional zone]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 211 p. (Rus).
7. Ginzburg V.M., Stepanova B.M. *Golografiia. Metody i apparatura* [Holography. Methods and equipments]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 376 p. (Rus).

Поступила (received) 22.10.2015

Волкова Ольга Григорьевна¹, к.т.н., доц.,
Жорняк Людмила Борисовна¹, к.т.н., доц.,

¹ Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел/phone +380 6127 698304,
e-mail: volkova@zntu.edu.ua

O.G. Volkova¹, L.B. Zhornyak¹

¹ Zaporozhye National Technical University,
64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

Investigation of high-current interrupting contacts working surfaces mechanical interaction nature.

Introduction. The nature of the interaction of high-working surfaces of the electrical contact uniquely affects their performance. By the failure of the contacts in the main drive processes resulting from complex destructive factors affecting their performance. However, not all processes are studied in detail and give in modeling. **The purpose** of the paper is to show the possibility of using the method of holographic interferometry to estimate the plastic deformation in the zone of contact interaction. One of the significant factors affecting the work of the contact pair is the compressive force of the contact surfaces. Compression discontinuous contact is directly connected with the processes of elastic and plastic deformation of the contact material, which is particularly evident in the contact details of the powder or composite materials. The paper focuses on the plastic deformation of the surface layers of discontinuous contact in circuit, it is believed that it is directly related to the mechanism of conductivity of contacts. As shown, a significant effect on the deformation of the contact surfaces and renders the working environment, in particular transformer oil. **Methodology.** Assessing the impact of compression forces on the deformation of the contact surface was conducted experimentally using the method of holographic interferometry. **Results.** Experimental studies, which indicated that the compact and powder materials plastic deformation in and around the area microcontacts simplistically stated that requires experimental verification. A method for evaluating the state of stress, which affects the formation and destruction of the local contact spots. **Practical value.** Using the experimental method of determining the movement of the contact region allows you to optimize discontinuous contacts from composite and powder materials. References 7, tables 2, figures 4.

Key words: electrical contacts, contact surfaces, deformation of contact materials, method of holographic interferometry.

Н.Н. Заблодский, В.Е. Плюгин, А.Н. Петренко

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Виконано аналіз застосовності принципів об'єктно-орієнтованого проектування в розробці і оптимізації електричних машин. Розглянуті об'єктно-орієнтовані моделі електричних машин, синтез яких здійснюється як на основі положень теорії електромагнітного поля, так і на основі диференціальних рівнянь електромагнітних перехідних процесів. Обґрунтовані переваги об'єктно-орієнтованого підходу в проектуванні. Визначені основні принципи об'єктно-орієнтованого проектування. Бібл. 12, рис. 2.

Ключові слова: електрична машина, об'єктно-орієнтований, клас, об'єкт, шаблон, спадкоємство, ієрархія, проектування, математичне моделювання, електромагнітне поле, оптимізація, алгоритм.

Выполнен анализ применимости теории объектно-ориентированного анализа в проектировании и математическом моделировании электрических машин. Рассмотрены объектно-ориентированные модели электрических машин, синтез которых осуществляется как на основе положений теории электромагнитного поля, так и на основе дифференциальных уравнений электромагнитных переходных процессов. Обоснованы преимущества объектно-ориентированного подхода в проектировании. Определены основные принципы объектно-ориентированного проектирования. Библ. 12, рис. 2.

Ключевые слова: электрическая машина, объектно-ориентированный, класс, объект, шаблон, наследование, иерархия, проектирование, математическое моделирование, электромагнитное поле, оптимизация, алгоритм.

Введение. Разработка и модернизация электрических машин (ЭМ) с высокими технико-экономическими показателями является приоритетной задачей современных электромашиностроительных предприятий [1, 2]. Разработка новых модификаций ЭМ реализуется за счет индивидуального подхода к каждому проекту.

Однако, существующие методы проектирования, основанные на последовательной организации этапов проектирования, не позволяют реализовать задачи, связанные со следующим:

1) нет возможности автоматизированного переноса всего проекта или его части для создания нового, который имеет как общие признаки с базовым, так и свои собственные;

2) отсутствует механизм включения в существующий проект данных и зависимостей других проектов;

3) невозможно применять современные методы оптимизации, основанные на объектно-ориентированном представлении данных;

4) затраты ресурсов на проектирование при традиционном последовательном подходе значительно уступают объектно-ориентированным системам.

В связи с этим важной задачей является обоснование такой методики проектирования, которая позволит не только сократить сроки проектно-конструкторских работ, но также усовершенствовать процесс создания ЭМ благодаря переносу проектных методик из заранее сформированной базы данных на новую комбинацию узлов ЭМ.

В работах [3-6] были раскрыты принципы, методология и реализация объектно-ориентированного проектирования (ООП), математического моделирования и оптимизации ЭМ. В настоящей статье принципы объектно-ориентированного анализа (ООА) рассматриваются в реализации комплексного проекта ЭМ от расчета до оптимизации.

Цель работы – решение задачи повышения технико-экономических показателей ЭМ и сокращения сроков их разработки за счет применения ООП.

Постановка задачи. Традиционное проектирование сопровождается так называемым «процедурным» подходом к решению задач расчета электрической машины. Проект, построенный на основе процедурного метода, разделяется на расчетные блоки, каждый из которых выполняет некоторую законченную последовательность действий и имеет явно выраженные связи с другими блоками проекта. Расчеты разбиваются на последовательно выполняемые пункты с набором формул, жестко связанных между собой входными и выходными данными. Большое число связей между расчетными блоками и данными, в свою очередь, также порождает несколько проблем: во-первых, усложняется структура проекта; во-вторых, в проект становится трудно вносить изменения. Затраты на разработку таких проектов весьма существенны, что сказывается на дополнительных материальных затратах и повышению стоимости выпускаемой продукции. В связи с этим такая реорганизация проектирования ЭМ, которая бы позволила повысить эффективность разработки новых проектов, а также модификация существующих с минимальными ресурсными и временными затратами, имеет первостепенное значение в современном электромашиностроении.

Объектно-ориентированное проектирование реализует концепцию решения задач с использованием моделей, основанных на понятиях реального мира. Фундаментальными элементами являются класс и объект [7]. Классы позволяют выполнять конструирование из отдельных компонент, обладающих простыми инструментами. Объект при этом объединяет структуру данных (параметров с расчетными процедурами).

Основополагающей идеей ООП является объединение данных и действий, производимых над этими данными, в единое целое, которое называется объектом. В качестве примера на рис. 1 представлена структура ООП для двигателя постоянного тока.

Объектно-ориентированный проект можно представить, как «*электротехнический конструктор*»,

когда из отлаженных блоков собирается новая модификация ЭМ. Так, на рис. 2 показана ООП шнекового двигателя с массивным ротором, который составляется из модулей асинхронного двигателя (АД), машины с массивным ротором и шнека

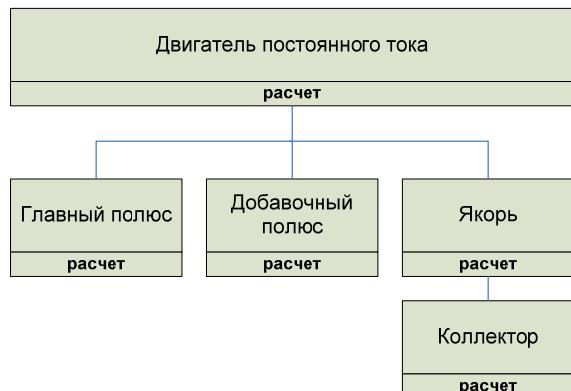


Рис. 1. Дерево наследования ДПТ в ООП

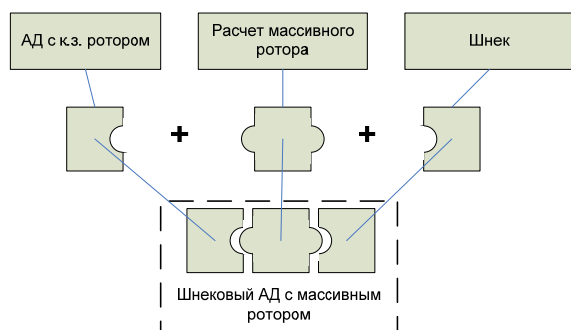


Рис. 2. Синтез ОО проекта шнекового АД с массивным ротором

Создание новых проектов при ООП, а также модификация существующих базируется на опыте предыдущих разработок, что приводит к значительному сокращению сроков разработки, снижает вероятность внесения ошибок в новый проект.

Результаты исследований. В ООП проект представляется в виде дискретных объектов, содержащих в себе данные и расчетные блоки с набором формул и логическими связями [3, 7]. Характеристиками и основными *принципами* построения объекта при этом являются: индивидуальность; классификация; наследование; полиморфизм.

Рассматривая теорию ООП, мы выходим из положения, предполагающего наличие базового класса обобщенного ЭМ, потомками которого являются известные виды ЭМ. Путем наследования, использующего рассмотренные принципы ООП, добавляются или отсекаются те признаки, которые приводят к синтезу конкретной модели ЭМ.

В качестве базовых, в терминах ООП, принимаются уравнения Максвелла классической электродинамики [8]:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \text{div} \vec{D} = \rho, \\ \text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \text{div} \vec{B} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В (1) векторы напряженности электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей связаны посредством соотношений:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2)$$

с векторами электрической $\vec{D}$ и магнитной $\vec{B}$ индукций, вектором плотности электрического тока $\vec{J}$, которые представляют собой отклик среды на наличие в ней электромагнитного поля. Соответственно, ρ – объемная плотность стороннего заряда, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, σ – удельная электрическая проводимость, относительные диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости среды.

Анализ выполненной работы показывает, что уравнения Максвелла (1) – (2), являющиеся основополагающими в теории ЭМ, полностью подтверждают заявленные принципы ООП, тем самым доказывая состоятельность объектно-ориентированного подхода в проектировании ЭМ. Таким образом, разработка теоретических основ ООП, кроме того, что повышает эффективность и качество проектирования, не противоречит принципам формообразования электромагнитных структур в ЭМ.

Практическая реализация ООП была выполнена на языке программирования Java [6]. В проекте были реализованы этапы проектирования, включающие в себя как электромагнитный расчет, так и тепловой, надежности, экономический.

Примененные объектно-ориентированные алгоритмы оптимизации, такие как Декартово произведение множеств (ДПМ) и генетический алгоритм (ГА), позволяют выполнить расчеты машины при всех возможных сочетаниях варьируемых переменных в заданных пределах и с заданным шагом при одновременном изменении варьируемых параметров [9, 10].

Для повышения эффективности работы алгоритма ДПМ процедура выборки комбинаций, прошедших проверку на ограничения, была модифицирована авторами, что повысило быстродействие работы алгоритма более чем в 10 раз [11].

Генетический алгоритм оптимизации в классической постановке был модифицирован и практически реализован авторами применительно к выборке данных ЭМ, а также с добавлением внесения изменений в диапазон варьируемых переменных без вмешательства во внутреннюю структуру алгоритма [12].

После завершения последнего этапа оптимизации, выполняется автоматизированное параметрическое проектирование оптимального электродвигателя в AutoCAD или КОМПАС с автоматической генерацией проектной и чертежной документации [6].

Принципы ООП дают возможность не только синтезировать методики проектирования ЭМ, но также рассматривать их математические модели в наследственной преемственности базового класса и классов-потомков. Это позволит подойти к проектированию как к комплексной задаче, решающей вопросы получения параметров и характеристик ЭМ в установившихся и переходных режимах работы. При этом выполняется автоматизированное генерирование математической модели произвольного вида ЭМ на этапе проектирования.

Система уравнений ЭМ базовой машины, описывает процессы преобразования энергии, состоит из четырех уравнений Кирхгофа, уравнений электромагнитного момента и движения. На основе анализа математических моделей различных типов ЭМ была составлена таблица модификаций, позволяющая генерировать их модели, используя принципы ООП. Синтез моделей ЭМ сопровождался формированием таблицы модификаторов, которые являются коэффициентами или слагаемыми, изменяющими матрицу параметров базовой математической модели [3].

Пользуясь классовым шаблоном обобщенного ЭМ и выбирая определенные признаки, можно перейти к объекту конкретного ЭМ [4]. Математическая модель переходных процессов при ООП формируется исходя из иерархического дерева наследования, таблиц модификаторов, составленных для проектируемой машины.

Практическая реализация ООП ЭМ подтверждается конкретным внедрением на промышленных предприятиях Украины.

Электродвигатель шнековый (ЭДШ), изготовленный на ОАО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса» был разработан и внедрен в производственный процесс смешивания и сушки угольного шлама на ОАО «ЦОФ Селидовская».

Для ЭДШ была составлена объектно-ориентированная методика проектирования, практически реализована на языке программирования Java, выполнено объектно-ориентированное математическое моделирование электромагнитных переходных процессов и анализ распределения электромагнитного поля.

С использованием принципов ООП были разработаны методика и компьютерная программа на языке Java для оптимального проектирования и исследования переходных режимов работы асинхронного двигателя для электроподвижного состава. Полученные результаты расчетов легли в основу полевых расчетов в 2D и 3D постановке с целью улучшения тепловых характеристик двигателя.

В качестве объекта проектирования также был рассмотрен возбудитель бесщеточный многофазный синхронный типа БТВ-12(15) (ГП «Электротяжмаш», г. Харьков) предназначенный для систем бесщеточного возбуждения турбогенератора (БВТГ) мощностью 80 МВт. Объектно-ориентированная классовая структура проекта БВТГ была реализована в программном виде на языке Java.

В качестве объекта проектирования был рассмотрен асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии АИР, разрабатываемый в ООО СКБ «Укрэлектромаш». В ходе выполнения работы было выполнено объектно-ориентированное проектирование, создана компьютерная программа на языке Java, выполнена многокритериальная оптимизация АД с применением алгоритм ДПМ. В результате оптимизации были получены параметры АД с КЗР, имеющие улучшенные, по сравнению с базовым вариантом, технико-экономические показатели.

Таким образом, методика ООП ЭМ была практически реализована в проектах, получивших практическое внедрение на промышленных предприятиях.

Выводы.

1. Объектно-ориентированное проектирование позволило реализовать формирование проектных методик и математических моделей ЭМ благодаря использованию информации базовых классов проекта при помощи модификаторов и операторов синтеза. Унифицированный шаблон позволяет переносить наработанные данные проекта на новые модификации ЭМ.

2. Объектно-ориентированная методология математического моделирования ЭМ позволяет синтезировать математические модели как существующих типов ЭМ, так и прогнозировать возможные модификации новых структур.

3. Применение принципов ООП приводит к существенному сокращению сроков проектирования, возможности параллельно с инженерным проектированием выполнять оптимизацию, математическое моделирование электромагнитных переходных процессов и анализ распределения электромагнитного поля ЭМ в рамках одного проекта.

4. Применение объектно-ориентированных методов оптимизации позволило повысить такие технико-экономические показатели ЭМ, как КПД, себестоимость, коэффициент мощности, улучшить показатели пусковых и рабочих характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Expediting and validating development [Электронный ресурс] / Режим доступа к брош.: www.iff.fraunhofer.de/en.
2. R-Designed [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://blog.caranddriver.com/r-designed-2016-volvo-xc90-gets-the-sporty-r-design-treatment-still-isnt-on-sale-yet/>.
3. Плюгин В.Е. Теоретические основы объектно-ориентированного расчета и проектирования электромеханических устройств. – Алчевск: Лад, 2014. – 200 с.
4. Pliugin V., Milykh V., Polivianchuk A., Zablodskiy N. Using of object-oriented design principles in mathematic modeling of electric machines // MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – 2015. – vol.15. – №2. – pp. 25-32.
5. Pliugin V., Shilkova L., Lettl J., Buhr K. Analysis of the electromagnetic field of electric machines based on object-oriented design principles // Proceedings 36th PIERS. – Prague: Electromagnetic Academy. – 2015. – pp. 2522-2527.
6. Заблудский М.М., Плюгин В.Є., Бур К. САПР електро-механічних пристроїв. – Навчальний посібник. – Алчевськ: Лад, 2013. – Ч. 2. – 320 с.
7. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование. – М.: Бино, 1998. – 560 с.
8. Беляев Е.Ф., Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 457 с.
9. Верещагин Н.К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Начала теории множеств. – М.: МЦНМО, 2008. – 198 с.
10. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
11. Zablodskiy N., Pliugin V., Lettl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor optimal design by use of cartesian product // Transactions on electrical engineering. – 2013. – №2. – pp. 54-58.
12. Zablodskiy N., Pliugin V., Lettl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor design by use of genetic optimization algorithms // Transactions on electrical engineering. – 2013. – №3. – pp. 65-69.

REFERENCES

1. Expediting and validating development. Available at: <http://www.iff.fraunhofer.de/en> (accessed 12 September 2015).
2. R-Designed. Available at: <http://blog.caranddriver.com/r-designed-2016-volvo-xc90-gets-the-sporty-r-design-treatment-still-isnt-on-sale-yet/> (accessed 12 September 2015).
3. Pliugin V.E. *Teoreticheskie osnovy ob'ektno-orientirovannogo rascheta i proektirovaniia elektromekhanicheskikh ustroystv* [Theoretical basis of electromechanical devices object-oriented calculation and design]. Alchevsk, Lado Publ., 2014. 200 p. (Rus).
4. Pliugin V., Milykh V., Polivianchuk A., Zablodskiy N. Using of object-oriented design principles in mathematic modeling of electric machines. *MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 2015, vol.15, no.2, pp. 25-32.
5. Pliugin V., Shilkova L., Letl J., Buhr K. Analysis of the electromagnetic field of electric machines based on object-oriented design principles. *Proceedings 36th PIERS*. Prague: Electromagnetic Academy, 2015, pp. 2522-2527.
6. Zablodskii M.M., Pliugin V.E., Buhr K. *SAPR elektromekhanichnykh prystroiv. – Navchalnyi posibnyk. Ch.2* [CAD of electromechanical devices. – Textbook. Vol.2]. Alchevsk, Lado Publ., 2013. 320 p. (Ukr).
7. Buch G. *Ob'ektno-orientirovannyi analiz i proektirovanie* [Object-oriented analysis and design]. Moscow, Binom Publ., 1998. 560 p. (Rus).
8. Beljaev E.F., Shulakov N.V. *Diskretno-polevye modeli elektricheskikh mashin* [Discrete field models of electrical machines]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2009. 457 p. (Rus).
9. Vereshhagin N.K., Shen' A. *Lekcii po matematicheskoi logike i teorii algoritmov. Nachala teorii mnozhestv* [Lectures on mathematical logic and theory of algorithms. Beginning of set theory]. Moscow, MCNMO Publ., 2008. 198 p. (Rus).
10. Emel'janov V.V., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. *Teoriya i praktika evolyucionnogo modelirovaniia* [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow, Phizmatlit Publ., 2003. 432 p. (Rus).
11. Zablodskiy N., Pliugin V., Letl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor optimal design by use of cartesian product. *Transactions on electrical engineering*, 2013, no.2, pp. 54-58.
12. Zablodskiy N., Pliugin V., Letl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor design by use of genetic optimization algorithms. *Transactions on electrical engineering*, 2013, no.3, pp. 65-69.

Поступила (received) 22.10.2015

Заблодский Николай Николаевич¹, д.т.н., проф.,
Плюгин Владислав Евгеньевич², к.т.н., доц.,
Петренко Александр Николаевич³, к.т.н., доц.,

¹ Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, 03041, Киев, ул. Героев Оборона, 15, тел/phone +38 044 5278242, e-mail: zablodskiyinn@gmail.com

² Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076600, e-mail: vlad.plyugin@gmail.com

³ Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, 61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17, тел/phone +38 057 7061548, e-mail: petersanya2007@mail.ru

N.N. Zablodskii¹, V.E. Pliugin², A.N. Petrenko³

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine.

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³ O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Using of object-oriented design principles in electric machines development.

Purpose. To develop the theoretical basis of electrical machines object-oriented design, mathematical models and software to improve their design synthesis, analysis and optimization.

Methodology. We have applied object-oriented design theory in electric machines optimal design and mathematical modelling of electromagnetic transients and electromagnetic field distribution. We have correlated the simulated results with the experimental data obtained by means of the double-stator screw dryer with an external solid rotor, brushless turbo-generator exciter and induction motor with squirrel cage rotor. **Results.** We have developed object-oriented design methodology, transient mathematical modelling and electromagnetic field equations templates for cylindrical electrical machines, improved and remade Cartesian product and genetic optimization algorithms. This allows to develop electrical machines classifications models, included not only structure development but also parallel synthesis of mathematical models and design software, to improve electric machines efficiency and technical performance.

Originality. For the first time, we have applied a new way of design and modelling of electrical machines, which is based on the basic concepts of the object-oriented analysis. For the first time is suggested to use a single class template for structural and system organization of electrical machines, invariant to their specific variety. **Practical value.** We have manufactured screw dryer for coil dust drying and mixing based on the performed object-oriented theory. We have developed object-oriented software for design and optimization of induction motor with squirrel cage rotor of AIR series and brushless turbo-generator exciter. The experimental studies have confirmed the adequacy of the developed object-oriented design methodology. References 12, figures 2.

Key words: electric machine, object-oriented, class, object, template, inheritance, hierarchy, designing, mathematical modeling, electromagnetic field, optimization, algorithm.

Б.В. Клименко, А.В. Ересько, И.С. Варшамова, Н.А. Лелюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСНЫХ РЕЛЕ В СИСТЕМАХ ГИБРИДНОЙ КОММУТАЦИИ ОБМОТОК БИСТАБИЛЬНЫХ АКТУАТОРОВ

Представлені результати експериментальних досліджень деренчання контактів інтерфейсних реле при виконанні операцій їх вмикання та вимикання в нормальному режимі та в режимі прискорення спрацьовування. Наводяться рекомендації щодо практичного застосування малогабаритних інтерфейсних реле в системах керування комутаційних апаратів з гібридною комутацією електричних кіл обмоток бістабільних актуаторів. Бібл. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: бістабільні актуатори, інтерфейсні реле, деренчання контактів, гібридна комутація.

Представлены результаты экспериментальных исследований дребезга контактов интерфейсных реле при выполнении операций их включения и отключения в нормальном режиме и в режиме ускорения срабатывания. Приводятся рекомендации по применению малогабаритных интерфейсных реле в системах управления коммутационных аппаратов с гибридной коммутацией электрических цепей обмоток бистабильных актуаторов. Библ. 6, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: бистабильные актуаторы, интерфейсные реле, дребезг контактов, гибридная коммутация.

Введение. Вакуумные коммутационные аппараты для сетей средних напряжений занимают доминирующие позиции в соответствующем сегменте рынка, а в сегменте контакторов средних напряжений доля вакуумных аппаратов превышает 90 %. Изобретение высококоэрцитивных постоянных магнитов (Масато Сагава, 1982 г.), а также успехи в создании микропроцессорных устройств и мощных электролитических конденсаторов позволили создать коммутационные аппараты с высоконадежными электромагнитными приводами (например, аппараты компании ABB – выключатели VM1 и контакторы VSC), которые обеспечивают необходимые силовые характеристики и практически не потребляют энергию после выполнения операций включения и отключения. В этих аппаратах применяются бистабильные поляризованные актуаторы с двумя катушками [1], а для управления их обмотками – микропроцессорная система с полупроводниковыми коммутационными элементами – силовым транзистором и двумя тиристорами (рис. 1).

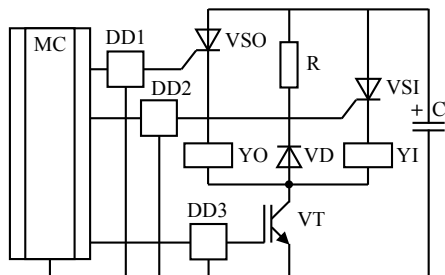


Рис. 1. Схема силовой цепи системы управления обмотками актуаторов коммутационных аппаратов ABB: YI, YO – обмотки включения и отключения; VT – силовой транзистор; VSI, VSO – тиристоры, коммутирующие цепи соответствующих обмоток; VD – диод; R – резистор; DD1 ... DD3 – драйверы; MC – микроконтроллер; C – электролитический конденсатор

При выполнении операции включения микроконтроллер MC через драйвер DD3 подает управляющий сигнал на затвор транзистора VT и через драйвер DD2 короткий импульс тока на управляющий электрод тиристора VSI, в результате чего обмотка включения YI актуатора подключается к источнику питания, роль которого выполняет накопительный электролитический конденсатор C, предварительно заряженный через преобразователь (на схеме не показан) до напряжения U_C . При этом тиристор остается

открытым и после завершения действия управляющего импульса. В некоторый момент времени якорь актуатора трогается с места и после окончания его движения по команде датчика положения контроллер прекращает подачу управляющего сигнала на транзистор, в результате чего тот запирается практически мгновенно, а тиристор остается в открытом состоянии, поскольку в этот момент открывается диод VD и ток в обмотке YI, замыкаясь через тиристор VSI, диод VD, и резистор R, начинает спадать по кривой, близкой к экспоненциальной, до момента его снижения ниже уровня тока удержания тиристора VSI. В этот момент тиристор VSI запирается, одновременно с ним запирается и диод VD, после чего устройство готово к выполнению следующей операции – операции выключения, которая выполняется аналогично операции включения, но посредством подключения к конденсатору C обмотки YO с помощью транзистора VT и тиристора VSO.

Определенным недостатком рассмотренной системы управления является необходимость выдерживать некоторую паузу между операциями, то есть между моментом запирающего одного из тиристоров (VSI или VSO в зависимости от последовательности операций) и отпирания транзистора VT при выполнении последующей операции. Факт запирающего тиристора сложно проконтролировать, поэтому алгоритм управления обмотками должен предполагать достаточно длительную паузу (несколько десятков миллисекунд) между операциями, иначе подача команд на отпирание транзистора VT и тиристора VSO при открытом тиристоре VSI не приведет к отключению коммутационного аппарата и может вызвать серьезную аварию, если требуется выполнить отключение аппарата сразу же после включения его на короткозамкнутую цепь.

Поляризованный актуатор с одной катушкой [2] и возвратной пружиной существенно проще в конструктивно-технологическом отношении, однако для выполнения операций включения и отключения катушка должна создавать противонаправленные МДС, что можно обеспечить либо за счет намотки двух обмоток и управлять ими попеременно, либо за счет использования одной обмотки, включаемой в диагональ моста, образованного четырьмя силовыми коммутационными устройствами, например транзисторами.

© Б.В. Клименко, А.В. Ересько, И.С. Варшамова, Н.А. Лелюк

В системе, изображенной на рис. 2, для выполнения операции включения (**I**) коммутационного аппарата микроконтроллер MC через драйверы DD1 и DD2 выдает сигналы на затворы транзисторов VT2 и VT3, а при выполнении операции отключения (**O**) – на затворы транзисторов VT1 и VT4.

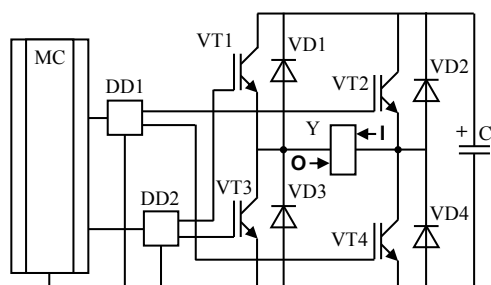


Рис. 2. Схема силовой цепи системы управления обмоткой актуатора, включенной в диагональ моста, образованного четырьмя транзисторами: Y – обмотка актуатора; VT1 ... VT4 – силовые транзисторы, управляемые через драйверы DD1 и DD2 (по одному двойному драйверу на полумост); VD1 ... VD4 – диоды, обеспечивающие рекуперацию энергии, накопленной в обмотке, в электролитический конденсатор C после запираания силовых транзисторов; MC – микроконтроллер

Силовые транзисторы и драйверы для них являются дорогостоящими элементами, поэтому представляет интерес рассмотрение возможности использования гибридной коммутации цепей обмоток актуаторов. Применительно к управлению актуатором с одной обмоткой схема силовой цепи может выглядеть, например, так, как показано на рис. 3.

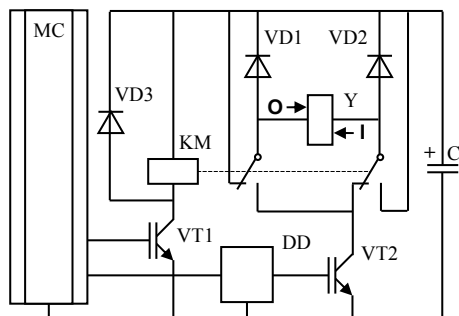


Рис. 3. Схема силовой цепи системы управления с гибридной коммутацией цепи обмотки актуатора: Y – обмотка актуатора; VT1 – маломощный транзистор, управляемый непосредственно микроконтроллером MC; VT2 – силовой транзистор, управляемый через драйвер DD; VD1 ... VD3 – диоды; C – электролитический конденсатор; KM – реле с двумя переключающими контактными группами

Гибридная коммутация электрических цепей, предполагающая наличие в коммутационных аппаратах как механических (контактных), так и полупроводниковых коммутационных элементов, является одним из перспективных направлений развития электрических аппаратов [3 – 6], соединяющих достоинства коммутации цепей с помощью механических и полупроводниковых коммутационных элементов. При этом гибридная коммутация используется, в первую очередь, для увеличения отключающей способности и электрической износостойкости аппаратов, выполняющих операции включения и отключения. В гибридных коммутаторах цепей обмоток актуаторов, в отличие от обычных коммутационных аппаратов, функции включения и отключения тока выполняет только полупроводниковый коммутационный элемент (транзистор), а механические коммутационные элементы

(контактные группы реле) выполняют функции маршрутизатора, переключающего электрические цепи во время бестоковых пауз. Применение гибридных коммутаторов этого типа взамен соответствующих полупроводниковых ключей позволит существенно удешевить системы управления актуаторами, а также уменьшить их размеры. Данное направление гибридной коммутации является относительно новым, поэтому изучение особенностей процессов, возникающих при такой коммутации, имеют определенные перспективы, как в теоретическом, так и в практическом плане.

Цель работы. Алгоритм управления обмоткой реле и силовым транзистором, задаваемый микроконтроллером, должен четко координировать их работу и не допускать размыканий контактов реле при открытом транзисторе, чтобы предотвратить появление дуги на контактах реле. Любая коммутационная операция в электромагнитных реле сопровождается дребезгом контактов, что обусловлено особенностями конструкции их контактных систем. Координация работы реле и силового транзистора должна учитывать и этот фактор – транзистор должен быть открыт не раньше, чем закончится дребезг контактов, то есть не раньше, чем операция включения или отключения реле закончится полностью. Производители реле не приводят в спецификациях такую характеристику как длительность полностью завершённой операции включения и отключения с учетом дребезга контактов, сопровождающего операцию, что не позволяет применять реле в системах гибридной коммутации под гарантии производителей. Применяя то или иное реле в системе гибридной коммутации, производитель коммутационного аппарата должен опираться на достоверные результаты экспериментальных исследований, учитывающих случайные составляющие временных характеристик реле. При этом в основе эксперимента должна лежать определенная методика экспериментального определения временных интервалов между моментами коммутации транзистора, управляющего обмоткой реле, и силового транзистора при выполнении операций включения и выключения коммутационного аппарата, разработкой которой является одной из целей данной работы.

Другой целью является разработка рекомендаций относительно уменьшения длительности данных интервалов, поскольку их сокращение способствует повышению быстродействия – одной из важнейших характеристик коммутационного аппарата.

Методика экспериментального определения временных интервалов между моментами коммутации транзистора, управляющего обмоткой реле, и силового транзистора. Алгоритм управления транзисторами VT1 и VT2 в рассматриваемой системе (рис. 3) предполагает, что при любом коммутационном состоянии аппарата транзистор VT1 изначально обязательно должен быть заперт. Это означает, что после полного завершения операции включения коммутационного аппарата, если вслед за этим в течение некоторого наперед заданного промежутка времени Δt , достаточного для того, чтобы ток в обмотке после запираания транзистора VT2 уменьшился практически до нуля (это время определяется экспериментально и в реальных аппаратах не превосходит 100 мс) не приходит команда на отключение, микроконтроллер запирает транзистор VT1, в результате чего реле отключается, его контакты приходят в исходное состояние, подготавливая электрические цепи к выполнению последующей операции отключения. Микроконтроллер постоянно анализирует состояние коммутационного аппарата и, если команда на включение приходит, когда

аппарат включен, никаких действий не предпринимает, а если команда на включение приходит, когда аппарат отключен, то микроконтроллер выполняет два последовательных действия: 1) выдает сигнал на отпирание транзистора VT1, в результате чего включается реле KM, коммутационное состояние контактов реле изменяется, силовая цепь системы управления подготавливается к выполнению операции включения аппарата и 2) выдает сигнал на отпирание транзистора VT2, в результате чего актуатор срабатывает и аппарат включается. При выполнении операции включения аппарата силовой транзистор должен быть открыт не раньше, чем закончится дребезг контактов реле, поэтому длительность промежутка времени t_{b1} между моментами отпирания транзисторов VT1 и VT2 должна быть гарантированно больше интервала между моментом подачи напряжения на обмотку реле KM и моментом гарантированного завершения дребезга его замыкающего контакта.

Если внешняя команда на отключение аппарата приходит, когда аппарат перед этим находился во включенном состоянии дольше указанной выше длительности промежутка времени Δt , то сигнал на отпирание транзистора VT2 контроллер выдает немедленно. Если же команда на отключение поступает в процессе выполнения операции включения коммутационного аппарата, то контроллер должен прервать операцию включения, запретив транзистор VT2, дождаться от датчика положения контактов аппарата сигнала о том, что его главные контакты пришли в разомкнутое состояние (за это время ток в катушке актуатора уменьшится практически до нуля), вслед за этим запретить транзистор VT1, и выдать сигнал на отпирание транзистора VT2 не раньше, чем через промежуток времени t_{b0} между моментом запирающего транзистора VT1 и моментом гарантированного завершения дребезга замыкающего контакта реле KM.

Длительности промежутков времени t_{b1} и t_{b0} зависят от характеристик реле, выбранного для работы в системе гибридной коммутации. Интерфейсные реле, предназначенные, в основном, для коммутации цепей автоматики, имеют привлекательно малые размеры и, в то же время, достаточно большие токовые номиналы (current ratings), превосходящие возможные значения токов в обмотках актуаторов вакуумных коммутационных аппаратов средних напряжений. Например, реле RT (Schrack, Австрия) или реле RM84 (ABB, Relpol, Польша) с размерами корпуса 29×12,7×15,7 мм и массой 14 г допускают проведение тока в непрерывном режиме до 8 А, и пикового тока до 15 А. Эти реле имеют достаточно высокое быстродействие – порядка 7 мс при включении и 2 ... 3 мс при отключении. Здесь необходимо иметь в виду, что в каталогах приводятся значения времени отключения при механическом размыкании цепи обмотки реле, которое предполагает, что энергия, накопленная в обмотке, выделяется в межконтактном промежутке аппарата, коммутирующего эту цепь обмотки и/или в искрогасительной цепи, включенной параллельно контактам этого аппарата. Если же коммутационные операции выполняет транзистор, прерывающий ток практически мгновенно, то обмотку обязательно следует зашунтировать «размагничивающим» диодом, который автоматически открывается в момент запирающего транзистора, закорачивая выводы обмотки, вследствие чего ток плавно уменьшается по закону, близкому к экспоненциальному, а накопленная энергия выделяется в сопротивлении обмотки. В результате, длительность полностью завершённой операции отключения реле возрастает с 2 ... 3 мс (при механическом

отключении) до 16 ... 20 мс. Важно также учитывать и тот факт, что существует статистический разброс длительностей промежутков времени t_{b1} и t_{b0} не только при сопоставлении этих характеристик у реле из разных партий, но даже в одном и том же реле. Для определения значений t_{b1} и t_{b0} был проведен эксперимент, схема проведения которого приведена на рис. 4.

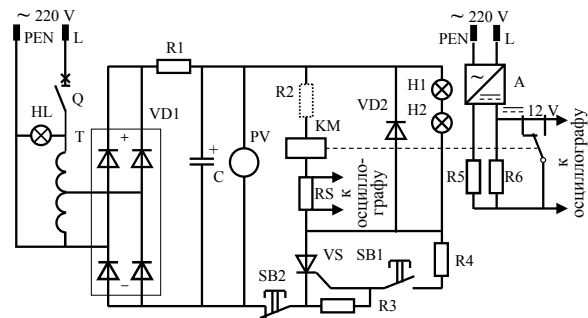


Рис. 4. Схема проведения эксперимента по определению временных интервалов Δt_{b1} и Δt_{b0} : Q – выключатель, обеспечивающий защиту от перегрузок и коротких замыканий; HL – сигнальная лампа; Т – автотрансформатор; VD1 – диодный мост; R1 – резистор, через который заряжается конденсатор С большой емкости (порядка 10000 мкФ); PV – вольтметр; KM – реле с двумя переключающими контактными группами (на схеме показана одна группа); R2 – добавочный резистор (устанавливается, если напряжение на конденсаторе превосходит номинальное напряжение катушки реле; RS – шунт для осциллографирования тока в обмотке реле; VS – тиристор; VD2 – «размагничивающий» диод; R3, R4 – резисторы цепи управления тиристора; SB1, SB2 – кнопки включения и отключения реле; H1, H2 – лампы накаливания (нагрузка тиристора); А – преобразователь; R5, R6 – делитель (регистратор дребезга контактов реле).

Методика экспериментального определения временных интервалов t_{b1} и t_{b0} предполагает указанную ниже последовательность действий.

1. Включаем выключатель Q.
2. С помощью автотрансформатора Т устанавливаем требуемое напряжение U_C источника питания реле (конденсатора С), контролируемое вольтметром PV.
3. Подготавливаем осциллограф к записи процесса.
4. Нажимаем на кнопку SB1 и фиксируем на осциллографе процессы изменения тока в обмотке и дребезга контактов реле при его включении.
5. С помощью автотрансформатора Т устанавливаем требуемое напряжение U_C источника питания реле.
6. Подготавливаем осциллограф к записи процесса.
7. Нажимаем на кнопку SB2 и фиксируем на осциллографе процессы изменения тока в обмотке и дребезга контактов реле при его отключении.

Типичные осциллограммы процессов включения и отключения реле при напряжении источника питания U_C , равном номинальному напряжению питания (rated supply voltage) обмотки реле U_S , в данном случае – 48 В, приведены на рис. 5а и 5б. Из осциллограмм видно, что время включения реле, не зависящее от наличия «размагничивающего» диода, приблизительно соответствует данным спецификации реле, а время отключения за счет указанного диода существенно больше значения, указанного производителем.

Уменьшение длительности интервалов между моментами коммутации транзистора, управляющего обмоткой реле, и силового транзистора. Длительность промежутков времени t_{b1} и t_{b0} может быть существенно уменьшена, если обмотку реле с номинальным напряжением питания U_S подключить к источнику с номинальным напряжением U_C , превосходящим

значение U_S , через последовательный резистор, сопротивление которого подобрано так, чтобы в стационарном режиме на обмотке установилось напряжение, равное U_S . При этом постоянная времени цепи обмотки реле уменьшится и ток в обмотке в процессе включения реле будет быстрее нарастать, а в процессе выключения – быстрее убывать вплоть до момента начала движения якоря. И хотя, как показывают результаты экспериментов, скорость и время движения якоря, а также время дребезга контактов остаются приблизительно такими же, как и при работе реле в «штатном» режиме, суммарные значения длительности промежутков времени t_{b1} и t_{b0} существенно уменьшаются по сравнению с соответствующими длительностями в «штатном» режиме. Например, если цепь, состоящую из обмотки реле RT с номинальным напряжением питания $U_S = 48$ В и

добавочного резистора R2, сопротивление которого в шесть раз больше сопротивления обмотки, подключить к источнику с напряжением $7 \times 48 = 336$ В, то в стационарном режиме на обмотке установится напряжение, равное 48 В. При этом типичные осциллограммы процессов включения и отключения реле и дребезга контактов будут выглядеть так, как это показано на рис. 5, в и 5, г. Из осциллограмм видно, что промежутки времени t_{b1} и t_{b0} существенно уменьшаются по сравнению со «штатным» режимом, причем это происходит, в первую очередь, за счет уменьшения постоянной времени цепи обмотки, а крутизна изменения тока в обмотке в момент окончания движения якоря, а также длительность дребезга контактов остаются практически такими же, какими они были в «штатном» режиме.

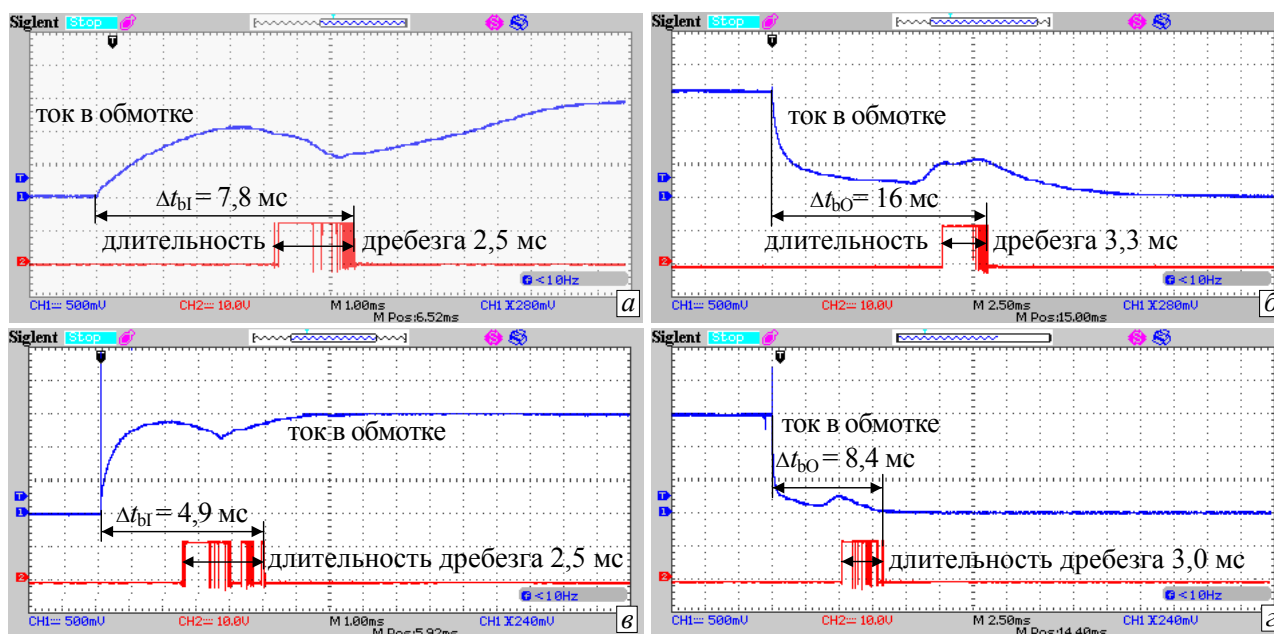


Рис. 5. Типичные осциллограммы включения и отключения реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_S = 48$ В: а – включение реле, напряжение цепи управления (источника) $U_C = 48$ В; б – выключение реле, $U_C = 48$ В; в – включение реле, $U_C = 336$ В; г – выключение реле, $U_C = 336$ В

Временные характеристики реле одного и того же типа (даже из одной и той же партии) могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому, для того, чтобы сделать корректный вывод о необходимой длительности промежутков времени t_{b1} и t_{b0} в системах гибридной коммутации, необходимо для выбранного типа реле выполнить измерения указанных длительностей на достаточно большом количестве реле и произвести статистическую обработку результатов эксперимента. Нами были исследованы временные характеристики

(при выполнении операций включения и отключения) реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_S = 48$ В при двух значениях напряжения цепи управления (источника) $U_C = 48$ В и $U_C = 336$ В. В эксперименте было использовано 20 реле с двумя контактными группами каждое, итого 40 контактных групп. Результаты эксперимента показаны на рис. 6, где точками показаны кумуляты – накопленные частоты значений промежутков времени t_{b1} и t_{b0} , не превосходящих значений (в мс), указанных на оси абсцисс.

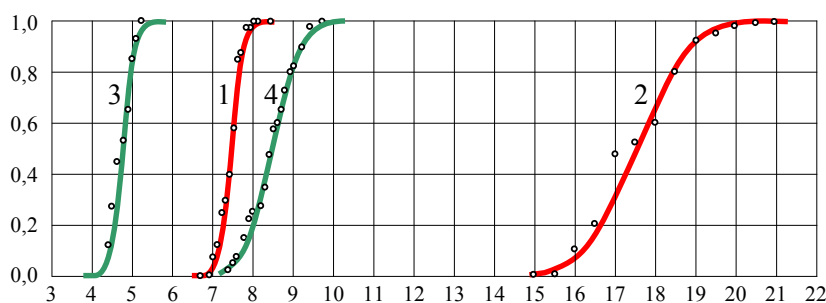


Рис. 6. Кумуляты и функции нормального распределения, построенные по результатам экспериментального определения значений промежутков времени t_{b1} и t_{b0} , соответствующих операциям включения и отключения реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_S = 48$ В: 1 – включение реле, при напряжении цепи управления (источника) $U_C = 48$ В; 2 – выключение реле при $U_C = 48$ В; 3 – включение реле при $U_C = 336$ В; 4 – выключение реле при $U_C = 336$ В

Сплошными линиями на рис. 6 показаны функции нормального распределения $F(t)$, построенные, исходя из выражения

$$F(t) = \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - \mu}{\sigma \cdot \sqrt{2}} \right) \right],$$

где t – текущее значение промежутка времени ($t_{\text{вн}}$ или $t_{\text{вс}}$); μ – математическое ожидание (среднее значение выборки) случайной величины; σ – среднеквадратичное отклонение распределения; erf – функция ошибок.

Результаты вычисления средних (по данным эксперимента) значений, среднеквадратичных значений, а также вероятных предельных значений длительности промежутков времени $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{вс}}$ для реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_{\text{с}} = 48$ В приведены в таблице. Кумулятивные кривые, в данном случае, весьма близки к кривым нормальных распределений, поэтому, с высокой степенью достоверности можно утверждать, что координация работы реле RT и полупроводникового коммутатора будет обеспечена, если интервал между моментами их коммутации будет превосходить значение $\mu + 3 \cdot \sigma$, взятое из последней колонки таблицы.

Таблица

Результаты эксперимента по определению длительности промежутков времени $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{вс}}$ для реле RT с номинальным напряжением питания обмотки $U_{\text{с}} = 48$ В

Величина	$U_{\text{с}}, \text{В}$	μ	σ	$\mu + 3 \cdot \sigma$
$t_{\text{вн}}$	48	7,46	0,24	8,18
$t_{\text{вс}}$	48	17,3	1,06	20,5
$t_{\text{вн}}$	336	4,78	0,26	5,56
$t_{\text{вс}}$	336	8,51	0,56	10,2

Выводы.

1. Коммутация цепей обмоток актуаторов, в которых функции включения и отключения тока возлагаются на полупроводниковый коммутационный элемент, а механические коммутационные элементы выполняют функции маршрутизаторов, переключающих электрические цепи во время бестоковых пауз, является относительно новым направлением гибридной коммутации, открывающим перспективы упрощения, уменьшения размеров и удешевления систем управления актуаторами.

2. Гибридная коммутация цепей обмоток актуаторов предполагает четкую координацию моментов коммутации полупроводниковых и механических коммутационных элементов. Разработана методика экспериментального определения временных интервалов между моментами коммутации этих элементов с учетом дребзга контактов механических элементов. Рассмотрена возможность применения интерфейсных реле в качестве механических коммутаторов и определены длительности интервалов, обеспечивающих координацию работы этих реле с полупроводниковыми коммутаторами.

3. Рассмотрен и экспериментально подтвержден способ существенного уменьшения длительности интервалов между моментами коммутации полупроводниковых и механических коммутаторов в системах управления актуаторами, обеспечивающий повышение быстродействия коммутационных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dullni E., Fink H., Reuber C. A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/5e750b2ecc5b760ec1256ad4002d2c00/cired99_Nice_VM1.pdf.
2. Патент РФ №2312420. Электромагнитный привод / Клименко Б.В., Выровец С.В., Форкун Я.Б. – Заявл. 27.12.05; опубл. 10.12.07, Бюл. № 14.
3. Сосков А.Г., Сабалаева Н.О. Гібридні контактори низької напруги з покращеннями техніко-економічними характеристиками: монографія. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 268 с.
4. Meyer J.-M., Rufer A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors

- (IGCTs) // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol.21. – no.2. – pp. 646-651. doi: 10.1109/tpwrd.2006.870981.
5. Häfner J., Jacobson B. Proactive hybrid HVDC breakers – a key innovation for reliable HVDC grids // Integrating supergrids and microgrids International Symposium in Bologna, Italy. – 2011.
 6. Kapoor R., Shukla A., Demetriades G. State of art of power electronics in circuit breaker technology // 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2012. – pp. 615-622. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342764.

REFERENCES

1. Dullni E., Fink H., Reuber C. A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. Available at: https://library.e.abb.com/public/5e750b2ecc5b760ec1256ad4002d2c00/cired99_Nice_VM1.pdf (accessed 15 October 2015).
2. Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Forkun Ya.B. Elektromagnitnyi privod [Electromagnetic actuator]. Patent Russian Federation, no. 2312420, 2007. (Rus).
3. Soskov A.G., Sabalaeva N.O. Hibrydni kontaktory nyzkoi napruhy z pokrashchenymy tekhniko-ekonomichnymy kharakterystykamy: monohrafiia [Hybrid contactors low voltage with improved technical and economic characteristics]. Kharkiv, National University of Urban Economy Publ., 2012. 268 p. (Ukr).
4. Meyer J.-M., Rufer A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs). IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, vol.21, no.2, pp. 646-651. doi: 10.1109/tpwrd.2006.870981.
5. Häfner J., Jacobson B. Proactive hybrid HVDC breakers – a key innovation for reliable HVDC grids. Integrating supergrids and microgrids International Symposium in Bologna, Italy. – 2011.
6. Kapoor R., Shukla A., Demetriades G. State of art of power electronics in circuit breaker technology. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, pp. 615-622. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342764.

Поступила (received) 20.10.2015

Клименко Борис Владимирович¹, д.т.н., проф.,
Ереско Александр Вячеславович¹, к.т.н., доц.,
Варшамова Ирина Сергеевна¹, ассистент,
Лелюк Николай Анатольевич¹,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Багалея, 21,
tel/phone: +38 050 6534982; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

B.V. Klymenko¹, A.V. Eres'ko¹, I.S. Varshamova¹, N.A. Lelyuk¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Bagaley Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Research of the applications possibility of interface relay in hybrid switching systems of bistable actuators windings.

Purpose. Development of methods of experimental determination of action coordination characteristics of semiconductor and mechanical switching elements in systems of hybrid commutation of bistable actuators coils taking into account contact bounce of mechanical switching elements. Consideration of the application possibility of interface relay as mechanical switches, and the definition of the duration of the intervals to ensure coordination of the relay operation with semiconductor switches. **Methodology.** Experimental determination of the time intervals between the moments of switching transistor which controls the relay coil, and power transistor when the switching on and off operations using a hybrid switching device are performed; statistical processing of experimental results. **Results.** The durations of the time intervals between the moments of switching of semiconductor and mechanical switching elements in systems of actuator coils hybrid commutation are experimentally determined. A way of a significant reduction of the duration of the indicated time intervals is considered and experimentally confirmed. **Originality.** The scheme of the power circuit of the control system with hybrid commutation of the actuator coil circuit, which differs from the known schemes that the only semiconductor switching element performs functions of the current switching on and off, and electromechanical relay contact elements act as a router interconnecting electrical circuits during dead times. **Practical value.** The use of hybrid switches instead of switches with semiconductor switches will significantly reduce the cost of the actuators control system, as well as reduce their sizes. References 6, tables 1, figures 6.

Key words: bistable actuators, interface relays, contact bounce, hybrid switching.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ РАСЧЕТОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ FEMM

Надані теоретичні основи розрахунку електромагнітних величин і їх фазових співвідношень для турбогенераторів. Це реалізується шляхом числових розрахунків магнітного поля у програмному середовищі пакету FEMM. Розрахунки автоматизовані за допомогою створеної програми на алгоритмічній мові Lua. Вона управляє розрахунками і організовує видачу результатів в текстовий файл. Представлений скрипт Lua є доволі універсальним і може послужити основою щодо створення аналогічного програмного забезпечення для інших типів електричних машин. Бібл. 9, рис. 6.

Ключові слова: програма FEMM, турбогенератор, електромагнітні параметри, фазові співвідношення, автоматизовані розрахунки, Lua скрипт.

Представлены теоретические основы расчета электромагнитных величин и их фазовых соотношений для турбогенераторов. Это реализуется путем численных расчетов магнитного поля в программном пакете FEMM. Расчеты автоматизированы посредством созданной программы на алгоритмическом языке Lua. Она управляет расчетами и организует выдачу результатов в текстовый файл. Представленный скрипт Lua универсален и может послужить прототипом аналогичного программного обеспечения для других типов электрических машин. Библ. 9, рис. 6.

Ключевые слова: программа FEMM, турбогенератор, электромагнитные параметры, фазовые соотношения, автоматизированные расчеты, Lua скрипт.

Введение. Широко известная программа FEMM [1] эффективна для расчетов двухмерных магнитных полей (МП) электрических машин (ЭМ) классической конструкции при практически плоскопараллельном МП в пределах их активной части. Например, это относится к турбогенераторам (ТГ) [2]. Эта программа освободила расчетчиков от разработки реализуемых математических моделей и программирования и обладает достаточно удобным интерфейсом.

Дополнительным средством облегчения труда пользователей программы FEMM являются скрипты на алгоритмическом языке Lua, интегрированном в нее. Так, например, в [3] описывается наша программа, автоматизировавшая построение расчетных моделей ТГ, в [4] дана программа автоматизированных расчетов динамики их электромагнитных процессов. Эффективность скриптов Lua заключается в том, что программы пишутся один раз, а используются бесчисленное число раз и любым числом пользователей.

Данная статья продолжает серию работ, начатых в [3, 4]. И ее **целью** является представление скрипта Lua, автоматизирующего получение ряда электромагнитных параметров и фазовых соотношений в ЭМ посредством численных расчетов МП в программной среде FEMM. Это делается на примере ТГ – одного из крупнейших и ответственных их представителей [5].

Объект исследования. Для иллюстраций здесь, как и в [3, 4], взяли ТГ мощностью 340 МВт. Его параметры есть далее в файле исходных данных.

Электромагнитная система ТГ представлена на рис. 1 его поперечным сечением. Выделены фазные зоны двухслойной укороченной трехфазной обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$. Показаны используемые прямоугольная (x, y) и полярная (r, α) системы координат, продольная d и поперечная q оси ротора.

Основой разработанного скрипта Lua является заранее подготовленная для среды FEMM расчетная

модель электромагнитной системы ТГ. У нас это делается посредством скрипта Lua, представленного в [3], а при отсутствии такого – в «ручном» режиме в соответствии с инструкциями к программе FEMM.

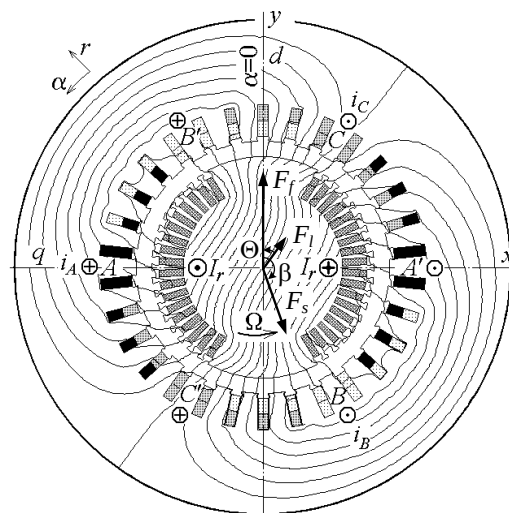


Рис. 1. Модель электромагнитной системы ТГ в его поперечном сечении

Вид вызванной на экран компьютера в среде FEMM (тип файла – Femme Document) расчетной модели ТГ представлен в целом на рис.2, а на рис. 3 выделен ее фрагмент. Видны метки физических свойств **блоков** – ограниченных участков области расчета. Метки Fe1, Fe2 и Fe3 задают кривые намагничивания ферромагнетиков, m_0 – магнитную проницаемость $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, метки i_A, i_B, i_C – фазные токи, I_r – ток ротора. Добавление + или – к метке тока говорит о его направлении: если ток в данный момент времени положительный, то в данном месте он берется с соответствующим знаком. Цифра после двоеточия обозначает число эффективных проводников в данном блоке. Окружности вокруг меток показывают максимально

допустимый размер треугольников в структуре конечных элементов, формируемой программой FEMM.

Фрагмент на рис. 3 взят с правой половины полной модели по рис.2, в остальной части все сформировано аналогично в соответствии и моделью на рис.1. В частности, на левой половине знаки токов противоположны тому, что видим на рис.3.

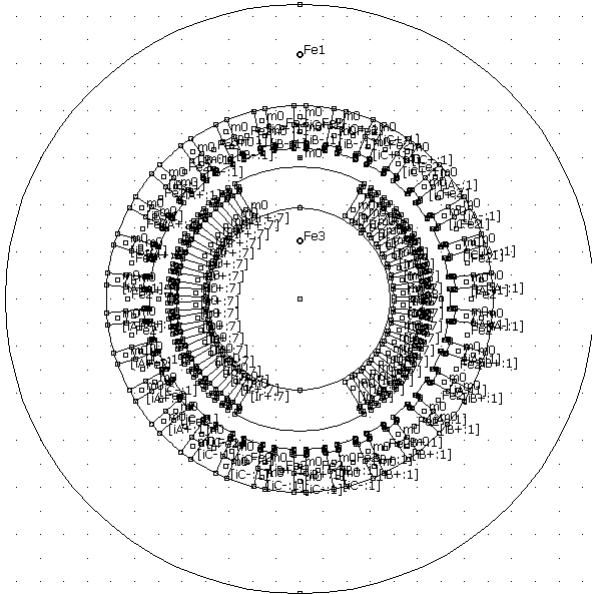


Рис. 2. Исходная физико-геометрическая модель ТГ

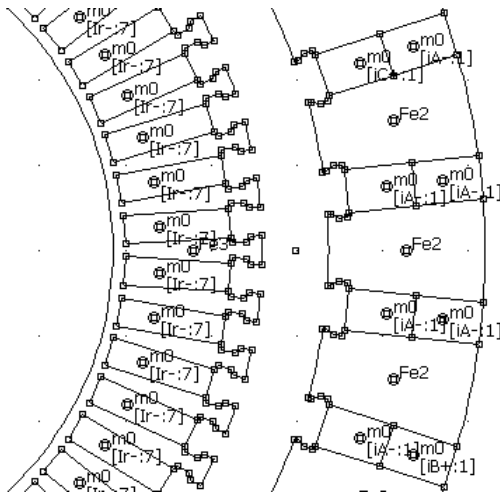


Рис. 3. Фрагмент физико-геометрической модели ТГ

Упомянутые блоки в FEMM-модели объединены в группы для оперирования с ними, как с единицами области расчета. Из назначенных номеров групп [3] здесь используются: 2, 3, 4, 5, 6, 7 – фазные зоны A, B, C, A', B', C' обмотки статора, 9 – весь ротор (рис.1).

Теоретические основы. Расчет стационарного МП программой FEMM проводится на основе численного решения дифференциального уравнения:

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

где A_z , J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; μ – абсолютная магнитная проницаемость; k – орт.

На внешней границе области расчета для ВМП принято известное условие Дирихле $A_z=0$.

В модели ТГ (рис.2) для расчета мгновенного распределения МП конкретного установившегося режима надо иметь соответствующие токи. В обобщающем режиме нагрузки (РН) [9] задается постоянный ток ротора I_r и мгновенные значения симметричной системы фазных токов статора: $i_A=I_m \cos(\beta)$; $i_B=I_m \cos(\beta-2\pi/3)$; $i_C=I_m \cos(\beta+2\pi/3)$, где $I_m=\sqrt{2} I_s$ – их амплитуда и I_s – действующее значение; β – их начальная фаза [6-9], задающая смещение МДС обмотки статора F_s от МДС обмотки ротора F_f (рис.1). Здесь же дана условная результирующая МДС для МП в РН

$$\vec{F}_l = \vec{F}_f + \vec{F}_s. \quad (2)$$

В режиме холостого хода (ХХ) задается только ток ротора, в режиме установившегося короткого замыкания – только токи статора. Направления токов (рис.1) регулируются по системе, принятой в [7].

Для ТГ результатом является распределение МП в его поперечном сечении в виде функции $A_z(x,y)$. Картина МП в области расчета представляется структурой силовых линий – линий равного ВМП $A_z=const$. Пример этого для ТГ в режиме его номинальной нагрузки (НН) есть на рис.1.

Одной из ключевых величин при анализе электромагнитных параметров ТГ является магнитное потокоцепление (МПС) [2] и оно находится по распределению ВМП. Так, например, для любой из шести фазных зон (рис.1) МПС определяется на основании

$$\Psi = \frac{N_s l_a}{S_\phi} \int_{S_\phi} A_z dS \approx \frac{N_s l_a}{S_\phi} \sum_{j=1}^{K_\phi} A_{z,av,j} \Delta S_j, \quad (3)$$

где S_ϕ – площадь сечения по несущим ток элементам фазной зоны; K_ϕ – число элементов ее дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе.

В формуле (3) учитывается активная длина ТГ l_a и число витков фазной обмотки статора N_s , а для определения S_ϕ и интеграла в скрипте Lua есть соответствующие процедуры [1].

Исходной основой для выявления *фазовых соотношений* в любом из расчетных режимов является временная фаза или направление вектора МПС фазной обмотки A–A'. МДС этой базовой обмотки на рис.1 ориентирована по продольной оси ротора d .

Направление же вектора МПС фазной обмотки A–A' определяется структурой МП конкретного расчетного режима. Так на рис.1 это направление проявляется ориентацией силовых линий МП и в целом соответствует направлению вектора МДС F_l (2). Но пока этот вектор построен априори с учетом тех результатов, которые еще будут получены далее на основе методики, которая опубликована в [4-6]. Здесь ее изложим кратко для понимания смысла разработанного и представленного далее скрипта Lua.

Упомянутую методику изложим применительно к режиму ХХ, а затем она будет иметь силу для любого другого режима. Конкретно, будем считать, что МП в

режиме XX рассчитано программой FEMM. Структура этого поля показана на рис.4.

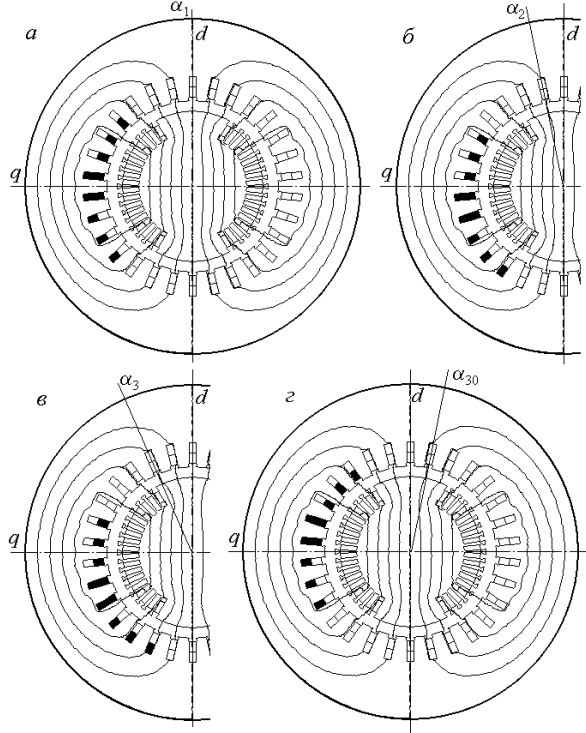


Рис.4. Перемещение фазной зоны обмотки статора на фоне рассчитанного МП для сбора значений МПС

В исходной угловой позиции α_1 фазной зоны A на рис.4, а на основании формулы (3) определяется МПС Ψ_1 . Теперь переместим условно эту зону на зубцовое деление в позицию α_2 (рис.4, б) и найдем соответствующее значение МПС Ψ_2 . То же повторим в позиции α_3 (рис.4, в) и т.д. – вплоть до позиции α_{30} (рис.4, г). В общем же случае число позиций равно числу пазов статора Q_s . А каждое смещении фазной зоны делается на угол $\Delta\alpha = 360/Q_s$ (в градусах).

В итоге получится дискретная угловая функция МПС одной фазной зоны на ее периоде T , т.е.

$$\Psi_k(\alpha_k); \quad \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; \quad k = 1, 2, 3, \dots, Q_s, \quad (4)$$

где k – номера угловых позиций этой зоны.

Каждой позиции фазной зоны в пределах от 1 до $Q_s/2$ есть диаметрально противоположная позиция в пределах от $Q_s/2+1$ до Q_s . Они попарно создают условно перемещающуюся фазную обмотку $A-A'$, для которой угловая функция МПС на ее полупериоде:

$$\Psi_{A,k} = \Psi_k - \Psi_{k+Q_s/2}; \quad k = 1, 2, 3, \dots, Q_s/2, \quad (5)$$

По полученным результатам, с учетом периодичности величин в ТГ типа $\Psi(\alpha + T/2) = -\Psi(\alpha)$, дополним полупериод МПС (5) до полного периода:

$$\Psi_{A,k+Q_s/2} = -\Psi_{A,k}; \quad k = 1, 2, 3, \dots, Q_s/2. \quad (6)$$

Числовой ряд МПС (5) проиллюстрирован на рис.5 совокупностью выделенных точек на кривой XX в диапазоне k от 1 до 15. На основании (6) кривая дополнена до полного периода (точки от 16 до 30), а точка 31 повторила первую (точка 1) через период T .

Аналогичные действия были проведены и после расчета МП в режиме НН, а результаты представлены

кривой НН на том же рис.5. Для проявления начальных фаз функций МПС кривые продолжены влево.

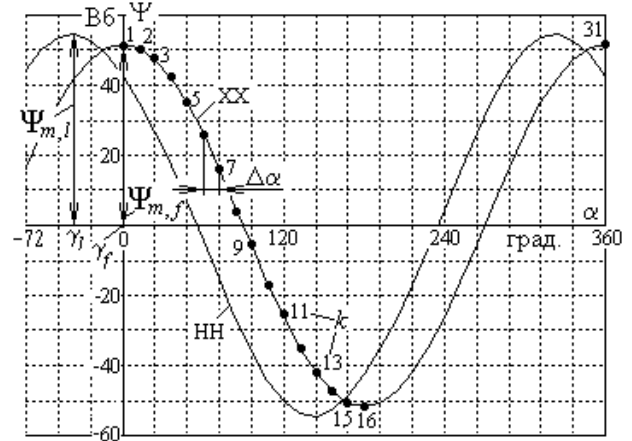


Рис.5. Угловые зависимости МПС фазной обмотки ТГ

Полученную численную полную угловую функцию $\Psi_{A,k}(\alpha_k)$, $k = 1, 2, 3, \dots, Q_s$, можно разложить в гармонический ряд [6, 7]. Ввиду характерного для ТГ условия периодичности $\Psi(\alpha + T/2) = -\Psi(\alpha)$ в ряду нет постоянной составляющей и четных гармоник. Принятый в [6] косинусный ряд для МПС имеет вид

$$\Psi_A = \sum_{v=1,3,5,\dots} \Psi_{m,v} \cos(v\alpha + \gamma_v), \quad (7)$$

где амплитуды и аргументы (начальные фазы)

$$\Psi_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \gamma_v = -\arctg \frac{s_v}{c_v} \quad (8)$$

находятся по синусно-косинусным коэффициентам:

$$s_v = \frac{2}{Q_s} \sum_{k=1}^{Q_s} \Psi_{A,k} \sin(v\alpha_k); \quad c_v = \frac{2}{Q_s} \sum_{k=1}^{Q_s} \Psi_{A,k} \cos(v\alpha_k).$$

В (8) функция арктангенса $\arctg(s_v/c_v)$ должна быть расширенной с получением значения в диапазоне от -180° до $+180^\circ$ в зависимости от знаков c_v и s_v . В Lua есть соответствующая функция $atan2(s_v, c_v)$.

В ЭМ, в том числе и ТГ, анализ фазовых соотношений проводится для первых гармоник. Для первой косинусной гармоники МПС в (7) получены при XX амплитуда и начальная фазы $\Psi_{m,f} = 51,97$ Вб и $\gamma_f = 0$, при НН – $\Psi_{m,l} = 53,89$ Вб и $\gamma_l = -35,75^\circ$ (в обозначениях номер гармоники не показываем). Остальные гармоники, в принципе, оказались пренебрежимо малы.

Иллюстрация углов γ_f и γ_l есть на рис.5, где видим, что амплитуда, а значит и вектор МПС в режиме НН сдвинуты в сторону отрицательного значения угла α по отношению к МПС в режиме XX.

Угол сдвига $\Theta = \gamma_f - \gamma_l$ является углом нагрузки ТГ (в нашем случае он имеет положительное значение). Аналогичный сдвиг имеют и векторы F_l и F_f на рис.1.

С учетом того, что в ТГ угол поворота связан с временем, т.е. $\alpha = \Omega \cdot t$, где Ω – угловая скорость, можно перейти к общепринятым временным векторным диаграммам (ВД) для иллюстрации и других фазовых соотношений, а также определения прочих параметров. Такая ВД представлена на рис. 6, где за начало

отсчета углов принята вертикально расположенная продольная ось ротора d , как и углов на рис. 1.

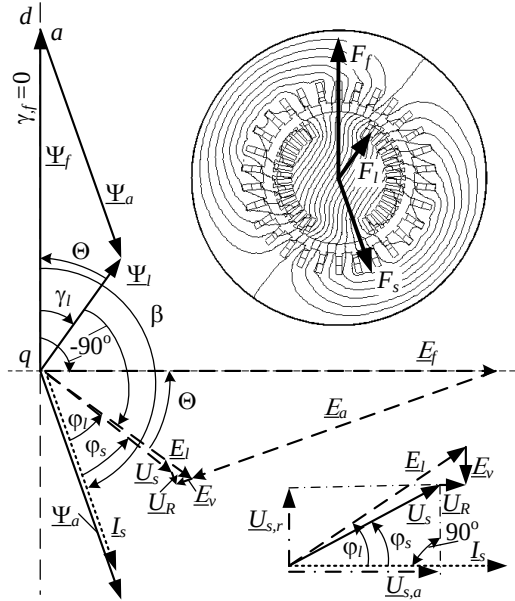


Рис.6. Векторная диаграмма, соответствующая режиму нагрузки ТГ

Вектор фазного тока I_s проведен относительно оси d под обусловленным ранее углом β (в данном случае он равен $-160,43^\circ$). Так же направлен вектор МПС Ψ_a фазной обмотки, вызванного МП реакции якоря, соответствующий вектору F_s . Векторы МПС Ψ_f от МП обмотки ротора и результирующего МПС Ψ_l проведены под уже определенными углами γ_f и γ_l .

Вообще то, выделение Ψ_a и Ψ_f из МПС Ψ_l является в РН условным, причем здесь значение Ψ_f совершенно другое по сравнению с режимом ХХ. Доли МПС определим благодаря принятой здесь методике.

А именно, принимаем за базу уже определенное МПС Ψ_l и из конца его вектора проводим линию параллельно вектору Ψ_a до пересечения с линией, ориентированной, как и Ψ_f под углом γ_f . Это пересечение в точке a и выявляет конкретные длины векторов Ψ_a и Ψ_f и их значения в масштабе вектора Ψ_l .

На основе известной теории [2] по амплитуде МПС при частоте f_s имеем действующее значение первой гармоники фазной ЭДС, в том числе и в РН:

$$E_l = \sqrt{2} \pi f_s \Psi_{m,l}. \quad (10)$$

Вектор этой ЭДС, как известно, отстает от вектора своего МПС Ψ_l на -90° . Векторы ЭДС E_a и E_f от МПС Ψ_a и Ψ_f определяются и строятся аналогично.

Получается, что треугольник ЭДС E_l , E_a и E_f подобен треугольнику МПС Ψ_l , Ψ_a и Ψ_f . Поэтому между векторами E_l и E_f будет тот же угол нагрузки Θ .

Для того, чтобы определить фазное напряжение U_s , необходимо учесть падение напряжения $\underline{U}_R = R_s I_s$ на активном сопротивлении R_s и ЭДС $\underline{E}_v = -jX_v I_s$ от потока лобового рассеяния фазной обмотки, где X_v – соответствующее индуктивное сопротивление.

Очевидно, что вектор $\underline{U}_R$ параллелен вектору I_s , а вектор $\underline{E}_v$ – перпендикулярен (в сторону отставания).

Так они и пристроены к концу вектора E_l и дают в итоге вектор фазного напряжения $\underline{U}_s = \underline{E}_l + \underline{E}_v - \underline{U}_R$.

Известно, что в ТГ величина U_R пренебрежимо мала по сравнению с E_l и U_s , но здесь фигурирует для демонстрации полнофакторного подхода.

Из геометрических соотношений на ВД, фрагмент которой в повернутом виде показан подробнее внизу справа (без соблюдения пропорций), активная и реактивная составляющие напряжения U_s , его действующее значение и фазовый сдвиг от вектора тока I_s :

$$U_{s,a} = E_l \cos \phi_l - U_R; \quad U_{s,r} = E_l \sin \phi_l - E_v; \quad (11)$$

$$U_s = \sqrt{U_{s,a}^2 + U_{s,r}^2}; \quad \phi_s = \arctg(U_{s,r} / U_{s,a}), \quad (12)$$

где по ВД угол между I_s и E_l составляет $\phi_l = -\beta - 90 + \gamma_l$.

В итоге, по полемому расчету определяется целый ряд уже рассмотренных электромагнитных параметров, а также активная электрическая мощность ТГ:

$$P_a = m_s U_s I_s \cos \phi_s. \quad (13)$$

Кроме этого, можно определить электромагнитный момент ТГ, что делается через тензор магнитного натяжения [2] в соответствии с формулой

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0(r_s - r_r)} \int_0^{2\pi} \int_{r_r}^{r_s} r \cdot B_r \cdot B_\alpha \cdot r \cdot dr \cdot d\alpha, \quad (14)$$

где r_r и r_s – радиусы окружностей, ограничивающие зазор со стороны ротора и статора; B_r и B_α – радиальная и угловая составляющие магнитной индукции.

Магнитный поток через некоторую поверхность, ограниченную контуром l , имеет выражение [2]:

$$\Phi = (A_{z1} - A_{z2}) \cdot l_a, \quad (15)$$

где A_{z1} , A_{z2} – значения ВМП в точках 1 и 2 в плоскости расчета, через которые проходят в аксиальном направлении боковые стороны упомянутого контура l .

Все обусловленные расчеты и призван автоматизировать представляемый далее скрипт Lua с соответствии с целью данной работы.

Файл исходных данных ТГ для скрипта Lua.

Требованиями к созданной программе, как и в [3, 4], являлись ее универсальность с точки зрения геометрии и размеров ТГ, а также установившихся режимов их работы – при минимуме вводимых данных.

Значения различных параметров ТГ и обслуживающих локальных констант и переменных можно задавать непосредственно в скрипте Lua, либо вводить из заранее подготовленных текстовых файлов. В этой работе все параметры, характеризующие данную задачу и возможно меняющиеся для разных вариантов ТГ, вводятся из отдельного файла.

Текстовые файлы Lua-скриптов и файлов данных пишутся в редакторе Блокнот.

Приведем файл данных, который может иметь произвольное имя с расширением txt. Данные имеют форму чисел или текстовых строк в кавычках " " и сопровождаются комментариями. Для обозначения начала комментариев выбрали двоеточие.

Текст файла исходных данных.

"FemC_TG340" : name_fem - имя модели в FEMM

"RezC_TG340" : name_rez - имя файла результатов
 3 : ms - число фаз обмотки статора
 1 : p - число пар полюсов
 50 : fs – частота, Гц
 -160.47 : beta - начальная фаза токов статора, град
 3151.4 : Ir - ток возбуждения ротора, А
 11547 : Is - фазный ток статора, А
 0.8 : bs - относительное укорочение обмотки статора
 0.00266 : Rs - активное сопротивление обмотки статора, Ом
 0.063 : Xv - индукт. сопротив. лоб. части обм. стат., Ом
 0.0 : gf - начальная фаза МПС в режиме XX, градус
 30 : Qs - число пазов статора
 10 : Ns - число последовательных витков в фазе стат.
 1 : as - число параллельных ветвей обмотки статора
 5.308 : la - активная длина турбогенератора, м
 637.5 : rsi - радиус расточки сердечника статора, мм
 699 : rv - средний радиус верхн. слоя обм. статора, мм
 778 : rn - средний радиус нижнего слоя обм. статора, мм

Общая характеристика языка Lua.

Язык Lua, как и другие языки программирования, позволяет создавать циклы, условные операторы, процедуры, выполнять вычисления по математическим формулам, по стандартным и созданным самостоятельно функциям. Есть функции: *sqrt* – корень квадратный; *sin*, *cos*, *atan2* – синус, косинус, арктангенс и другие. Есть встроенное число π – Pi. Тригонометрические функции оперируют с радианами, а при работе с геометрическими объектами Lua использует градусы, прямоугольные координаты измеряются в миллиметрах, что предопределяется при формулировке задачи FEMM в меню *Problem*, что сделано в [3].

В скрипте Lua команды, начинающиеся с *mo_* или *mi_*, являются его процедурами. Их описание можно найти через кнопку *Help* в рабочем окне FEMM, войдя затем в раздел *Lua Scripting* [1].

Строки программы или их правая часть, начинающиеся с двойного дефиса *--*, являются комментариями и не влияют на ее работу.

Внешнее имя файла данных скрипт Lua запрашивает после его запуска оператором с «подсказкой»:
 File_dan=prompt("Введите имя файла")

Это имя набирается с клавиатуры и вводится нажатием Enter. Скрипт открывает файл для чтения ("r") и присваивает ему внутреннее имя *f_d*, т.е.
 f_d = openfile(File_dan .. ".txt", "r")

Оператор чтения *read(f_d, "*n", "*1")* из очередной строки считывает значения столько числовых или строковых данных, сколько раз в нем фигурирует опция *"*n"*, а опцией *"*1"* будет сделан перевод на новую строку, т.е. оставшийся в строке любой текст игнорируется и используется расчетчиком как комментарий (у нас отделяется символом :).

В операторах *write* для записи в файл результатов опция *"\r\n"* дает переход на новую строку, а использование символов типа *%6.3f* является форматом (format) печати, т.е. в данном случае под число выделяется 6 позиций, в том числе 3 – под дробную часть.

Далее приводится программа, которая после ее вызова в среде FEMM организует ввод исходной информации и расчет МП, формирует угловую функцию

МПС фазной обмотки, определяет ее амплитуду и начальную фазу, а также ряд электромагнитных параметров и фазовых соотношений разных величин в ТГ.

Скрипт Lua.

```
--Задание файла исходных данных
File_dan=prompt("Введите имя файла")
--Открытие файла данных
f_d = openfile(File_dan .. ".txt", "r")
--ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ из текстового файла
name_fem=read(f_d, "*n", "*1") --имяFEMM
--Имя файла для записи результатов
name_rez=read(f_d, "*n", "*1")
ms=read(f_d, "*n", "*1") --число фаз
p=read(f_d, "*n", "*1") --пары полюсов
fs=read(f_d, "*n", "*1") --частота
```

Таким же способом считываются все данные из приведенного выше файла данных вплоть до *rn*, т.е:

```
rn=read(f_d, "*n", "*1") -- средний
--радиус нижнего слоя обмотки статора
closefile(f_d) --закрытие файла данных

--Организация файла результатов
writeto(name_rez) --name_rez имя файла

--Имя геометрической модели ТГ-тип fem
name_fem=name_fem .. ".fem"
mi_saveas(name_fem) --запомнить модель
```

```
--ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ:
gr=Pi/180 --множитель градус=>радиан
beta=beta*gr --значение угла beta, рад
Ur=Rs*Is --падение напряжения на Rs
Ev=Xv*Is --падение напряжения на Xv
ts=360/Qs --угол зубц. шага статора
tp=Qs/(2*p) --полюсный шаг в зуб. дел.
qsp=tp/ms --число пазов на полюс и фазу
qsn=0.5*(qsp-tp*(1-bs)) --число пазов
--нижнего слоя обм. ст-ра над осью q
qsv=qsp-qsn --число пазов верхнего
--слоя обмотки статора над осью q
--Угол первого нижнего стержня фазы A
an1=180-(qsn-0.5)*ts
--Угол первого верхнего стержня фазы A
av1=180-(qsv-0.5)*ts
Im=Is*2^0.5/as --амплитуда фазного
-- тока в параллельной ветви
```

```
--Запись некоторых параметров ТГ
write("Данные возбуждения ТГ", "\r\n")
write(format(" Is= %5.0f", Is),
format(" Ir= %5.0f", Ir),
format(" beta=%7.2f", beta/gr), "\r\n")
```

```
F = {} --создание массива для хранения
-- значений МПС фазной обмотки
```

```
-- Фазные токи обмотки статора
c=2*Pi/3 Ia=Im*cos(beta)
Ib=Im*cos(beta-c) Ic=Im*cos(beta+c)
```

```
--Задание токов фаз и ротора в FEMM
mi_modifycircprop("iA+", 1, Ia)
mi_modifycircprop("iA-", 1, -Ia)
mi_modifycircprop("iB+", 1, Ib)
mi_modifycircprop("iB-", 1, -Ib)
mi_modifycircprop("iC+", 1, Ic)
mi_modifycircprop("iC-", 1, -Ic)
```



```

mi_modifcycircprop("Ir+",1, Ir)
mi_modifcycircprop("Ir-",1,- Ir)
--В FEMM-модели есть имена меток токов
--Расчет МП в FEMM и переход к показу
--и извлечению результатов расчета
mi_analyze(1)      mi_loadsolution()

--Цикл условного перемещения фазной
--зоны A с пазовым шагом ts
for k=1,Qs,1 do    ak=(k-1)*ts --угол
--Цикл расч. углов проводников фазы A
for i=1,qsp,1 do  ai=ak+(i-1)*ts
--Расчет координат проводников
--нижнего слоя и их выделение
ani=(anl+ai)*gr   x=rn*cos(ani)
y=rn*sin(ani)     mo_selectblock(x,y)
--Расчет координат проводников
--верхнего слоя и их выделение
avi=(avl+ai)*gr   x=rv*cos(avi)
y=rv*sin(avi)     mo_selectblock(x,y)
end --завершение цикла по i
--Считывание площади выделенных блоков
S = mo_blockintegral(5)
--Значение интеграла ВМП по площади S
A = mo_blockintegral(1)
mo_clearblock() --очистка выделения
--МПС фазной зоны обмотки A
F[k] = Ns*A/S
end --завершение пазовых шагов по k

--Получение МПС фазной обмотки по МПС
--фазной зоны и продление на период
q2=Qs/2 --половина позиций фазной зоны
for i=1,q2,1 do F[i]=F[i]-F[i+q2]
                F[i+q2]=-F[i] end

--Расчет амплитуды и фазового сдвига
--первой гармоники МПС по ряду Фурье
Fsin=0 Fcos=0 --обнуление накопителей
for k=1,Qs,1 do --цикл по массиву МПС
ak=ts*(k-1)*gr --угловая позиция
--Амплитуды sin и cos составляющих
Fsin=Fsin+2*F[k]*sin(ak)/Qs
Fcos=Fcos+2*F[k]*cos(ak)/Qs
end --перебора k элементов массива
Fm1=sqrt(Fsin^2+Fcos^2) --амплитуда
gl=atan2(Fsin,Fcos) --начальная фаза

--Электромагнитные параметры ТГ
--Действующее значение фазной ЭДС
El=Pi*2^0.5*fs*Fm1
--Фазовый сдвиг ЭДС El от тока Is
fil=-(beta+Pi/2-gl)
--Активная и реактивная составляющие
--фазного напряжения
Usa=El*cos(fil)-Ur Usr=El*sin(fil)-Ev
--Действующее знач. фазного напряжения
Us=sqrt(Usa^2+Usr^2)
--Фазовый сдвиг между Us и Is
--и коэффициент мощности ТГ
fis=atan(Usr/Usa) cosfi=cos(fis)
teta=gf*gr-gl --угол нагрузки ТГ
Pa=ms*Us*Is*cosfi --активная мощность

--Запись результатов в файл
write(" МПС, фазовые сдвиги, ЭДС,
напряжение и акт. мощность","\r\n")
--Пересчет углов (радианы в градусы)

```

```

gl=gl/gr fil=fil/gr fis=fis/gr
teta=teta/gr beta=beta/gr
write(format(" Fm1=%5.2f",Fm1),
format(" gl=%7.2f",gl),"\r\n")
write(format(" El=%5.0f",El),
format(" fil=%7.2f",fil),"\r\n")
write(format(" gf=%4.1f",gf),
format(" teta=%6.2f",teta),
format(" Us=%5.0f",Us),"\r\n")
write(format(" fis=%7.2f",fis),
format(" cosfi=%4.2f",cosfi),
format(" Pa=%6.1f",Pa*1e-6),"\r\n")

write("Электромагнитные момент
и мощность","\r\n")
--Выделение группы блоков ротора
mo_groupselectblock(9)
--Считывание электромагнитного момента
Mem=mo_blockintegral(22) Mem=Mem*1e-3
mo_clearblock() --очистка выделения
--Электромагнитная мощность
Pem=Mem*2*Pi*fs*1e-3
write(format("Mem=%5.0f",Mem)," кН*м",
format("Pem=%6.1f",Pem)," МВт","\r\n")

--Магнитный поток на полюс
--в зазоре на расточке статора
--Цикл угловых шагов в da градусов
for i=1,180,1 do da=1
--Координаты двух точек рядом
ai=da*(i-0.5)*gr ai0=da*(i+0.5)*gr
x=-rsi*sin(ai) y=rsi*cos(ai)
x0=-rsi*sin(ai0) y0=rsi*cos(ai0)
--Считывание ВМП в двух точках
A=mo_getpointvalues(x,y)
A0=mo_getpointvalues(x0,y0)
--Поиск максимума ВМП на окружности
if A0<A then Pot=2*A*1a i=181 end
end --перебора i точек по окружности
write("Магнитный поток на полюс, Вб",
format(" Pot=%5.3f",Pot),"\r\n")

writeto() --Закрытие файла результатов
mi_close() --Закрытие документа
--препроцессора магнетизма

```

Указания по использованию программы

Для использования скрипта полевого расчета параметров и фазовых соотношений ТГ необходимо:

1. Файл скрипта с расширением *.lua и файл с исходными данными с расширением *.txt должны находиться в одной папке на диске компьютера.
2. Запускаем программу FEMM – модель ТГ. Редактор Lua запускается из рабочего окна в FEMM «кнопкой» *Open Lua Script* в меню *File*, а затем в открывшемся окне запускается необходимый файл *lua*.
3. По запросу программы в открывающееся окно вводим имя файла данных и нажимаем клавишу Enter. Дальнейшие действия программа выполняет сама.
4. Результаты расчета находятся в текстовом файле с заданным в файле данных именем RezC_TG340 и читаются редактором *Блокнот*.

Содержимое файла результатов

Приводимые данные соответствуют режиму НН и уже иллюстрировались на рис.5 и рис.6. Для удобства

представления в формате данной статьи текст файла результатов несколько переформатирован.

Данные возбуждения ТГ
Is=11547 beta=-160.43 Ir=3153
МПС, фазовые сдвиги, ЭДС, напряжение и активная мощность
Fml= 53.89 gl= -35.75
El=11971 fil= 34.68
gf= 0.0 teta= 35.75 Us=11547
fis= 31.79 cosfi=0.85 Pa=340.0
Электромагнитные момент и мощность
Mems=-1086 кН*м; Pems=-341.2 МВт
Магнитный поток на полюс статора, Вб
Pot=6.608

В полной версии скрипта Lua вычисляются и выводятся в текстовый файл и другие результаты.

Вывод. Представленные теоретические основы и скрипт Lua дают широкие возможности пользователям программы FEMM для автоматизированного получения электромагнитных параметров и фазовых соотношений в ТГ на основе расчета магнитного поля. Этот скрипт является универсальным с точки зрения структуры электромагнитной системы ТГ в рамках их распространенной конструкции, а также установившихся режимов их работы. Разработанный скрипт Lua может явиться прототипом для аналогичного программного обеспечения расчетов ЭМ других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.
2. Милых В.И., Полякова Н. В. Численно-полевые расчеты электромагнитных параметров турбогенераторов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірн. науков. праць. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 38 (1081). – С.3-18.
3. Милых В.И., Полякова Н. В. Автоматизированное формирование расчетных моделей турбогенераторов для программной среды FEMM // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С.7-14.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 6. – С.00-00.
5. Титов В.В., Хуторецкий Г.М. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия. – 1967. – 895 с.
6. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №4. – С.59-64.
7. Милых В. И., Полякова Н. В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С.33-38.
8. Милых В.И., Полякова Н.В. Основы численного анализа фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе // Електрика, Россия. – 2012. – №3. – С.31-33.
9. Милых В.И., Полякова Н. В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С.36-41.

REFERENCES

1. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. [Electronic resource] – Available

- at: www.femm.info/wiki/OldVersions (accessed 10 March 2014).
2. Milykh V.I., Polyakova N.V. Numerically-field calculations of the electromagnetic parameters of turbogenerators. *Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov – Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, № 38 (1081). pp. 3-18. (Rus).*
3. Milykh V.I., Polyakova N.V. Automated formation of calculation models of turbogenerator for software environment FEMM. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2015, no.4, pp. 7-14. (Rus).
4. Milykh V.I., Polyakova N.V. Automated calculations of the dynamics of a turbo-generator electromagnetic processes in the software environment FEMM. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2015, no.6, pp. 00-00. (Rus).
5. Titov V.V., Hutoreckij G.M., Zagorodnaja G.A., Vartan'jan G.P., Zaslavskij D.I., Smotrov I.A. *Turbogeneratory* [Turbogenerators]. Leningrad, Energiia Publ., 1967. 895 p. (Rus).
6. Milykh V.I., Polyakova N.V. Analysis of phase relationships of electromagnetic parameters in a turbogenerator on the basis of numerical calculation of magnetic fields. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2003, no.4, pp.59-64. (Rus).
7. Milykh V.I., Polyakova N.V. System of directions and phase relations of electromagnetic values at the numeral calculations of the magnetic fields in turbogenerator. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2011, no.5, pp. 33-38. (Rus).
8. Milykh V.I., Polyakova N.V. Bases of numerical analysis of phase correlations of electromagnetic sizes are in a turbogenerator. *Elektrika – Electrician*. 2012, no.3. pp. 31-33. (Rus).
9. Milykh V.I., Polyakova N.V. Organization of the numerical calculation of the magnetic field of turbogenerator in load mode with providing of prescribed its output parameters. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2012. no. 1, pp.36-41. (Rus).

Поступила (received) 22.07.2015

Милых Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Полякова Наталья Владимировна¹, инженер,
¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone: +38 057 7076514; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

V.I. Milykh¹, N.V. Polyakova¹

¹National technical university «Kharkov polytechnic institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM.

The theoretical bases of calculation of electromagnetic quantities and time-phase relationship are presented for the turbo-generators. This is done by numerical calculations of the magnetic field in the software environment package FEMM (Finite Element Method Magnetics). A program which controls calculations and organizes the issuance of the results to a text file is created on the algorithmic language Lua. The program is universal in terms of a turbo-generator models, as well as steady-state modes of their work with a minimum of input data. The exciting current of the rotor and the phase currents of three-phase stator winding in accordance with their initial phase are given for the calculation of the magnetic field. The key function for the analysis of electromagnetic parameters is the calculated angular function of the magnetic flux phase stator winding. The expansion in the harmonic series is carried out and amplitude and initial phase are received for this function. Next, the phase EMF and voltage, phase shifts between all values, active power, electromagnetic torque, the magnetic flux in the gap and other parameters are determined. The presented Lua script is a prototype for a similar calculation software of electric machines of other types. References 9, figures 6.

Key words: Finite Element Method Magnetics, program FEMM, turbo-generator, electromagnetic parameters, phase relationships, automated calculations, Lua script.

В.І. Панченко, Д.В. Ципленков, А.М. Гребенюк, М.С. Кириченко, О.В. Бобров

МАШИННО-ТРАНСФОРМАТОРНИЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В роботі запропонована нова конструкція індукторної електричної машини, яка в технічній літературі називається – машинно-трансформаторним агрегатом (МТА). Для такого агрегату отримано співвідношення для визначення розрахункової потужності. На конкретному прикладі показано, що при однакових габаритах розрахункова потужність МТА може перевищувати таку для звичайних синхронних машин. Конструкція МТА дозволяє розмістити котушки обмотки статора на деякій відстані від рухомих елементів машини, а саме, у закритій ємності, заповненій електроізоляційною рідиною. Це дасть змогу збільшити потужність за рахунок більш ефективного охолодження обмотки, а також підвищити вихідну напругу МТА як генератора до рівня 35 кВ і більше. Бібл. 3, рис. 2.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроенергетичні установки, індукторна електрична машина, машинно-трансформаторний агрегат, полюс, обмотка статора, генератор.

В работе предложена новая конструкция индукторной электрической машины, которая в технической литературе называется – машинно-трансформаторный агрегат (МТА). Для такого агрегата получено соотношение для определения расчетной мощности. На конкретном примере показано, что при одинаковых габаритах расчетная мощность МТА может превышать таковую для обычных синхронных машин. Конструкция МТА позволяет разместить катушки обмотки статора на некотором расстоянии от подвижных элементов машины, а именно, в закрытой емкости, заполненной электроизоляционной жидкостью. Это позволит увеличить мощность за счет более эффективного охлаждения обмотки, а также повысить выходное напряжение МТА как генератора до уровня 35 кВ и более. Библ. 3, рис. 2.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроэнергетические установки, индукторная электрическая машина, машинно-трансформаторный агрегат, полюс, обмотка статора, генератор.

Вступ. До електричних генераторів вітроустановок пред'являються наступні вимоги: вони мають бути багатополісними, мати мінімальні габарити та масу, бути безконтактними але керованими, при роботі на систему електропостачання забезпечувати максимально можливу вихідну напругу.

Постановка завдання. Багатополісність та безконтактність порівняно просто реалізуються у синхронних генераторах зі збудженням від постійних магнітів та в синхронних індукторних генераторах з електромагнітним збудженням, причому в перших, як недолік – відсутня можливість керувати вихідною напругою, у других – малий (до 0,4) коефіцієнт використання магнітного потоку збудження.

Стан питання. В роботі [1] запропоновано нову конструкцію електричної машини – машинно-трансформаторний агрегат, який є безконтактним, має електромагнітне збудження по типу індукторного генератора і більший відносно до останнього коефіцієнт використання магнітного потоку. Але конструкція такого агрегату, особливо у трифазному виконанні, досить складна і, крім того, вимагає значних витрат відокремлення статора. В роботі [2] представлено удосконалену конструкцію машинно-трансформаторного агрегату з вертикальним валом у трифазному виконанні.

Матеріали дослідження. Машинно-трансформаторний агрегат, що розглядається, складається з двох частин – машинної (рис. 1,а зверху) та трансформаторної (рис. 1,а внизу), які мають загальний зовнішній магнітопровід (статор) у вигляді поздовжніх пакетів 1 з ізольованих пластин електротехнічної сталі. На валу 2 машинної частини закріплено втулку ротора 3, на зовнішній поверхні якої розміщено зубчасті радіальні пакети 4 і 5, зроблені також з ізольованих пластин електротехнічної сталі і взаємно зсунуті в осьовому напрямку. Зубці в цих пакетах орієнто-

вані в бік проміжку між ротором і поздовжніми пакетами статора та взаємно зміщені в тангенціальному напрямку на геометричний кут π/z_2 , де z_2 – число зубців в одному пакеті ротора. У проміжку між зубчастими пакетами розміщено кільцеву обмотку збудження 6, прикріплену по її зовнішній поверхні до поздовжніх пакетів статора. Обмотку поділено на дві секції, розташовані поруч. Кожна з них навита з провідної стрічки у взаємно протилежних напрямках, а секції сполучені між собою в кінці навивки зі сторони ротора. Поздовжні пакети 1 по довжині машинної частини агрегату зафіксовано шляхом заливки проміжків між ними немагнітним сплавом, який також утворює корпус 7 цієї частини. У радіальному напрямку пакети 1 опираються на циліндричні боковини 8 і 9, в яких зроблено отвори для їх проходу. У боковинах закріплено підшипники 10 і 11, які посаджені на вал 2. Зовні підшипники закрито кришками.

Ширину (по колу) кожного з пакетів 1 зроблено меншою ширини відповідного паза ротора у його зовнішній (по радіусу) частині. На пакетах трансформаторної частини, в крайніх по довжині областях закріплені котушки робочої обмотки, з'єднані між собою за відповідними схемами – «трикутником» або «зіркою». Нижні торці пакетів притиснені до кільцевого ярма 13, навитого із ізольованої феромагнітної стрічки. Пакети 1 трансформаторної частини, котушки 12 та ярмо 13 розміщені у закритій ємності 14, яку заповнено електроізоляційною рідиною. На зовнішній поверхні ємності закріплено охолоджуючі пристрої 15, сполученні з її внутрішнім об'ємом трубами 16.

При живленні обмотки збудження 6 постійним струмом у магнітній системі агрегату виникає магнітний потік, який виходить, наприклад, із зубців пакету 4 ротора і входить у ті поздовжні пакети статора, площа «перекриття» яких і зубців ротора макси-

мальна (на рис. 1 напрям магнітного потоку збудження показано стрілками). Далі магнітний потік із пакетів 1 входить у кільцеве ярмо 13 і звідти – в інші пакети статора 1, а саме в ті, площа «перекриття»

яких і зубців ротора пакету 5 максимальна. Далі, із відповідних пакетів статора 1 магнітний потік входить у зубці ротора пакету 5 і по втулці 3 знову в пакет 4 ротора.

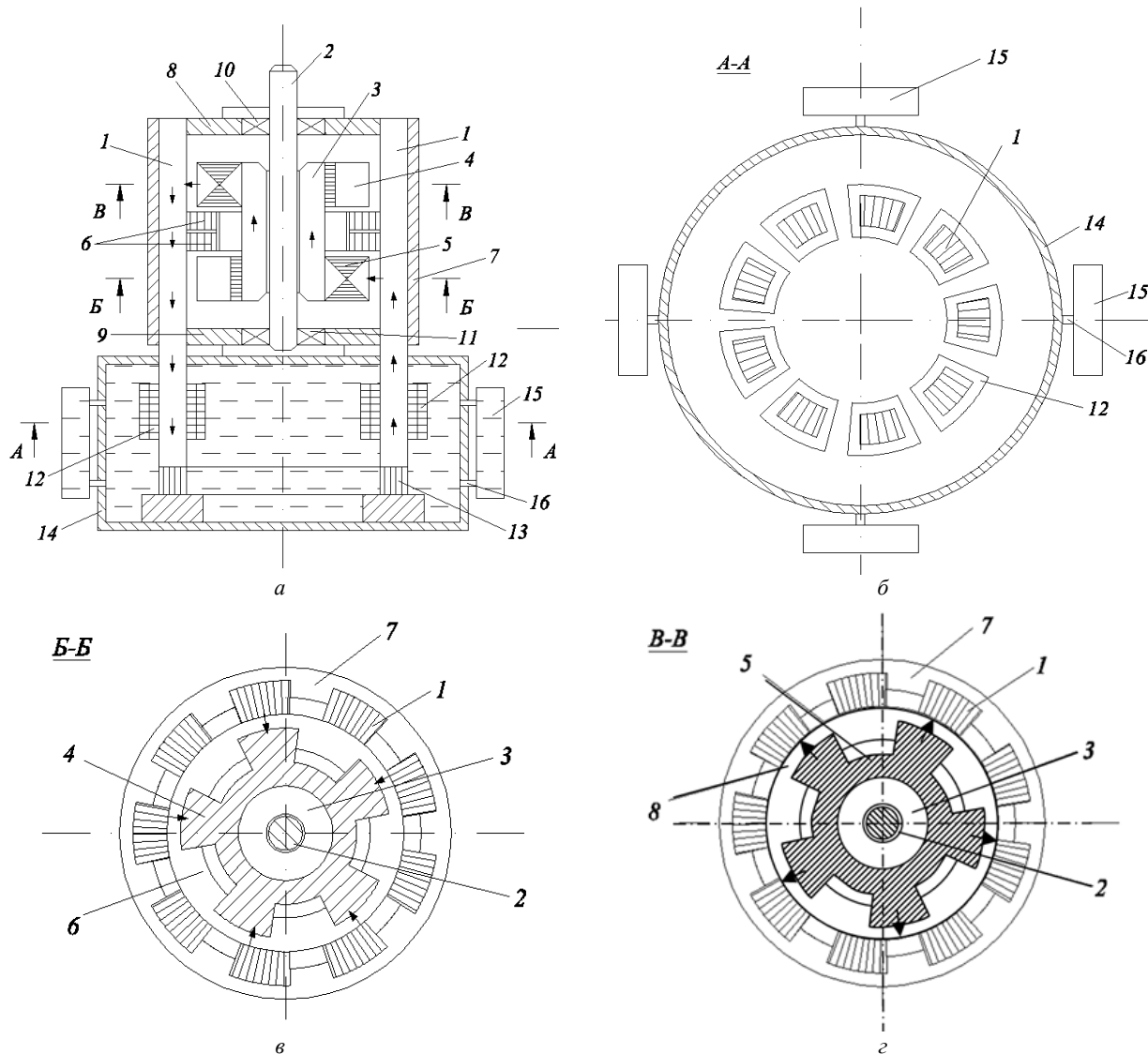


Рис. 1. Конструкція машинно-трансформаторного агрегату
(а – поздовжній осьовий переріз; б, в, г – поперечні перерізи у різних місцях по висоті)

При обертанні ротора, наприклад, вітрогенератором зубці його пакетів безперервно змінюють своє положення відносно поздовжніх пакетів статора, що приводить до зміни розміру і напрямку магнітних потоків в останніх. Вказані потоки пронизують котушки 12 робочої обмотки, що викликає появу в ній електрорушійної сили (ЕРС) з частотою $f = z_2 n / 60$, де n – частота обертання ротора, об/хв.

Розрахункова потужність машинно-трансформаторного агрегату (МТА):

$$P' = m E_1 I_1, \quad (1)$$

де m – число фаз обмотки статора; E_1 – електрорушійна сила (ЕРС) фази; I_1 – струм фази.

На кожному поздовжньому пакеті магнітопроводу статора розміщена котушка однієї з фаз. Кількість таких котушок на фазу складе $z_{\Phi} = z_1 / m$, відповідно, ЕРС фази

$$E_1 = z_{\Phi} E_K K_p = z_{\Phi} E_K K_p / m,$$

де z_1 – загальна кількість пакетів; E_K – ЕРС однієї котушки; K_p – коефіцієнт розподілення, що враховує взаємний фазовий зсув векторів ЕРС котушок фази.

На рис. 2 умовно показано взаємне положення пакетів статора і зубців ротора в деякий початковий момент часу та після зміщення ротора на полюсну поділку $\tau = 0,5 t_2$, де t_2 – зубцева поділка ротора.

Магнітний потік, який пронизує витки котушки, $\Phi_K = \Phi_3 - \Phi_n$, де Φ_3 – потік, що входить в пакет статора із зубця ротора; Φ_n – потік, який із пакета статора входить у паз сусіднього пакета ротора.

Середнє значення ЕРС котушки

$$E_{K_{cp}} = w_K \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = w_K \frac{2 \Phi_K}{T/2} = 4 f w_K (\Phi_3 - \Phi_n), \quad (2)$$

де w_K – кількість витків котушки; $\Delta \Phi = 2 \Phi_K$ – зміна магнітного потоку через котушку за час $\Delta t = 0,5 T$, відповідного зміщенню ротора на відстань τ відносно початкового положення. $T = 1/f$ – період ЕРС; f – її частота.

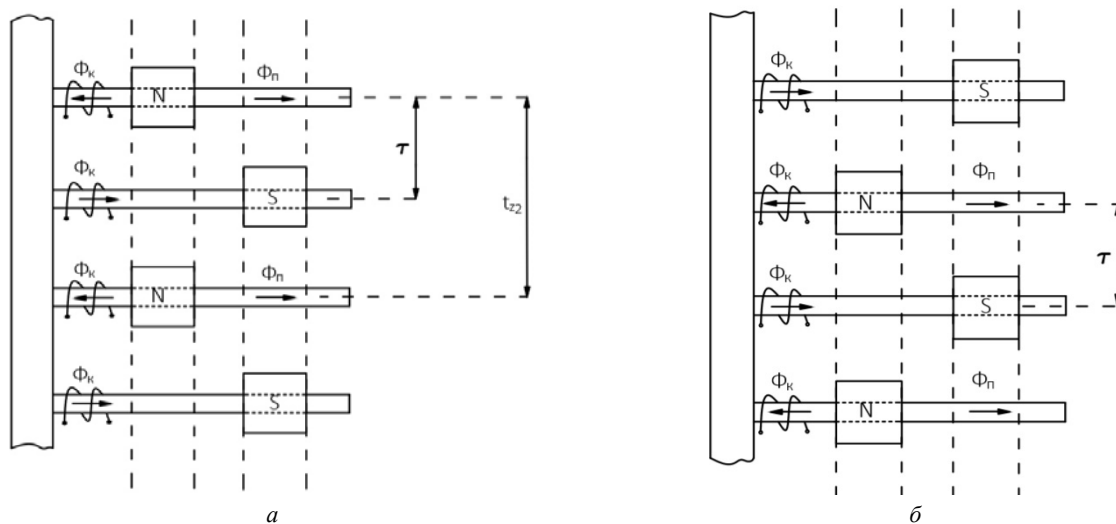


Рис. 2. Схеми взаємного розташування пакетів статора і зубців ротора у різні моменти часу

Значення магнітних потоків:

$$\Phi_3 = \frac{\mu_0 F_\delta S_3}{\delta_1}; \quad \Phi_{\Pi} = \frac{\mu_0 F_\delta S_{\Pi}}{\delta_2},$$

де μ_0 – магнітна стала; F_δ – магніторушійна сила (МРС) обмотки збудження на один повітряний проміжок; δ_1, δ_2 – повітряні проміжки між пакетом статора і зубцем ротора та, відповідно, між пакетом статора і пазом ротора; S_3, S_{Π} – площі магнітних потоків між пакетом і зубцем та між пакетом і пазом, причому, $S_3 = b_{z1} l_{\Pi}$; $S_{\Pi} = b'_{\Pi} l_{\Pi}$, де b_{z1} – ширина пакета; l_{Π} – осьова довжина (товщина) зубця ротора; b'_{Π} – розрахункова ширина паза ротора.

Після підстановки наведених формул у вираз (2) маємо:

$$E_{Kcp} = 4w_K f B_\delta l_{\Pi} b_{z1} \left(1 - \frac{\delta_1 b'_{\Pi}}{\delta_2 b_{z1}} \right), \quad (3)$$

де B_δ – магнітна індукція у повітряному проміжку між пакетом статора і зубцем ротора (максимальне значення).

Запишемо: $b_{z1} = \alpha_p \tau$, де α_p – коефіцієнт полюсної дуги. В результаті відповідних розрахунків одержано відношення $(b'_{\Pi}/b_{z1}) = 1,2$. Машина, що аналізується, з боку ротора є двопакетною; зона дії магнітного потоку збудження в осьовому напрямку – це активна довжина магнітопроводу, тобто $l_\delta = 2l_{\Pi}$. Запишемо вираз у дужках формули (3) таким чином:

$$\left(1 - \frac{\delta_1 b'_{\Pi}}{\delta_2 b_{z1}} \right) = \left(1 - \frac{1,2\delta_1}{\delta_2} \right) = K_{\Pi},$$

де K_{Π} – коефіцієнт, що враховує магнітний потік розсіювання.

З урахуванням наведеного запишемо вираз для діючого значення ЕРС котушки

$$E_K = K_\phi E_{Kcp} = 2K_\phi \alpha_p K_{\Pi} w_K f B_\delta l_\delta \tau, \quad (4)$$

де K_ϕ – коефіцієнт форми магнітного потоку збудження.

Котушки обмотки статора за конструкцією подібні таким же на стрижнях силових трансформаторів. Як і для трансформаторів запишемо співвідношення для лінійного навантаження: $A = I_1 w_K / l_K$, де l_K – осьова довжина котушки. Звідки фазний струм

$$I_1 = \frac{A l_K}{w_K}. \quad (5)$$

Підставимо співвідношення (3), (4), (5) у формулу (1) з урахуванням того що: $f = pn/60$ і $\tau = \pi D / (2p)$, де p – число пар полюсів машини, яке дорівнює кількості зубців ротора z_2 в одному пакеті; D – діаметр розточки, на якому розміщені пакети статора; n – частота обертання ротора, об/хв. Одержимо:

$$P' = \frac{\pi}{60D} \alpha_p K_\phi K_p K_{\Pi} B_\delta A D^2 l_\delta l_K z_1 n. \quad (6)$$

Розглянемо більш детально вираз для лінійного навантаження

$$A = \frac{I_1 w_K}{l_K} = \frac{j_a S_{\Pi} w_K}{l_K} = \frac{j_a h_K l_K K_{3M}}{l_K} = j_a h_K K_{3M},$$

де h_K – товщина котушки; K_{3M} – коефіцієнт заповнення поздовжнього перерізу котушки міддю; j_a – густина струму в котушці.

Проміжок по колу між пакетами статора на діаметрі D позначимо через $b_{\Pi 1}$, причому $b_{\Pi 1} = t_1 - b_{z1}$, де t_1 – зубцева поділка статора. Бажано забезпечити $b_{\Pi 1} = 0,5t_1$. Тоді, товщина котушки $h_K \approx 0,45b_{\Pi 1} \approx 0,23t_1$. Значення наступного добутку у формулі (6) буде таким:

$$\frac{A l_K z_1}{D} = 0,72 j_a l_K K_{3M}.$$

Після підстановки останнього співвідношення у (6) одержимо:

$$P' = 3,8 \cdot 10^{-2} \alpha_p K_\phi K_p K_{\Pi} K_{3M} B_\delta j_a D^2 l_\delta l_K n. \quad (7)$$

Стосовно коефіцієнта $\alpha_p = b_{z1}/\tau$:

- ширина пакета статора $b_{z1} = t_1 - b_{\Pi 1} = 0,5t_1$;
- полюсна поділка $\tau = \pi D / (2z_2)$.

Тому

$$\alpha_p = \frac{t_{z1}}{t_{z2}} = \frac{z_2}{z_1}.$$

Для виконання машини трифазною треба забезпечити:

$$z_1 = 2z_2 + K,$$

де $K = 1, 2, 3 \dots$, тоді

$$\alpha_p = \frac{z_2}{2z_2 + K} = \frac{1}{2 + \frac{K}{z_2}} < 0.5.$$

Формула для розрахункової потужності класичних синхронних машин з електромагнітним збудженням має вид [3].

$$P'_c = 0,164 \alpha_i K_\phi K_{06} B_{\delta c} A_c D^2 l_{\delta n}. \quad (8)$$

Відношення розрахункових потужностей при однакових габаритних розмірах

$$\frac{P'}{P'_c} = \frac{0,23 \alpha_p K_p K_{\pi} K_{3m} B_{\delta} j_a l_k}{\alpha_i K_{06} B_{\delta c} A}. \quad (9)$$

Виконаємо за останньою формулою розрахунки (генератори в діапазоні потужностей до 1000 кВА).

Прийmemo: $\alpha_p=0,45$; $K_p=0,95$; $K_{3m}=0,58$; $B_{\delta}=1,5$ Тл; $j_a = 4 \cdot 10^6$ А/м²; $\alpha_i=0,85$; $K_{06}=0,92$; $B_{\delta c}=0,9$ Тл; $A_c=4 \cdot 10^4$ А/м.

В результаті розрахунків одержимо:

$$\frac{P'}{P'_c} = \frac{0,23 \cdot 0,45 \cdot 0,95 \cdot 0,58 \cdot 1,5 \cdot 4 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,92 \cdot 0,9 \cdot 4 \cdot 10^4} l_k = 11,2 l_k.$$

При $l_k = 0,1$ м маємо $P' = 1,12 P'_c$, тобто розрахункова потужність МТА може перевищувати таку для звичайного синхронного генератора. Вибором значення l_k можна змінювати розмір потужності в межах допустимого теплового навантаження обмотки статора. Слід зазначити, що індукція B_{δ} у повітряному проміжку МТА обмежується тільки магнітним насиченням електротехнічної сталі пакетів статора, тобто $B_{\delta} \leq 1,8$ Тл, що значно вище у порівнянні з класичними генераторами.

Просторове розподілення машинної і трансформаторної частин в МТА дозволить розмістити котушки обмотки статора на деякому віддаленні від рухомих елементів, наприклад, у закритій ємності, заповненій електроізоляційною рідиною. При цьому забезпечується більш ефективне охолодження обмотки статора в робочому режимі, що дає змогу збільшити густину струму в обмотці і, відповідно, потужність МТА у порівнянні з випадком повітряного охолодження. З іншого боку, розміщення обмотки в електроізоляційній рідині дозволить збільшити вихідну напругу МТА в режимі генератора до рівня 35 кВ і вище і відмовитись при цьому від використання силового трансформатора, що підвищує напругу перед подачею електроенергії у високовольтну мережу.

Обмотка статора МТА складається з окремих котушок, закріплених на поздовжніх пакетах. Котушки є зосередженими, що забезпечить мінімальну довжину лобових частин. У звичайних синхронних генераторах кількість зубців статора вибирають згідно формули: $z_1=2p\pi q$, де $q \geq 2$. Для малообертових генераторів, наприклад, коли $n = 150$ об/хв, $f = 50$ Гц, $q = 2$, треба забезпечити $p = 20$ і $z_1 = 2 \cdot 20 \cdot 3 \cdot 2 = 240$. При цьому ускладнюється виконання статора і вимушено збільшуються габарити генератора. Розглянемо можливість реалізувати трифазну машину (МТА), коли $z_1=2z_2+K$. Магнітне поле збудження забезпечує у повітряному проміжку кожного з пакетів ротора кількість пар полюсів $p = z_2$. Взаємний кут зсуву γ (в електричних градусах) двох котушок, розташованих на сусідніх пакетах статора у цьому магнітному полі, складе:

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z_1} = \frac{2\pi(z_1 - K)}{2z_1} = \pi - \frac{K\pi}{z_1}.$$

Сусідні пакети відносяться до однієї з фаз, а котушки цих пакетів з'єднуються між собою послідовно зустрічно, то електричний кут між векторами ЕРС котушок буде таким

$$\gamma_c = \pi - \gamma = \frac{K\pi}{z_1}.$$

Кількість пакетів статора у трифазній електричній машині $z_1 = am$, де $a = 2, 3, 4 \dots$ – кількість пакетів на фазу. У формулі $z_1 = 2z_2 + K$ число K позначає кількість віток обмотки однієї фази, з'єднаних між собою послідовно або паралельно. Кількість котушок в одній вітці обмотки буде такою:

$$a_r = \frac{z}{Km} = \frac{a}{K}.$$

Електричний кут, який займають по розточці котушки однієї вітки,

$$\gamma_r = a_r \gamma_c = \frac{z_1}{K \cdot m} \cdot \frac{K \cdot \pi}{z_1} = \frac{\pi}{m} = 60 \text{ град.ел.}$$

Остання формула підтверджує можливість створення симетричної трифазної обмотки з 60-ти градусною фазною зоною. Із попередніх міркувань слідує, що числа a_r і K повинні бути цілими. Зв'язок між ними описує співвідношення:

$$a_r = \frac{z_1}{K \cdot m} = \frac{2z_2/(K+1)}{m}. \quad (10)$$

Значення K бажано мати мінімальним. Послідовно збільшуючи значення K , починаючи з одиниці, знаходимо із формули (10) відповідну величину a_r у вигляді першого цілого числа. Наприклад, коли $n = 150$ об/хв, $f = 50$ Гц, $z_2 = 20$, $m = 3$, то тільки при $K = 2$ отримаємо $a_r = 7$. Тоді: $z_1 = 2 \cdot 20 + 2 = 42$, $a = z_1/m = 42/3 = 14$.

Як було зазначено раніше, збудження у МТА забезпечує одна нерухома кільцева обмотка. Визначимо витрати міді для створення такої обмотки. Для магнітного кола, по якому проходить потік збудження, справедливе рівняння:

$$2\delta H_{\delta} K_F = I_3 w_3 = F_3,$$

де H_{δ} – напруженість магнітного поля у повітряному проміжку розміром δ_1 між пакетом статора і зубцем ротора; $K_F > 1$ – коефіцієнт, що враховує феромагнітні ділянки кола; I_3 і w_3 – струм і кількість витків обмотки збудження; F_3 – магніторухійна сила (МРС) обмотки.

Врахуємо наступне: $H_{\delta} = B_{\delta}/\mu_0$; $I_3 w_3 = j_3 S_{\text{пр}} w_3 = S_{\text{мз}} w_3$, де j_3 – густина струму в обмотці; $S_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу провідника; $S_{\text{мз}} = S_{\text{пр}} w_3$ – площа поперечного перерізу міді обмотки, причому

$$S_{\text{мз}} = \frac{F_3}{j_3} = \frac{2\delta B_{\delta} K_F}{\mu_0 j_3}.$$

Враховуючи, що середня довжина витка $l_{\text{cp}} = \pi(D-h_0)$, де h_0 – радіальна товщина обмотки, об'єм міді обмотки збудження буде таким:

$$V_{\text{м}} = S_{\text{мз}} l_{\text{cp}} = \frac{2\pi \delta B_{\delta} K_F}{\mu_0 j_3} \left(1 - \frac{h_0}{D}\right) = \frac{2V_{\delta} B_{\delta} K_F}{\mu_0 j_3} \left(1 - \frac{h_0}{D}\right),$$

де $V_{\delta} = \pi D \delta$ – об'єм повітряного проміжку між пакетами статора та зубцями ротора.

Для порівняння визначимо витрати міді на обмотку збудження синхронного явнополюсного генератора. Запишемо рівняння магнітної рівноваги для магнітного кола, який проходить через два сусідні полюси,

$$2\delta H_{\delta} K_F K_{\delta} = 2I_K w_K = 2F_K,$$

де K_{δ} – коефіцієнт, що враховує зубчастість статора; I_K і w_K – струм та кількість витків котушки полюса; $F_K = I_K w_K$ – МРС котушки.

Площа поперечного перерізу міді котушки

$$S_{MK} = S_{пр} w_K = \frac{F_K}{j_K} = \frac{\delta B_{\delta} K_F K_{\delta}}{\mu_0 j_K},$$

де j_K – густина струму в котушці.

Об'єм міді котушки

$$V_{MK} = S_{MK} l_{ср.к.},$$

де $l_{ср.к.}$ – середня довжина витка. Вона складає приблизно $l_{ср.к.} = 2,5(l_{\delta} + b_{п})$; l_{δ} – довжина магнітопроводу статора; $b_{п}$ – ширина осердя полюса.

Звичайно $b_{п} \approx 0,35\tau$. Запишемо:

$$l_{ср.к.} = 2,5(l_{\delta} + 0,35\tau) = 2,5D \left(\frac{l_{\delta}}{D} + 0,55/p \right) = 2,5D \left(\lambda + 0,55/p \right),$$

де $\lambda = l_{\delta}/D$. Тоді

$$V_{MK} = \frac{0,8V_{\delta} B_{\delta} K_F K_{\delta}}{\mu_0 j_K} \left(\lambda + 0,55/p \right).$$

Загальний об'єм міді обмотки збудження, яка складається із $2p$ котушок, враховуючи рекомендацію до вибору $\lambda = 0,8/p^{1/2}$, буде таким

$$V_{MC} = 2p V_{MK} = \frac{0,9V_{\delta} B_{\delta} K_F K_{\delta}}{\mu_0 j_K} (1,45\sqrt{p} + 1).$$

Відношення об'ємів міді обмоток збудження при однакових об'ємах повітряного проміжку, густині струму в обмотках і насиченню магнітопроводів:

$$\frac{V_{MC}}{V_M} = \frac{0,45B_{\delta} K_{\delta} (1,45\sqrt{p} + 1)}{B_{\delta} (1 - h_0/D)}.$$

Так, для $p = z_2 = 20$; $B_{\delta} = 1,5$ Тл; $B_{\delta c} = 0,9$ Тл; $K_{\delta} = 1,2$; $h_0/D = 0,05$, отримаємо: $V_M/V_{MC} = 2,5$.

Висновки.

1. Синхронна електрична машина у виді машино-трансформаторного агрегату завдяки явнополюсній конструкції і значній магнітній індукції у повітряному проміжку дозволить збільшити розрахункову потужність та зменшити витрати міді на обмотку збудження порівняно з класичною синхронною машиною з електромагнітним збудженням.

2. Розміщення трансформаторної частини агрегату у закритій ємності, заповненій електроізоляційною рідиною, дозволить збільшити вихідну напругу в режимі роботи генератором, а також потужність агрегату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент РФ № 2096893. Машинно-трансформаторный агрегат / Свечарник Д.В. – Открытия. Изобретения, 1997, №32.
2. Патент України № 103685. Машинно-трансформаторный агрегат / Панченко В.І. – Промислова власність, 2013. – Бюл. №21.
3. Гольдберг О.Д., Гури́н Я.С., Сви́риденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высш.шк., 1984. – 431 с.

REFERENCES

1. Svecharyk D.V. Mashinno-transformatornyi agregat [Machine-transformer unit]. Patent Russian Federation, no.2096893, 1997. (Rus).
2. Panchenko V.I. Mashynno-transformatornyi ahrehat [Machine-transformer unit]. Patent UA, no.103685, 2013. (Ukr).
3. Goldberg A.D., Gurin Y.S., Sviridenko Y.S. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Designing of electric machines]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1984. 431 p. (Rus).

Надійшла (received) 27.11.2015

Панченко Віктор Іванович¹,

Ципленков Дмитро Володимирович¹, к.т.н., доц.,

Гребенюк Андрій Миколайович¹, к.т.н., доц.,

Кириченко Марина Сергіївна¹, асистент,

Бобров Олексій Володимирович¹, к.т.н.,

¹ Державний вищий навчальний заклад

«Національний гірничий університет»,

49005, Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19,

тел/phone +38 056 3730743, +38 066 7746309,

e-mail: nmu.em@ua.fm

V.I. Panchenko¹, D.V. Tsyplyenkov¹, A.M. Grebeniuk¹,

M.S. Kyrychenko¹, O.V. Bobrov¹

¹ State Higher Education Institution «National Mining University», 19, K. Marksa Avenue, Dnipropetrovsk, 49005, Ukraine.

Machine-transformer units for wind turbines.

Background. Electric generators of wind turbines must meet the following requirements: they must be multi-pole; to have a minimum size and weight; to be non-contact, but controlled; to ensure the maximum possible output voltage when working on the power supply system. Multipole and contactless are relatively simply realized in the synchronous generator with permanent magnet excitation and synchronous inductor generator with electromagnetic excitation; moreover the first one has a disadvantage that there is no possibility to control the output voltage, and the second one has a low magnetic leakage coefficient with the appropriate consequences. **Purpose.** To compare machine dimensions and weight of the transformer unit with induction generators and is an opportunity to prove their application for systems with low RMS-growth rotation. **Methodology.** A new design of the electric inductor machine called in technical literature as machine-transformer unit (MTU) is presented. A ratio for estimated capacity determination of such units is obtained. **Results.** In a specific example it is shown that estimated power of MTU may exceed the same one for traditional synchronous machines at the same dimensions. The MTU design allows placement of stator coil at some distance from the rotating parts of the machine, namely, in a closed container filled with insulating liquid. This will increase capacity by means of more efficient cooling of coil, as well as to increase the output voltage of the MTU as a generator to a level of 35 kV or more. The recommendations on the certain parameters selection of the MTU stator winding are presented. The formulas for copper cost calculating on the MTU field winding and synchronous salient-pole generator are developed. In a specific example it is shown that such costs in synchronous generator exceed 2.5 times the similar ones in the MTU. References 3, figures 2.

Key words: wind power, wind turbines, electric machine inductor, transformer-machine unit, pole stator winding, generator.

В.С. Петрушин, Л.Я. Беликова, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФАЗНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обґрунтовано можливість створення модифікацій багатofазних асинхронних двигунів на базі серійних. Розглянуто ряд силових схем регулювання електроприводів, в яких забезпечується багатofазне живлення асинхронних двигунів. Аналізується робота приводів на визначене за величиною і характером навантаження і заданим діапазоном регулювання. В результаті математичного моделювання визначено, що температури прогріву обмоток статорів розглянутих двигунів не перевищують допустимих значень відповідно до класу ізоляції. Виконано порівняння техніко-економічних показників розглянутих схем і двигунів, що дає можливість здійснити прийнятний вибір варіанта. Встановлено закономірності зміни фазних струмів багатofазних двигунів в діапазоні регулювання. Досліджено зміну віброакустичних показників у статичних та динамічних режимах. Визначено зниження цих показників в двигунах з числом фаз, що перевищує три. Бібл. 10, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: багатofазний регульований асинхронний двигун, напівпровідниковий перетворювач частоти, математичне моделювання, регульовальні характеристики, обмотка статора, віброакустичні показники.

Обоснована возможность создания модификаций многофазных асинхронных двигателей на базе серийных трехфазных. Рассмотрен ряд силовых схем регулируемых электроприводов, в которых обеспечивается многофазное питание асинхронных двигателей. Анализируется работа приводов на определенную по величине и характеру нагрузку и заданным диапазоном регулирования. В результате математического моделирования определено, что температуры перегрева обмоток статоров рассматриваемых двигателей не превышают допустимых значений соответственно классу нагревостойкости изоляции. Выполнено сравнение технико-экономических показателей рассматриваемых схем и двигателей, дающее возможность осуществить приемлемый выбор варианта. Установлены закономерности изменения фазных токов многофазных двигателей в диапазоне регулирования. Исследовано изменение виброакустических показателей в статических и динамических режимах. Определено снижение этих показателей в двигателях с числом фаз, превышающим три. Библ. 10, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: многофазный регулируемый асинхронный двигатель, полупроводниковый преобразователь частоты, математическое моделирование, регулировочные характеристики, обмотка статора, виброакустические показатели.

Введение. Многофазные регулируемые асинхронные двигатели (РАД) находят применение в медицинской и бытовой технике, в электрооборудовании, в текстильной промышленности, в системах электродвижения судов [1, 2]. Перспективно их использование в специальных вентиляционных системах и комплексах, где требуется повышенная надежность двигателя при низком уровне шума и вибрации [3]. У многофазных РАД наблюдается снижение пульсаций момента и скорости на валу двигателя, повышение надежности при уменьшенных уровнях шума и вибрации. Кроме того, дробление электрической мощности по фазам делает регулировочные характеристики РАД менее критичными к асимметрии по амплитуде и фазе питающего напряжения, что с увеличением числа фаз (m), в конечном итоге, упрощает систему управления и повышает надежность [4, 5]. Системы электропривода (ЭП) с многофазными РАД реализуются при использовании преобразователя частоты с несколькими автономными инверторами напряжения (АИН), создающего симметричную систему напряжений, имеющую временной сдвиг, равный пространственному сдвигу фаз многофазных двигателей (рис. 1).

Многофазные асинхронные двигатели могут быть созданы на базе серийных трехфазных основного исполнения. В некоторых случаях это реализуется при наличии в трехфазных нескольких параллельных ветвей. Уменьшая их число, получаем многофазную модификацию (вдвое – шестифазную, втрое – девятифазную и т.д.). При этом геометрия активной части, число витков в фазе и сечение обмоточного провода не меняется. Также следует учитывать число пазов на полюс и фазу.

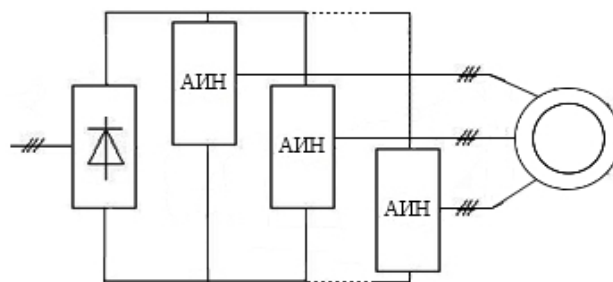


Рис. 1. Схемы регулируемых ЭП с многофазными РАД

В случае невозможности такого решения задачи необходимо менять число эффективных витков в фазе w_ϕ и сечение провода d_w . Используя выражение

$$w_\phi = \frac{Z_1}{2 \cdot m} \cdot \frac{U_n}{a}$$

за счет варьирования числа параллельных ветвей (a), количества проводников в пазу (U_n) и числа витков добиваются сохранения значения магнитного потока. При этом следует выполнять проверку коэффициента заполнения паза [6].

Постановка задачи. Для формирования моделей электроприводов с многофазными РАД следует ввести ряд исходных данных, определяющих как функциональные свойства, так и массогабаритностоимостные показатели. Последние дают возможность рассмотреть экономические аспекты различных вариантов ЭП. Массогабаритностоимостные показатели многофазных преобразователей частоты условно увеличиваются на 30 % при переходе от трехфазного к шестифазному исполнению, на 60 % при переходе к девятифазному и т.д. За счет увеличения затрат на

© В.С. Петрушин, Л.Я. Беликова, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев

производство учитывается изменение стоимостей многофазных двигателей.

Для сопоставления вариантов ЭП необходимо использовать определенные показатели, в том числе среднediaзонный КПД [7], который отражает энергетику РАД во всем заданном диапазоне регулирования от n_1 до n_2 и определяется как эквивалентный усредненный для этого диапазона.

$$\eta_{сдАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} \eta_{АД}(n) dn.$$

Обобщенный критерий приведенных затрат привода (ПЗ) учитывает стоимость изготовления и затраты на эксплуатацию. В связи с тем, что затраты зависят от КПД и коэффициента мощности, обобщенный критерий приведенных затрат имеет различные значения в разных точках диапазона и целесообразно определять диапазонное значение этого критерия, т.е. эквивалентное усредненное для всего диапазона.

Следует отметить, что при работе РАД в составе современных частотно-регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии. Тогда

$$ПЗ_{ЭП} = сер [1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аЭП},$$

где $сер$ – полная стоимость электропривода, которая складывается из стоимости РАД и преобразователя, у.е.; $C_{аЭП} = C_{cae} P_{1ЭП} (1,04 - \eta_{сдЭП})$ – стоимость потерь электроэнергии за год, у.е.; T_n – нормативный срок окупаемости двигателя, лет; k_a – доля затрат на амортизационные отчисления; k_o – доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигателя; C_{cae} – коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии в течении срока службы двигателя (0,1 у.е. за кВт·ч), числа часов работы двигателя в течении года (2100), числа лет работы до капитального ремонта (5 лет) и коэффициента относительной загрузки двигателя (принято 1); $P_{1ЭП}$ – потребляемая приводом активная мощность, кВт; $\eta_{сдЭП}$ – среднediaзонный КПД привода. Для регулируемых асинхронных двигателей значения $T_n = 5$ лет, $k_a = 0,065$, $k_o = 0,069$ принимаются такими же, что и для общепромышленных АД [8].

Результаты исследований. Моделирование регулируемых электроприводов (РЭП) с совместным рассмотрением преобразователей, двигателей и нагрузок [9] позволяет осуществлять программный продукт DimasDrive [10], разработанный на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета.

В качестве базового двигателя выбран трехфазный двигатель 4A200M6, работающий с частотным преобразователем Altivar 58HD33N4 (3650 у.е., 34 кг, $\eta_{np} = 0,94$). За счет изменения обмоточных данных выполнены шестифазная (число витков $w_1 = 114$, число параллельных ветвей $a = 2$, сечение эффективного проводника $q_{эф} = 1,76 \text{ мм}^2$, диаметр изолированного обмоточного провода $d_{np} = 1,585 \text{ мм}$) и двенадцатифазная

(число параллельных ветвей $a = 1$, при остальных данных одинаковых с шестифазной) модификации.

Рассматривался закон частотного управления $U/f = \text{const}$. В качестве нагрузки использовалась тяговая нагрузка, $P_{нагр} = 18 \text{ кВт}$ с максимальным моментом 140 Н·м. При заданной постоянной по величине нагрузке, требуемый диапазон регулирования (200 – 1600 об/мин) в системах РЭП может быть обеспечен рассматриваемыми двигателями.

Регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических, тепловых, механических, виброакустических величин от числа оборотов, могут быть получены при использовании семейств характеристик, в том числе и механических, при различных параметрах регулирования, на которые накладываются характеристики нагрузочного механизма. На рис. 2 представлено семейство механических характеристик и заданной нагрузки, соответствующие РЭП с трехфазным РАД. Семейства механических характеристик для РЭП с шести и двенадцати фазными двигателями имеют аналогичный вид.

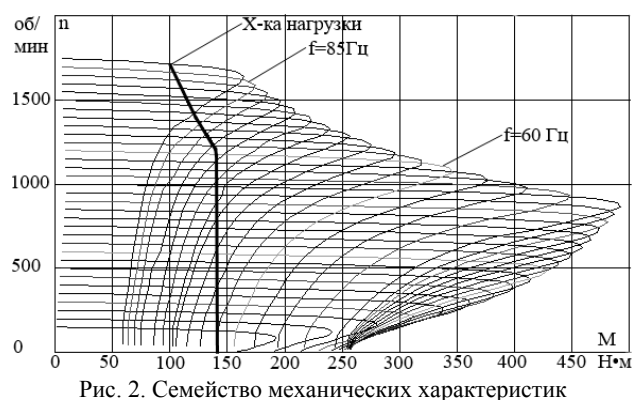


Рис. 2. Семейство механических характеристик

При данном сочетании механических характеристик и нагрузки наблюдается трехзонность. В пределах каждой зоны имеет место однообразное изменение механических характеристик и характеристики нагрузки. Температуры перегревов обмоток статоров рассматриваемых двигателей не превышают допустимых классом нагревостойкости F значений, при выбранной нагрузке в заданном диапазоне регулирования.

На рис. 3 представлены некоторые регулировочные характеристики рассматриваемых РЭП, представляющие собой зависимости изменения потребляемого двигателями тока и виброакустических показателей электромагнитной природы от числа оборотов.

В табл. 1 приведены значения показателей рассмотренных РЭП, к числу которых относятся среднediaзонные КПД ($\eta_{сд}$) и приведенные затраты ($ПЗ_{сд}$), а также массогабаритостоймостные показатели как двигателей, так и приводов.

Может быть выполнен расчет стоимости потерь активной энергии за год.

$$C_a = C_a \cdot T_{сод} \cdot K_3 \cdot P_{мех} \cdot (1 + 0,04 - \eta_{РЭП}) / \eta_{РЭП},$$

где $C_a = 0,1$ у.е. – цена за 1 кВт·ч; $T_{сод} = 2100$ – число часов работы РЭП в году; K_3 – коэффициент загрузки (принимается равным 1,0); 0,04 – относительная величина потерь в распределительной сети потребителя.

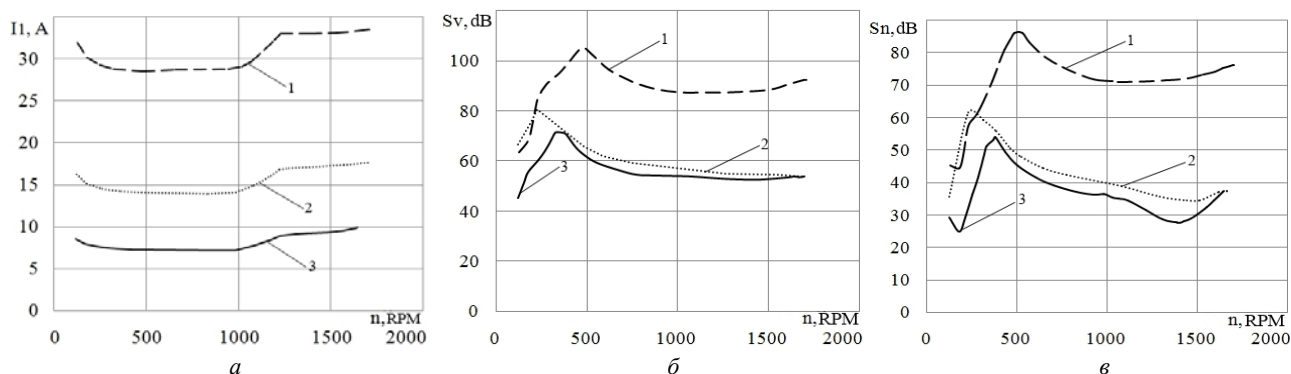


Рис. 3. Изменение потребляемого тока (а), виброскорости (б) и шума электромагнитной природы (в) в диапазоне регулирования: 1 – РЭП с серийным трехфазным АД, 2 – РЭП с шестифазным АД, 3 – РЭП с двенадцатифазным АД

Таблица 1
Сравнение показателей различных РЭП

РЭП	С 3-х фазным РАД	С 6-ти фазным РАД	С 12-ти фазным РАД
Показатели и параметры			
$\eta_{сд}$ АД, %	82.97	82.41	81.70
$\eta_{сд}$ РЭП, %	81.34	80.79	80.10
$P_{сд}$ АД, у.е.	5729	5844	6034
$P_{сд}$ РЭП, у.е.	11991	13935	17779
Стоимость АД, у.е.	1994	2016	2069
Масса АД, кг	254	254	254
Объем АД, дм ³	19	19	19
Масса РЭП, кг	288	298	318
Объем РЭП, дм ³	56	101	275
Стоимость РЭП, у.е.	5644	6761	9004

Таблица 2
Сравнение стоимостей потерь активной энергии различных РЭП

РЭП	С 3-х фазным РАД	С 6-ти фазным РАД	С 12-ти фазным РАД
Показатели и параметры			
$\eta_{сд}$ РЭП, %	81.34	80.79	80.10
Стоимость потерь активной энергии за год, у.е.	1001	1036	1073

Также выполнено моделирование для каждого схемного решения РЭП при работе на заданную тахограмму (2 с. – 200 об/мин, 2 с. – 600 об/мин, 2 с. – 1200 об/мин) с учетом переходных процессов.

На рис. 4 показаны изменения токов, виброскоростей и шумов электромагнитной природы при работе рассматриваемых двигателей на заданную тахограмму.

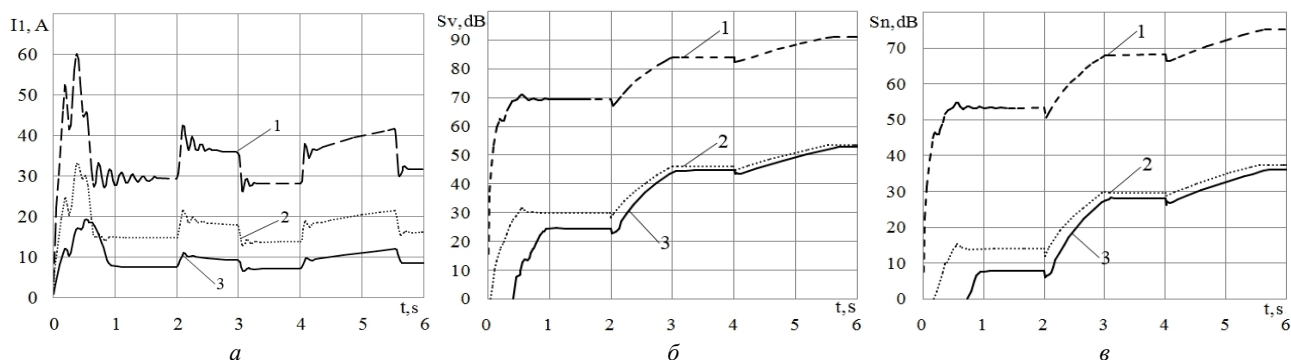


Рис. 4. Изменение потребляемого тока (а), виброскорости (б) и шума электромагнитной природы (в) в диапазоне регулирования: 1 – РЭП с серийным трехфазным АД, 2 – РЭП с шестифазным АД, 3 – РЭП с двенадцатифазным АД

Выводы.

1. Потребляемый ток многофазных РАД уменьшается пропорционально числу фаз по сравнению с током трехфазного двигателя.
2. Значительное снижение виброакустических показателей электромагнитной природы наблюдается при переходе от трёхфазного к многофазным РАД. Это снижение неравномерно и в начальной части диапазона минимально, а также наблюдаются резонансные явления. Кроме того, для рассматриваемых РЭП разница между этими показателями шести и две-

надцатифазных РАД не столь существенна. В силу этого при данной проектной задаче следует отдать предпочтение шестифазному РЭП, так как двенадцатифазный значительно дороже, тяжелее и объёмней при практически равных энергетических показателях.

3. Сравнение стоимостей потерь активной энергии за год рассматриваемых РЭП позволило сделать вывод, что РЭП с трехфазным АД имеет несколько лучшие показатели относительно других рассматриваемых вариантов.

4. Результаты моделирования динамических зависимостей потребляемого тока, виброскорости и шума электромагнитного происхождения подтверждают закономерности, выявленные в статических режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дацковский Л.Х., Роговой В.И. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе // *Электротехника*. – 1996. – №10. – С. 20-24.
2. Соустин Б.П. Многофазный инверторный асинхронный электропривод // *Наука производству*. – 2000. – №3. – С. 10-16.
3. Сидельников Б.В. Шестифазные частотно-регулируемые асинхронные двигатели большой мощности // *Известия РАН. Энергетика*. – 2000. – №3. – С. 31-38.
4. Мустафа Т.М., Волков С.В., Ершов А.М., Сенцов Ю.М., Минаев Г.М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя // *Электротехника*. – 2014. – №1. – С. 46-54.
5. Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики // *Электротехника*. – 2000. – №6. – С. 28-31.
6. Голубев А.Н., Зыков В.В. Математическая модель асинхронного двигателя с многофазными обмотками статора и ротора // *Электротехника*. – 2003. – №7. – С. 35-40.
7. Петрушин В.С. Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2001. – №1(13). – С. 81-86.
8. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // *Электромашинобудовання та електрообладнання*. – 2001. – №56. – С. 51-54.
9. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
10. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы П.А.№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

REFERENCES

1. Datskovskii L.X., Rogovoi V.I. Current status and trends in asynchronous variable frequency drives. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1996, no.10, pp. 20-24. (Rus).
2. Soustin B.P. Single-phase inverter asynchronous electric. *Nauka proizvodstva – Science production*, 2000, no.3, pp. 10-16. (Rus).
3. Sidelnikov B.V. Six-phase variable-frequency high power asynchronous motors. *Izvestiya RAN. Energetika – News Russian Academy of Sciences. Energetics*, 2000, no.3, pp. 31-38. (Rus).
4. Mustafa T.M., Volkov S.V., Ershov A.M., Sentsov Yu.M., Minaev G.M. Frequency converter for the propeller motor. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2014, no.1, pp. 46-54. (Rus).
5. Golubev A.N., Ignatenko C.B. Influence of the number of phases of the stator winding of the induction motor on its vibration characteristics. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2000, no.1, pp. 28-31. (Rus).
6. Golubev A.N., Zykov V.V. A mathematical model of a multi-phase induction motor stator and rotor windings. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2003, no.7, pp. 35-40. (Rus).
7. Petrushin V.S. Range of optimality criteria for the design of controlled asynchronous motors. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2001, no.1(13), pp. 81-86. (Rus).
8. Petrushin V.S. These costs asynchronous motors in the drive frequency for different control laws. *Elektromashinostoenie i*

elektrooborudovanie – Electrical Engineering and Electric Equipment, 2001, no.56, pp. 51-54. (Rus).

9. Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: Uchebnoe posobie* [Induction motors in adjustable electric: Textbook]. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 320 p. (Rus).
10. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. *Programmnyi produkt «DIMASDrive»*. *Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknutykh dvigatelej sistem reguliruemogo elektroprivoda* [Program performance analysis, selection and design of asynchronous cage motors controlled drive systems]. Patent UA, no.4065. (Ukr).

Поступила (received) 27.11.2015

Петрушин Виктор Сергеевич¹, д.т.н., проф.,

Беликова Людмила Яковлевна¹, к.т.н., доц.,

Плоткин Юрий Романович², к.т.н., проф.,

Еноктаев Ростислав Николаевич¹, аспирант,

¹Одесский национальный политехнический университет,

65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,

тел/phone +380 048 7058494,

e-mail: victor_petrushin@ukr.net, Conda@ukr.net,

rostik-enok@inbox.ru

²HWR Berlin,

Alt Friedrichsfelde 60, 10315 Berlin, Germany,

тел/phone +49 (0)30 30877-2443,

e-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

V.S. Petrushin¹, L.Y. Bielikova¹, Y.R. Plotkin², R.N. Yenoktaev¹

¹Odessa National Polytechnic University,

1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

²HWR Berlin,

Alt Friedrichsfelde 60, 10315 Berlin, Germany.

Comparison of adjustable high-phase order induction motors' merits.

Purpose. Development of mathematical models of adjustable electrical drives with high-phase order induction motors for their merits analysis at static and dynamical modes. **Methodology.** At the mathematical modeling main kinds of physical processes taking place in the high-phase order induction motors are considered: electromagnetic, electromechanical, energetic, thermal, mechanical, vibroacoustic ones. Besides, functional as well as mass, frame and value indicators of frequency converters are taking into account which permits to consider technical and economical aspects of the adjustable induction electrical drives. Creation of high-phase order induction motors' modifications in possible on the base of a stock 3-phase motors of basic design. Polyphase supply of induction motors is guaranteed by a number of the adjustable electrical drives' power circuits. **Results.** Modeling of a number of adjustable electrical drives with induction motors of different phase number working on the same load by its character, value and required adjustment range is carried out. At the utilization of the family of characteristics including mechanical ones at different adjustment parameters on which loading mechanism's characteristics are superimposed regulation curves representing dependences of electrical, energetic, thermal, mechanical, vibroacoustic quantities on the motors' number of revolutions are obtained. **Originality.** The proposed complex models of adjustable electrical drives with high-phase order induction motors give a possibility to carry out the grounded choice of the drive's acceptable variant. Besides, they can be used as design models at the development of adjustable high-phase order induction motors. **Practical value.** The investigated change of vibroacoustic indicators at static and dynamical modes has been determined decrease of these indicators in the drives with number of phase exceeding 3. References 10, tables 2, figures 4.

Key words: adjustable high-order induction motor, semiconductor frequency converter, mathematical modelling, regulation curves, stator winding, vibroacoustic indicators.

Є.І. Сокол, М.М. Резинкіна, О.В. Сосіна, О.Г. Гриб

ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ПРИ НАЯВНОСТІ КРИВОЛІНІЙНОЇ ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ МІЖ ПРОВІДНИМ ТА НЕПРОВІДНИМ СЕРЕДОВИЩАМИ

Описаны принципы учета криволинейных границ раздела при использовании метода конечных объемов для расчета усиления электрического поля на вершинах проводящих стержней. С помощью проведенных расчетов получена зависимость максимальной напряженности электрического поля от высоты и радиуса скругления вершин стержней. В результате аппроксимации данной зависимости полиномом записано аналитическое выражение для напряженности внешнего электрического поля, при приложении которого к проводящему объекту определенной высоты и радиуса скругления вершины на нем развивается коронный разряд. Бібл. 13, рис. 4.

Ключевые слова: скругленные вершины, криволинейные границы, метод конечных объемов, расчетная сетка, напряженность электрического поля.

Описано принципы учета криволинейных границ раздела при использовании метода конечных объемов для расчета усиления электрического поля на вершинах проводящих стержней. За допомогою проведених розрахунків отримана залежність максимальної напруженості електричного поля від висоти та радіуса округлення вершин стержнів. У результаті апроксимації даної залежності поліномом записано аналітичний вираз для напруженості зовнішнього електричного поля, при прикладенні якого до провідного об'єкта певної висоти і радіуса округлення вершини на ньому розвивається коронний розряд. Бібл. 13, рис. 4.

Ключові слова: округлені вершини, криволінійні границі, метод скінченних об'ємів, розрахункова сітка, напруженість електричного поля.

Введення. У ряді практично важливих випадків необхідна інформація про характер розподілу та рівні максимальної напруженості електричного поля (ЕП) в околиці вершин провідних стрижнів. Застосування систем, що містять провідні стрижні, є одним з можливих способів практичної реалізації метаматеріалів, що знаходять широке розповсюдження останнім часом [1]. Системи «стрижень – площа» використовують у високовольтній імпульсній техніці для ініціації розрядів у різних середовищах [2]. До цієї ж категорії об'єктів відносяться елементи електроенергетичних об'єктів, що можуть бути змодельовані стрижнями з вершинами різної форми. Зокрема, необхідна інформація про напруженості зовнішнього електричного поля, за умови прикладення яких виникають коронні розряди.

Як правило, вершини використовуваних у техніці стрижнів є округленими. При розрахунку ЕП у таких системах виникає проблема урахування кривизни поверхні вершин стрижнів. Застосування в цьому випадку методу скінченних елементів не вирішує повною мірою проблему, оскільки елементи, що використовуються (наприклад, трикутники) мають кути, а, значить, при розрахунку напруженості ЕП на них буде завищеною в порівнянні з реальними значеннями. Враховуючи, що основна частина стрижня є прямолінійною, для розрахунку доцільно застосовувати скінченно-різницеви методи [3]. Однак відомо, що використання прямокутної розрахункової сітки для опису ЕП у системах з криволінійними поверхнями призводить до істотного збільшення розрахованих рівнів напруженості ЕП, що не має місця в дійсності [4]. Причому, подрібнення розрахункової сітки тільки погіршує ситуацію. Для того щоб вирішити дану проблему, застосовуються різні прийоми, наприклад, представлення похідних у вигляді поліномів, а не кінцевих різниць [5]. Однак такий підхід пов'язаний з ускладненням задачі, то ж втрачаються переваги скінченно-різницеви методів: простота і можливість врахування нелінійних параметрів

середовищ. Для розрахунку електромагнітних полів у подібних системах застосовуються також так звані конформальні схеми, що передбачають усереднення матеріальних параметрів середовищ по об'ємам осередків, розташованих на криволінійних межах їх розділу [6]. Використання даного підходу для середовищ, матеріальні параметри яких відрізняються не більш ніж в 5-10 разів, дає досить добрі результати [6-8]. Якщо ж дані величини відрізняються на кілька порядків (наприклад, при розташуванні провідного стрижня в повітрі), то, як буде показано нижче, використання даного методу виявляється неефективним.

Метою роботи є розробка спрощеного методу врахування криволінійних границь розділу між провідним та непровідним середовищами при використанні прямокутних розрахункових сіток щодо розрахунку електромагнітних полів у відповідних системах та використання даного методу для оцінки того, яким радіусом слід округляти гострі кромки на об'єктах, що знаходяться в зоні дії електричних полів, для того, щоб на них не виникали коронні розряди.

Моделювання електричних полів при наявності криволінійних границь розділу. Будемо розглядати випадки, коли відстані, на яких змінюється ЕП, істотно перевищують характерні розміри розглядуваних об'єктів, тому розрахунок може бути виконаний у квазістаціонарному наближенні. Рівняння, що описує розподіл ЕП, отримано в такий спосіб. Запишемо рівняння Максвелла у вигляді [9]:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

де $\vec{H}$, $\vec{E}$ – напруженості магнітного та електричного полів відповідно; $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$; $\epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м; ϵ – відносна діелектрична проникність; γ – питома електропровідність.

© Є.І. Сокол, М.М. Резинкіна, О.В. Сосіна, О.Г. Гриб

Будемо використовувати для чисельного розрахунку метод скінченних об'ємів, при використанні якого на розглядану область наноситься прямокутна розрахункова сітка, а розв'язуване різницеве рівняння одержують за допомогою законів збереження. Для цього візьмемо дивергенцію від обох частин (1), урахувавши, що в сталому режимі другий доданок у правій частині близький до нуля. Потім проінтегруємо отримане рівняння по об'ємах елементарних осередків, на які розбита розрахункова область, і використаємо підстановку $\vec{E} = -\text{grad } \phi$ (де ϕ – електричний потенціал). Остаточно одержимо:

$$\oint_S -\frac{\partial \phi}{\partial n} \cdot \gamma ds = 0, \quad (2)$$

де S – сторони паралелепіпеда, які ділять навпіл відстані між сусідніми вузлами; n – напрямок нормалі до контуру інтегрування.

Зупинимось докладніше на розрахунку ЕП біля округлених вершин стрижнів. При використанні методу скінченних об'ємів вузли, у яких розраховуються значення потенціалів, слід розташовувати на межах розділу середовищ [8]. Це дозволяє врахувати граничні умови автоматично, не задаючи їх окремими рівняннями.

Пропонується використовувати такий підхід до одержання рішень для напруженостей ЕП біля криволінійних поверхонь розділу середовищ. Врахуємо, що розглянута система містить провідне (стрижень) і непровідне (повітря) середовища. Причому, для квазі-стаціонарного випадку потенціал провідного об'єкта можна вважати постійним. Будемо розглядати тривимірні об'єкти. Спочатку розглянемо випадок прямолінійної границі розділу середовищ (див. рис. 1,а).

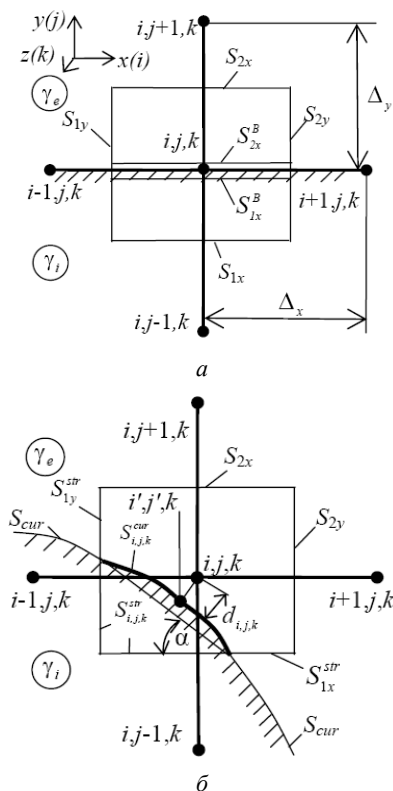


Рис. 1. Перетин осередку розрахункової схеми площиною $Z=\text{const}$ у випадку прямолінійної (а) і криволінійної (б) границі розділу середовищ

Перетин $Z = \text{const}$ замкнутого контуру площиною S , по якому здійснюється інтегрування розв'язуваного рівняння (2), може бути представлений у виді чотирьох площин, перпендикулярних компонентам напруженості ЕП: S_{1x} і S_{2x} – у напрямку, паралельному осі Ox , а також S_{1y} і S_{2y} – у напрямку, паралельному осі Oy .

Це можливо, оскільки інтегрування (2) по поверхнях S_{1x}^B і S_{2x}^B , які розташовані впритул до границі розділу середовищ по обидві сторони від неї, у цьому випадку може бути замінено інтегруванням по S_{1x} і S_{2x} .

Така заміна можлива, бо площини, по яких відбувається інтегрування, рівні між собою: $S_{1x}^B = S_{1x} = S_{2x}^B = S_{2x} = \Delta_x$ (де Δ_x – крок по простору у напрямку осі Ox), а різницеві аналоги y - x компонент напруженостей ЕП по обидві сторони від границі розділу: $Ey_{ij,k}^+$ і $Ey_{ij,k}^-$ визначаються подібними виразами: як похідні кроком назад або кроком уперед при інтегруванні по S_{1x}^B і S_{2x}^B або як центральні похідні при інтегруванні по S_{1x} і S_{2x} :

$$Ey_{ij,k}^+ = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \approx -\frac{\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta_y},$$

$$Ey_{ij,k}^- = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \approx -\frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j-1,k}}{\Delta_y}, \quad (3)$$

де $\phi_{i,j,k}$ – потенціал вузла (i, j, k) ; Δ_y – крок по простору в напрямку осі Oy .

Запишемо (2) у різницевій формі як суму інтегралів по площинам, перпендикулярних осям Ox і Oy , урахувавши, що $\gamma_e \ll \gamma_i$, а значить $\gamma_i + \gamma_e \approx \gamma_i$ (де γ_i, γ_e – електропровідність провідного і непровідного середовищ відповідно):

$$\oint_S -\frac{\partial \phi}{\partial n} \cdot \gamma ds \approx (F_{y2} - F_{y1}) + (F_{x2} - F_{x1}), \quad (4)$$

$$\text{де } F_{y1} = -\gamma_i \cdot \frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i,j-1,k}}{\Delta_y} \cdot S_{1y}; \quad (5)$$

$$F_{y2} = -\gamma_e \cdot \frac{\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta_y} \cdot S_{2y}; \quad (6)$$

$$F_{x1} \approx -0.5 \cdot \gamma_i \cdot \frac{\phi_{i,j,k} - \phi_{i-1,j,k}}{\Delta_x} \cdot S_{1x}; \quad (7)$$

$$F_{x2} \approx -0.5 \cdot \gamma_i \cdot \frac{\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta_x} \cdot S_{2x}. \quad (8)$$

Розглянемо тепер (i,j,k) -ий осередок розрахункової системи, для якого S -контур інтегрування (2), включає ділянку $S_{ij,k}^{cur}$ криволінійної границі розділу S^{cur} (див. рис. 1,б). Для того щоб врахувати наявність цієї ділянки при написанні різницевої схеми, будемо вважати, що $S_{ij,k}^{cur}$ доповнює S до замкнутого контуру замість прямолінійної ділянки $S_{ij,k}^{str}$, що проходить усередині провідного середовища. Як відзначалося вище, при прийнятих припущеннях потенціал усього

провідного об'єкта (стрижня) однаковий: позначимо його U_0 . Причому, значення потенціалів у вузлах, розташованих усередині провідного середовища, отримуються з рішення автоматично при заданні рівня потенціалу $\Phi = U_0$ на відповідній ділянці зовнішньої границі розрахункової області. Позначимо через En напруженість ЕП біля поверхні стрижня, спрямовану перпендикулярно до цієї поверхні. Оскільки потенціали всіх вузлів, розташованих усередині та на поверхні провідного середовища однакові, будемо вважати, що при визначенні En у вигляді різниці потенціалів замість вузлів, що знаходяться всередині провідного середовища (у нашому випадку $(i-1,j,k)$ і $(i,j-1,k)$ – див. рис. 1,б), може бути використаний вузол (i',j',k') , розташований на поверхні розділу середовищ у місці дотику перпендикуляра до цієї поверхні з вузла (i,j,k) :

$$En_{i,j,k} = -\frac{\partial\Phi}{\partial n} \approx -\frac{\Phi_{i,j,k} - \Phi_{i',j',k'}}{d_{i,j,k}} = -\frac{\Phi_{i,j,k} - U_0}{d_{i,j,k}}, \quad (9)$$

де $d_{i,j,k}$ – відстань від вузла (i,j,k) до криволінійної поверхні розділу.

Вважаючи, що кривизна в напрямку осі Oz невелика, розкладемо En на x і y компоненти, вважаючи, що ділянка $S_{i,j,k}^{cur}$ нахилена до горизонталі під кутом α (див. рис. 1,б):

$$\begin{aligned} -\frac{\partial\Phi}{\partial x} &= E_x \approx En \cdot \sin\alpha, \\ -\frac{\partial\Phi}{\partial y} &= E_y \approx En \cdot \cos\alpha. \end{aligned} \quad (10)$$

Тоді доданки F_{x1} і F_{y1} в (4), для яких контур інтегрування рівняння (2) включає, у тому числі, криволінійні площини границі розділу, запишемо так:

$$F_{x1} \approx -\gamma_e \cdot \frac{\Phi_{i,j,k} - U_0}{d_{i,j,k}} \cdot \left\{ \sin\alpha \cdot S_{1y}^{str} \cdot [k_x + (1-k_x)] + k_x \cdot S_{i,j,k}^{cur} \right\}, \quad (11)$$

$$F_{y1} \approx -\gamma_e \cdot \frac{\Phi_{i,j,k} - U_0}{d_{i,j,k}} \cdot \left\{ \cos\alpha \cdot S_{1x}^{str} \cdot [k_y + (1-k_y)] + k_y \cdot S_{i,j,k}^{cur} \right\}, \quad (12)$$

де $k_x = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \alpha < \pi/4 \\ 1, & \text{якщо } \alpha > \pi/4 \end{cases}; k_y = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \alpha > \pi/4 \\ 1, & \text{якщо } \alpha < \pi/4 \end{cases};$

$S_{1x}^{str}, S_{1y}^{str}$ – площі прямолінійних ділянок контуру інтегрування S ; $S_{i,j,k}^{cur}$ – площа криволінійної ділянки S (див. рис. 1,б).

При написанні (11), (12) використовувався спрощений підхід, коли припускається, що при $\alpha > \pi/4$ ділянка $S_{i,j,k}^{cur}$ разом з ділянкою S_{1y} або S_{2x} (у нашому випадку це ділянка S_{1y}^{str}) доповнює частину контуру інтегрування, паралельну осі Oy . Якщо ж $\alpha < \pi/4$, то крива $S_{i,j,k}^{cur}$ вважається частиною контуру інтегрування, що доповнює разом з ділянкою S_{1x} або S_{2x} (у нашій випадку це відрізок S_{1x}^{str}) частину контуру інтегрування, паралельного осі Ox . Для розглянутого осередку (див. рис. 1,б) доданки F_{y2} і F_{x2} в (4) визначаються виразами (6) і (8), оскільки при їхньому отриманні криволінійні ділянки в контур інтегрування не входили. Знаходження довжини криволінійної ділянки $S_{i,j,k}^{cur}$, прямолінійних відрізків $S_{1x}^{str}, S_{1y}^{str}$, а також $d_{i,j,k}$

не представляє істотних труднощів і може бути виконано, наприклад, чисельно в результаті більш дрібної розбивки осередків, що лежать на границях розділу. Причому, завдяки запропонованому підходу, приграничні осередки, розташовані усередині провідного середовища, віртуально переміщуються на її поверхню при визначенні ЕП у непровідному середовищі. Таке «переміщення» не впливає на визначення ЕП всередині провідного середовища, оскільки його потенціал постійний.

Як правило, при використанні скінченно-різницевого методу криволінійна границя розділу середовищ заміняється ступінчастою апроксимуючою поверхнею [6]. Однак, це обумовлює появу при розрахунку локальних зон з підвищеною напруженістю ЕП, які в дійсності не мають місця [4]. Причому, рівні напруженості ЕП у зонах, що прилягають до кутів апроксимуючих криволінійну поверхню прямокутних осередків, будуть тим більше, чим менше крок просторової розрахункової сітки. Запропонований метод дозволив уникнути даної проблеми. На рис. 2 показані розраховані за допомогою описаного підходу розподіли напруженості ЕП на поверхні провідної сфери, що знаходиться в однорідному ЕП (див. пунктирну криву 2).

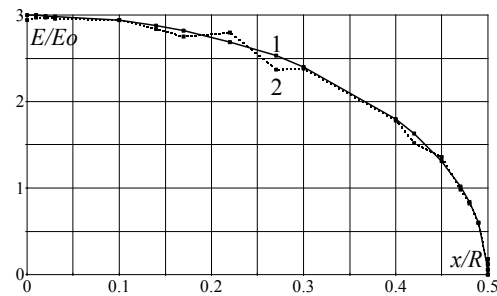


Рис. 2. Розраховані розподіли напруженості ЕП на поверхні провідної сфери радіусом R , що знаходиться в однорідному зовнішньому ЕП напруженістю E_0 : 1 – аналітичне рішення, 2 – рішення за допомогою запропонованого методу

Розрахунок проводився при кроці сітки $\Delta = 0.02 \cdot R$ (де R – радіус сфери). Рівні модуля напруженості ЕП в (i,j,k) -му вузлі визначалися за розрахованими потенціалами у вузлах сітки як усереднені значення по об'єму осередку:

$$|\vec{E}| = \sqrt{Ex_{i,j,k}^2 + Ey_{i,j,k}^2 + Ez_{i,j,k}^2}, \quad (13)$$

$$\text{де } Ex_{i,j,k} \approx -0.5 \cdot \left(\frac{\Phi_{i+1,j,k} - \Phi_{i,j,k}}{\Delta_x} + \frac{\Phi_{i,j,k} - \Phi_{i-1,j,k}}{\Delta_x} \right);$$

$$Ey_{i,j,k} \approx -0.5 \cdot \left(\frac{\Phi_{i,j+1,k} - \Phi_{i,j,k}}{\Delta_y} + \frac{\Phi_{i,j,k} - \Phi_{i,j-1,k}}{\Delta_y} \right)$$

$$Ez_{i,j,k} \approx -0.5 \cdot \left(\frac{\Phi_{i,j,k+1} - \Phi_{i,j,k}}{\Delta_z} + \frac{\Phi_{i,j,k} - \Phi_{i,j,k-1}}{\Delta_z} \right).$$

Для порівняння на тому ж рисунку (див. криву 1) показане аналітичне рішення для провідної сфери в однорідному зовнішньому ЕП [10]. Як видно з порівняння кривих 1 і 2, відносні відмінності рівнів напруженості ЕП для цих двох випадків досить невеликі: вони не перевищують 3%. Як показали розрахунки

з тим же кроком по простору, при ступінчастій апроксимації границі розділу середовищ відносні відмінності досягають майже 30 %.

Як відзначалося вище, для усунення даної проблеми застосовується ряд прийомів [4-6]. Всі вони є досить громіздкими, що істотно ускладнює їхню практичну реалізацію, на відміну від описаного підходу, не пов'язаного із введенням неортогональної сітки або підвищенням порядку апроксимації похідних.

Таким чином, застосування запропонованого підходу дозволяє врахувати як площу криволінійних ділянок границі розділу, так і відстані між розташованими в непровідному середовищі приграничними вузлами розрахункової сітки та границею розділу. Це можливо в результаті використання для отримання розв'язуваних рівнянь закону збереження (у нашому випадку заряду) за допомогою інтегрування вихідних диференціальних рівнянь по контурах осередків розрахункової схеми з урахуванням конфігурації границі розділу усередині кожного осередку.

Як показали проведені розрахунки, значення напруженості ЕП, отримані при використанні конформальної схеми [6], повністю збігаються з даними, отриманими при використанні ступінчастої апроксимації. Це пояснюється тим, що при настільки великій різниці між величинами питомої електропровідності провідного та непровідного середовищ (більше ніж на 5-6 порядків) зменшення в кілька разів еквівалентної електропровідності розташованих на границі розділу осередків, що містять провідне і непровідне середовище, практично не оказує впливу на розраховані рівні потенціалів.

Розрахунок ЕП в околиці провідного циліндричного стрижня. Описані вище підходи дозволяють виконати розрахунок електричного поля в околиці провідного циліндричного стрижня, що знаходиться в зовнішньому вертикально спрямованому ЕП напруженістю E_0 . Розрахункова система, яка містить провідний циліндричний стрижень із округленою вершиною 1, представлена на рис. 3.

Аналітичні рішення для напруженості ЕП у системах, що містять циліндричні стрижні з округленими вершинами, відсутні. Для знаходження розподілу ЕП використовуємо чисельний метод скінчених об'ємів [11] та запропонований вище підхід. Враховуючи осьову симетрію розглянутої системи, була використана циліндрична система координат. При цьому вважається, що вісь Oz збігається з віссю стрижня 1 і перпендикулярна поверхні землі 2 (див. рис. 3). Вважається також, що розрахункова область обмежена прямокутником зі сторонами $z = 0$, $z = Z_{\max}$, $r = R_{\max}$, $r = 0$ (див. рис. 3) і розбита на елементарні прямокутні осередки.

Для того щоб зменшити розрахункову область, на її межах уведено так звані добре погоджені шари (PML) [6] (див. 3, 4 на рис. 3). Дані шари виконують допоміжну функцію і потрібні для забезпечення швидкого та безвідбивного спадання збурювання ЕП, викликаного наявністю досліджуваних об'єктів, при наближенні до границь розрахункової області.

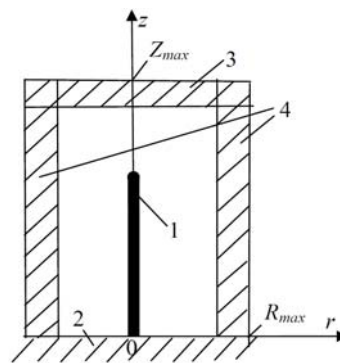


Рис. 3. Перетин $z = 0$ досліджуваної розрахункової системи, що містить провідний стрижень. 1 – стрижень; 2 – земля; 3, 4 – PML

Розподіл ЕП в PML не враховується в результатах розрахунку. Вважається, що електропровідність у такому шарі товщиною d є тензором, має різні значення в напрямках координатних осей Or , Oz і змінюється по глибині шару відповідно до поліноміального закону. Так, для PML, що перпендикулярний осі Or (див. 4 рис. 3), зміна r -ой – $\gamma_r^{PML}(r)$ і z -ой – $\gamma_z^{PML}(r)$ компонентів тензора електропровідності в напрямку осі Or записується у вигляді [6]:

$$\gamma_r^{PML}(r) = \gamma_0 \cdot k_r(r), \quad \gamma_z^{PML}(r) = \gamma_0 / k_r(r),$$

де $k_r(r) = 1 + (k_{\max} - 1) \cdot (r/d)^m$; $k_{\max}$ – максимальна величина k_r на зовнішній границі PML-шару; m – показник ступеня; γ_0 – значення електропровідності середовища, суміжного із внутрішньою границею PML.

Значення компонентів тензора електропровідності в PML, перпендикулярному осі Oz (див. 3 рис. 3), мають вид:

$$\gamma_z^{PML}(z) = \gamma_0 \cdot k_z(z), \quad \gamma_r^{PML}(z) = \gamma_0 / k_z(z),$$

де $k_z(z) = 1 + (k_{\max} - 1) \cdot (z/d)^m$.

Величини електропровідностей у зонах перетинання PML-шарів знаходять шляхом перемноження відповідних компонентів у кожному із шарів.

Умови на границях розрахункової області (див. рис. 3) вважалися таким: $\varphi=0$ на поверхні землі ($z=0$); $\partial\varphi/\partial n = 0$: при $R=0$ та при $r=R_{\max}$ (на зовнішній границі розрахункової області). Для того, щоб врахувати, що на верхній границі розрахункової області за PML-шаром напруженість прикладеного ЕП дорівнює E_0 , при $z=Z_{\max}$ використовувалася умова $\partial\varphi/\partial n = k_{\max} \cdot E_0$ (докладніше див. [8]).

Порівняння з аналітичним рішенням для сфери в однорідному ЕП показало, що при використанні десяти слоїв PML, що мають параметри $m=5$, $k_{\max} = 500 \cdot \gamma_0$, забезпечується відносна похибка розрахунку напруженостей і потенціалів ЕП не більше 3 %.

Вплив геометрії стрижнів з округленими вершинами на рівні максимальної напруженості ЕП. Для того щоб оцінити як впливає висота стрижнів на можливість розвитку від них коронного розряду, були розраховані розподіли ЕП при різній висоті стрижнів.

Попередньо були проведені розрахунки при послідовному збільшенні габаритів обмеженої PML розрахункової області в напрямках координатних осей, а також при зменшенні кроку розрахункової сітки. Вважалось, що рішення адекватно описує розподіл

ЕП, коли значення напруженостей і потенціалів переставали мінятися при послідовному дворазовому зменшенні кроку розрахункової сітки та збільшенні її габаритів. З аналізу отриманих даних були зроблені такі висновки: для того, щоб відносна похибка не перевищувала 3 %, розміри розрахункової області в радіальному напрямку повинні бути не менше, ніж висота стрижня (H), а у вертикальному – в 1.2 рази перевищувати H ; крок розрахункової сітки повинен бути не більше, ніж $R/10$ (де R – радіус округлення стрижня).

Розглянуто випадок, коли можна вважати, що до стрижня прикладене рівномірне ЕП. Згідно літературним даним (див. наприклад [12, с. 188 і далі]) при розрядах у системах «стрижень – площа» існує так званий критичний радіус стрижня. Він визначається з умови ідентичності характеру пробного в системах зі стрижнями, радіус яких менше критичного радіуса: $R \leq R_{cr}$, оскільки при виконанні даної умови пробивна напруга не залежить від величини R через наявність корони. Розглянуто випадок, коли величина радіуса стрижня дорівнює критичному радіусу – $R = R_{cr} = 0.1$ м [12].

На рис. 4 показані результати чисельного розрахунку залежності E_{max} – максимальних рівнів напруженості ЕП в околиці вершин провідних стрижнів, що знаходяться у зовнішньому однорідному полі напруженості E_0 (див. криву 1), від їхньої висоти H . Розрахунок проводився при таких параметрах розрахункової сітки: $\Delta_r = \Delta_z = R/10$, $Z_{max} = 1.2 \cdot H$, $R_{max} = H$, $H = var$.

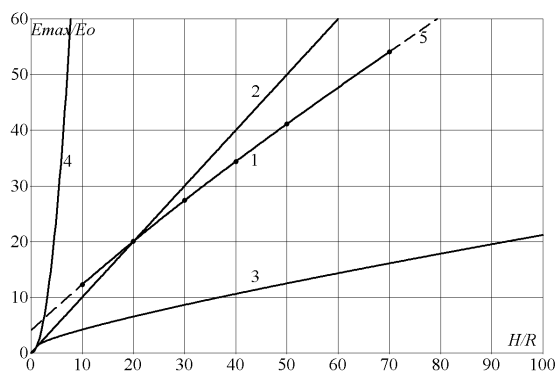


Рис. 4. Залежності максимальної напруженості ЕП в околиці провідного стрижня від його висоти H : 1 – чисельний розрахунок за допомогою описаного підходу; 2 – залежності $E_{max} = E_0 H/R$; 3, 4 – аналітичні рішення для витягнутого провідного еліпсоїда при відстані від вершини $l=0$ (3) і $l=R=0,1$ м (4); 5 – поліноміальна апроксимація кривої 1

На рис. 4 наведені також результати інженерних оцінок для E_{max} (криві 2 – 4). Крива 2 відповідає оцінці E_{max} у вигляді відношення потенціалу ЕП на висоті вершини заземленого стрижня до його радіуса (R):

$$E_{max} = E_0 \cdot H / R.$$

Криві 3 і 4 отримані в результаті використання аналітичного виразу для напруженості ЕП над еліпсоїдом на його осі (див. наприклад [13]) при відстані від його вершини $\Delta = R_{cr}$ (крива 3) і $\Delta = 0$ (крива 4). Як видно з порівняння кривих 1 – 4, значення $E_{max}^* = E_{max}/E_0$, отримані з урахуванням реальної форми стрижня (циліндр, вершина якого округлена),

займають проміжне положення відносно найменших рівнів (крива 3), які відповідають відстані від стрижня, рівної критичному радіусу R_{cr} , і найбільших рівнів, які відповідають точці на вершині еквівалентного еліпсоїда (крива 4). На рис. 4 крива 5, показана пунктиром, відповідає апроксимації кривої 1 поліномом.

Для діапазону зміни співвідношення висоти стрижня (H) до радіусу округлення його вершини (R) в межах: $10 < H/R < 70$ розрахована крива залежності $E^*(H/R)$ може бути апроксимована більш простою функцією, з якої для об'єкту, що знаходиться в зоні дії електричного поля напруженістю E_0 [В/м], можна знайти граничне значення для відношення радіусу округлення його вершини до його висоти, дотримання якого забезпечує пригнічення корони на даному об'єкті:

$$R/H > 0.7 / (3 \cdot 10^6 / E_0 - 6.08).$$

Висновки.

1. Запропонований метод урахування криволінійної границі розділу середовищ, заснований на використанні методу скінчених об'ємів, дозволяє розрахувати розподіл електричного поля на поверхні сфери та в її околиці з відносною похибкою, що не перевищує 3 %, при кроці розрахункової сітки не більшому, ніж $0.1 \cdot R$ (де R – радіус сфери).

2. За допомогою запропонованого методу врахування криволінійної границі розділу середовищ розраховані залежності максимальної напруженості електричного поля на вершинах стрижнів від співвідношення між їх діаметром та висотою.

3. Отримано вираз для оцінки того, яким радіусом слід округляти гострі кромки на об'єктах висотою H , що знаходяться в зоні дії ЕП напруженістю E_0 , для того, щоб на них не виникали коронні розряди.

4. Показано, що використання аналітичних рішень для провідного витягнутого еліпсоїда приводить до істотної похибки при знаходженні рівнів максимальної напруженості поблизу вершин стрижнів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Toal B., McMillen M., Murphy A., Atkinson R., Pollard R. Tuneable magneto-optical metamaterials based on photonic resonances in nickel nanorod arrays // Materials Research Express. – 2014. – №1. – pp. 1-11. doi: 10.1088/2053-1591/1/1/015801.
2. Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. – Новосибирск: Наука, 1988. – 165 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с.
4. Popov E., Nevière M., Gralak B., Tayeb G. Staircase approximation validity for arbitrary-shaped gratings // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – vol.19. – №1. – pp. 33-42. doi: 10.1364/josaa.19.000033.
5. Gjona E., Lau T., Schnepf S., Wolfheimer F., Weiland T. Accurate modeling of charged particle beams in linear accelerators // New Journal of Physics. – 2006. – №8. – pp. 1-21. doi: 10.1088/1367-2630/8/11/285.
6. Taflov A., Hagness S. Computational electromagnetics: the finite difference time domain method. Boston – London: Artech House, 2000. – 852 p.
7. Резинкина М.М. Расчет проникновения низкочастотного трехмерного электрического поля в неоднородные слабопроводящие объекты // Электричество. – 2003. – №8. – С. 50-55.
8. Резинкина М.М. Численный расчет магнитного поля и магнитного момента ферромагнитных тел сложной

пространственной конфигурации // Журнал технической физики. – 2009. – Т.79. – №8. – С. 8-17.

9. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989. – 504 с.

10. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1948. – 539 с.

11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.

12. Cooray V. Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. – 1036 p.

13. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

REFERENCES

1. Toal B., McMillen M., Murphy A., Atkinson R., Pollard R. Tuneable magneto-optical metamaterials based on photonic resonances in nickel nanorod arrays. *Materials Research Express*, 2014, no.1, pp. 1-11. doi: 10.1088/2053-1591/1/1/015801.
2. Bazelian E.M., Razhanskii I.M. *Iskrovoi razriad v vozdukh* [Spark discharge in air]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 165 p. (Rus).
3. Samarskii A.A. *Teoriia raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 616 p. (Rus)
4. Popov E., Nevière M., Gralak B., Tayeb G. Staircase approximation validity for arbitrary-shaped gratings. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, vol.19, no.1, pp. 33-42. doi: 10.1364/josaa.19.000033.
5. Gjonaj E., Lau T., Schnepf S., Wolfheimer F., Weiland T. Accurate modeling of charged particle beams in linear accelerators. *New Journal of Physics*, 2006, no.8, pp. 1-21. doi: 10.1088/1367-2630/8/11/285.
6. Taflov A., Hagness S. *Computational electromagnetics: the finite difference time domain method*. Boston – London: Artech House, 2000. – 852 p.
7. Rezinkina M.M. The calculation of the penetration of a low-frequency three-dimensional electric field into heterogeneous weakly conducting objects. *Elektrichestvo – Electricity*, 2003, no.8, pp. 50-55. (Rus).
8. Rezinkina M.M. Numerical calculation of the magnetic field and magnetic moment of ferromagnetic bodies with a complex spatial configuration. *Technical Physics*, 2009, vol.54, no.8, pp. 1092-1101. doi: 10.1134/S1063784209080027.
9. Тамм И.Е. *Osnovy teorii elektrichestva* [Bases of the theory of electricity]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 504 p. (Rus).
10. Stretton Dzh.A. *Teoriia elektromagnetizma* [Theory of electromagnetism]. M.-L.: OGIЗ, Gostekhizdat Publ., 1948. 539 p. (Rus).
11. Patankar S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods of solution of problems of heat exchange and dynamics of liquid]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 150 p. (Rus).
12. Cooray V. *Lightning Protection*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036p.
13. Kuchinskii G.S., Kizevetter V.E., Pintal' Yu.S. *Izoliatsiia ustanovok vysokogo napriazheniia* [Isolation of installations of high tension]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 368 p. (Rus).

Поступила (received) 29.10.2015

Сокол Євген Іванович¹, д.т.н., проф., член-кор. НАНУ,
 Резинкіна Марина Михайлівна², д.т.н.,
 Сосіна Олена Володимирівна¹, аспірант,
 Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,
¹Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
 e-mail: elenasosina09@gmail.com
²Державна установа «Інститут технічних проблем
 магнетизму Національної академії наук України»,
 61106, Харків, вул. Індустріальна, 19,
 e-mail: marinar2@mail.ru

E.I. Sokol¹, M.M. Rezinkina², E.V. Sosina¹, O.G. Gryb¹

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

²State Institution «Institute of Technical Problems
 of Magnetism of the NAS of Ukraine»,
 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

Numerical computation of electric fields in presence of curvilinear interface between conductive and non-conductive media.

Purpose. To elaborate a method of electric field numerical calculation in systems with curved boundaries between conductive and non-conductive mediums at final volume method usage and application of the rectangular grids. **Methodology.** At electric field calculation in quasi-stationary approximation, potential of the whole conductive object (rod) is constant. At final difference scheme writing, presence of the curved part of the boundary between conducting and non-conducting media has been taking into account as follows. It was supposed that curved section complements the closed loop on which integration of the solvable equation is done instead of a straight section which extends within a conducting medium. Usage of this approach allows taking into account square of the curved sections of the boundary and distance between surface of non-conductive medium and nearest nodes of the computational grid. **Results.** Dependence of the maximum electric field intensity on the height and radius of curvature peaks rods has been got with the help of calculations. As a result, a polynomial approximation for the analytical expression of the external electric field intensity, upon which application to the conductive object of a certain height and radius of curvature of its top, corona discharges will develop. References 13, figures 4.

Key words: rounded tops, curvilinear borders, finite volume method, calculated grid, electric field intensity.

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НОРМИРОВАННОГО ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ СТАНДАРТУ IEC 62305-1-2010 АПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Приведені результати експериментальних досліджень електротермічної стійкості зразків ряду дротів і кабелів електричних кіл об'єктів промислової електроенергетики з мідними (алюмінієвими) жилами (екранами), полівинілхлоридною і поліетиленовою ізоляцією до дії короткого удару великого імпульсного струму штучної блискавки з нормованими за міжнародним стандартом IEC 62305-1-2010 амплітудно-часовими параметрами і допусками на них. Бібл. 16, рис. 13.

Ключові слова: великий імпульсний струм блискавки, дроти і кабелі електричних кіл об'єктів електроенергетики, генератор великого імпульсного струму штучної блискавки, електротермічна блискавкостійкість кабельно-проводникової продукції.

Приведены результаты экспериментальных исследований электротермической стойкости образцов ряда проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией к действию короткого удара большого импульсного тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами и допусками на них. Библ. 16, рис. 13.

Ключевые слова: большой импульсный ток молнии, провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики, генератор большого импульсного тока искусственной молнии, электротермическая молниестойкость кабельно-проводниковой продукции.

Введение. Одним из путей для надежной электротермической и противопожарной защиты от прямого (косвенного) удара молнии электроэнергетических объектов (ЭЭО) и их инженерных сетей является обоснованный выбор кабельно-проводниковой продукции, устанавливаемой в их первичные и вторичные электрические цепи и отвечающей жестким условиям молниестойкости. Согласно требованиям действующих международных и национальных стандартов [1-6] при коротком ударе молнии в проводах и кабелях силовых цепей ЭЭО могут протекать импульсные токи положительной полярности амплитудой I_{mL} , имеющие аperiodическую временную форму $\tau_f/\tau_p=10$ мкс/350 мкс, где τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта между уровнями $(0,1 - 0,9)I_{mL}$ и длительность импульса тока на уровне $0,5I_{mL}$. В [1-6] приведены нормированные амплитудно-временные параметры (АВП) и допуски на них для указанного аperiodического импульса тока молнии, соответствующие I-IV уровням защиты от молнии ЭЭО и их инженерных коммуникаций. При этом, например, для низшего IV уровня защиты от молнии ЭЭО набор АВП и иных характеристик воздействующего на них аperiodического импульса тока 10/350 мкс молнии характеризуется следующими нормированными количественными значениями [1-7]: $\tau_p=350$ мкс (с допуском $\pm 10\%$); $I_{mL}=100$ кА (с допуском $\pm 10\%$); удельная энергия (интеграл действия тока молнии) $J_L=2,5 \cdot 10^6$ А²·с (с допуском $\pm 35\%$); протекающий заряд $q_L=\pm 50$ Кл (с допуском $\pm 20\%$). Что касается численного значения τ_f , то оно при допуске $\pm 20\%$ носит согласно [1-7] второстепенный характер и может находиться в диапазоне $10 \text{ мкс} \leq \tau_f \leq 15 \text{ мкс}$. Кроме того, время $t_m \approx 1,6\tau_f$, соответствующее токовой амплитуде I_{mL} , по требованиям [1-5] не должно превышать 25 мкс, а по [6] – 50 мкс.

В настоящее время отсутствуют методические и иные данные, которые можно использовать для указанного выбора проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО, отвечающего существующим требованиям [1-6]. В этой связи проведение на высоковольтном сильноточном оборудовании экспериментальных исследований по определению электротермической молниестойкости кабельно-проводниковой продукции ЭЭО является актуальной научно-технической задачей.

Постановка задачи. Рассмотрим широко используемые в силовых электрических цепях ЭЭО провода и кабели с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной (ПВХ) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией. Для их электротермических испытаний на молниестойкость используем прямолинейные опытные образцы (ОО) данных проводов (кабелей) длиной 0,5 м, жестко закрепляемые в сильноточной разрядной цепи генератора импульсного тока молнии (ГИТМ). В качестве ГИТМ выбираем созданный в 2014 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» мощный высоковольтный генератор типа ГИТМ-10/350 [7], воспроизводящий на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке аperiodические импульсы тока 10/350 мкс искусственной молнии положительной полярности с нормированными АВП и допусками на них, удовлетворяющие требованиям действующих международных и национальных стандартов [1-6]. В ходе рассматриваемых экспериментальных исследований на генераторе ГИТМ-10/350, содержащем в своем составе четыре параллельно работающих высоковольтных генератора импульсных токов (ГИТ), требуется в первом приближении определить при комнатной температуре $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ максимальные значения предельно допустимых δ_{mid} и кри-

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

тических δ_{m1k} плотностей аperiodического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП [1-6] в токоведущих частях указанных ОО проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО.

Электрическая схема и параметры мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350.

На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема генератора типа ГИТМ-10/350, используемого при электротермических испытаниях на молниестойкость ОО выбранных проводов и кабелей силовых цепей ЭЭО. Видно, что его четыре отдельных ГИТ (ГИТ-1 – ГИТ-4) параллельно работают на общую электрическую нагрузку – испытываемые ОО проводов и кабелей. Отметим, что ГИТ-1 – ГИТ-3 были собраны на основе 171 параллельно включенного высоковольтного импульсного конденсатора типа ИК-50-3 (16 для ГИТ-1, 44 для ГИТ-2 и 111 для ГИТ-3), а ГИТ-4 – на основе 288 высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140, последовательно включенных по два в каждую из 144 его параллельно подключенных секций [7, 8]. Собственные электрические параметры генератора типа ГИТМ-10/350 имели следующие численные значения [7]: для ГИТ-1 – $R_1 \approx 0,375$ Ом; $L_1 \approx 1$ мкГн; $C_1 \approx 48$ мкФ; для ГИТ-2 – $R_2 \approx 0,136$ Ом; $L_2 \approx 1,3$ мкГн; $C_2 \approx 132$ мкФ; для ГИТ-3 – $R_3 \approx 0,057$ Ом; $L_3 \approx 2,5$ мкГн; $C_3 \approx 333$ мкФ; для ГИТ-4 – $R_4 \approx 0,083$ Ом; $L_4 \approx 1,5$ мкГн; $C_4 \approx 10,08$ мФ. Формирующая индуктивность L_{30} в разрядной цепи ГИТ-3 составляла около 40 мкГн, а формирующая индуктивность L_{40} в разрядной цепи ГИТ-4 – примерно 7 мкГн.

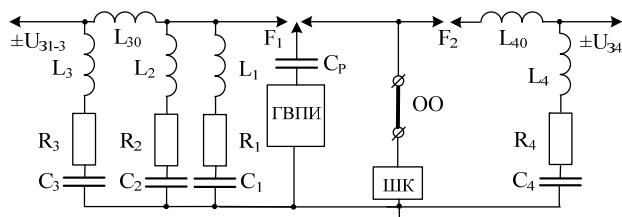


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сильноточных разрядных цепей генератора типа ГИТМ-10/350 для формирования в ОО проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО аperiodических импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих микросекундных импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; F_1, F_2 – соответственно трех- и двухэлектродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы ГИТ-1 – ГИТ-4; $C_p \approx 180$ пФ – разделительная емкость на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием искровых коммутаторов F_1 и F_2 ; ОО – опытный образец провода (кабеля); ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения импульсных токов искусственной молнии амплитудой от ± 10 А до ± 300 кА; $\pm U_{31-3}, \pm U_{34}$ – зарядные напряжения соответственно ГИТ-1 – ГИТ-3 и ГИТ-4; $L_1 - L_4, R_1 - R_4$ и $C_1 - C_4$ – соответственно собственные индуктивности, активные сопротивления и емкости разрядных цепей ГИТ-1 – ГИТ-4; L_{30}, L_{40} – формирующие индуктивности разрядных цепей ГИТ-3 и ГИТ-4) [7]

Номинальное значение запасаемой электрической энергии в генераторе типа ГИТМ-10/350 при зарядном напряжении U_{31-3} для конденсаторов ГИТ-1 – ГИТ-3 в ± 50 кВ и зарядном напряжении U_{34} для конденсаторов ГИТ-4 в ± 5 кВ составляет около 1145

кДж [7]. Причем, для ГИТ-1 – 60 кДж, для ГИТ-2 – 165 кДж, для ГИТ-3 – 416 кДж и для ГИТ-4 – 504 кДж. Эти данные подчеркивают высокие уровни энергоемкости конденсаторных батарей генератора типа ГИТМ-10/350 и указывают на «скрытые» от читателя трудности работы для обслуживающего персонала с такими мощными накопителями энергии [9, 10]. Для избегания разрушительных последствий в конденсаторных батареях генератора типа ГИТМ-10/350 и обеспечения безопасных условий труда для обслуживающего их персонала при аварийном режиме его работы, вызванном электрическим пробоем на стадии заряда (разряда) внутренней или наружной изоляции хотя бы одного из его 459 конденсаторов, на всех высоковольтных выводах импульсных конденсаторов в ГИТ-1 – ГИТ-4 были установлены защитные сопротивления, выполненные на основе параллельно соединенных высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом 24 Ом на постоянное напряжение до ± 25 кВ [10, 11]. Параллельная работа ГИТ-1 – ГИТ-4 в режиме сильноточного разряда высоковольтных конденсаторов генератора типа ГИТМ-10/350 на ОО проводов (кабелей) обеспечивается согласно рис. 1 синхронным срабатыванием их высоковольтного трехэлектродного управляемого воздушного коммутатора F_1 с графитовыми основными электродами, имеющими полусферические рабочие поверхности, на номинальное напряжение ± 50 кВ [12] и высоковольтного двухэлектродного воздушного коммутатора F_2 с графитовыми прямоугольными электродами, содержащими плоские рабочие поверхности, на номинальное напряжение ± 10 кВ [13]. Синхронное срабатывание коммутаторов F_1 и F_2 в приведенной на рис. 1 электрической схеме осуществляется за счет подачи через высоковольтную разделительную емкость C_p на средний графитовый сферический электрод коммутатора F_1 от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) импульсного напряжения микросекундной длительности амплитудой до ± 100 кВ [7, 10]. При электрическом пробое за счет работы ГВПИ одного из двух воздушных промежутков коммутатора F_1 и его последующем срабатывании возникающее импульсное перенапряжение на ОО провода (кабеля) приводит к одновременному с F_1 срабатыванию и коммутатора F_2 , последующему разряду на нагрузку (ОО) заряженных конденсаторов ГИТ-1 – ГИТ-4 и протеканию имитированного импульса тока молнии с требуемыми АВП через образцы исследуемых проводов (кабелей).

Результаты испытаний проводов и кабелей ЭЭО на стойкость к импульсу тока 10/350 мкс искусственной молнии. На рис. 2 показан общий вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной в его сильноточной разрядной цепи сплошной круглой медной жилой диаметром 3,5 мм и сечением $S_1 \approx 9,6$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 [14] до протекания по ней аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА.

На рис. 3 приведена зафиксированная с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного шунта типа ШК-300 [7, 10]

и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 осциллограмма апериодического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, протекающего в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 через медную жилу ОО указанного кабеля длиной 0,5 м. После воздействия на нее данного импульса тока амплитудой $I_{mL} \approx 85,6$ кА ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 остался визуально целым и соответственно как электродинамически, так и электротермически не поврежденным.

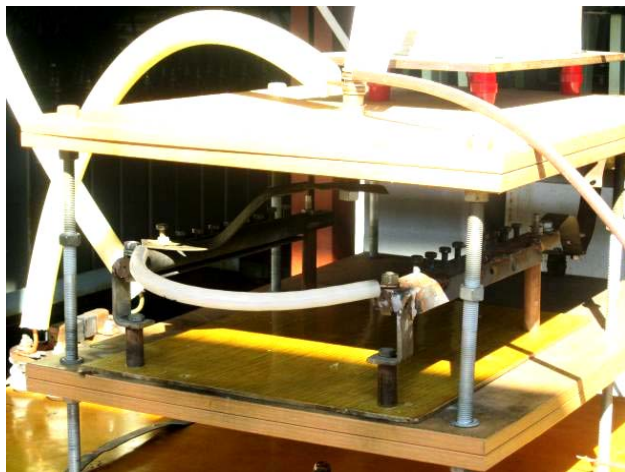


Рис. 2. Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 9,6$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м снятыми защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до воздействия на нее апериодического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

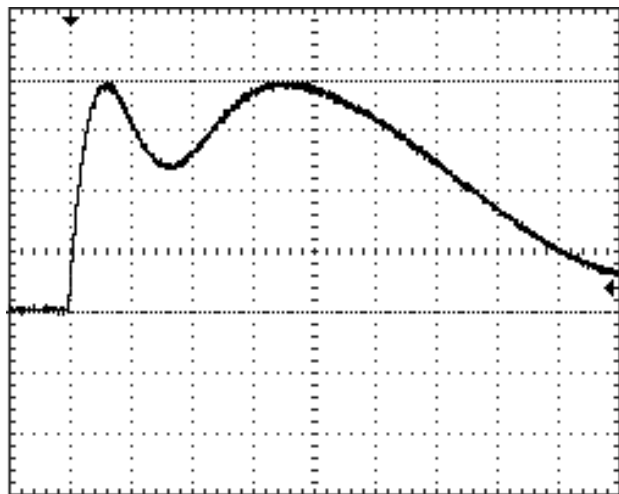


Рис. 3. Осциллограмма апериодического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4 на сплошную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 9,6$ мм² радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и удаленными защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном ($I_{mL} \approx 85,6$ кА; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9$ кА/мм²; $\tau_f \approx 15$ мкс; $t_m \approx 25$ мкс; $\tau_p \approx 335$ мкс; $J_L \approx 2 \cdot 10^6$ А²·с; $q_L \approx 42$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Максимальное значение плотности тока в медной жиле ОО рассматриваемого кабеля составляло примерно $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9$ кА/мм². Найденное в медной жиле радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с ПЭТ изоляцией для этого случая ($I_{mL} \approx 85,6$ кА; $J_L \approx 2 \cdot 10^6$ А²·с) расчетным путем с учетом [15] амплитудное значение предельно допустимой плотности δ_{m1d} импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии из соотношения $\delta_{m1d} \approx 1,353 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ оказывается примерно равным $\delta_{m1d} \approx 8,2$ кА/мм². Известно, что при такой усредненной плотности δ_{m1d} импульсного тока в медной жиле указанного кабеля предельно допустимая кратковременная температура θ_{1k} ее нагрева не будет превышать 120 °С [15, 16]. Из полученных нами приближенных данных следует, что расчетное значение плотности тока $\delta_{m1d} \approx 8,2$ кА/мм² отличается от ее опытного значения $\delta_{m1d} \approx 8,9$ кА/мм² примерно на 8 %.

На рис. 4 показан рабочий стол генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его электродах расщепленной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией [14] длиной 0,5 м до воздействия на нее импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой до $I_{mL} \approx 85,6$ кА.

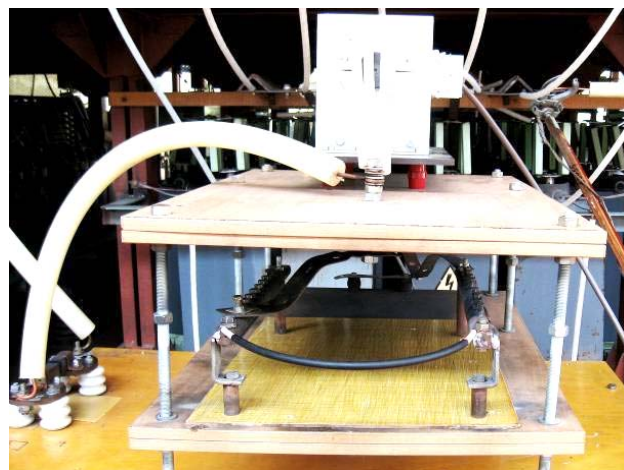


Рис. 4. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах расщепленной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и «заглушенным» при электротермических испытаниях его медным экраном-оплеткой до воздействия на нее апериодического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

На рис. 5 представлена начальная стадия электрического взрыва (ЭВ) медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² испытываемого в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м. Съемка процесса ЭВ указанной медной жилы производилась при помощи цифровой видеокамеры типа Canon M307E с последующей ее раскадровкой. Обследование исследуемого ОО после его электротермического испытания указывает на полную сублимацию его меди из внутренней области поясной ПЭТ изоляции цилиндрической конфигурации радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11.



Рис. 5. Начальная стадия ЭВ медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350

На рис. 6 в укрупненном виде показана концевая разделка ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м после воздействия на него испытательного импульса тока 17/310 мкс амплитудой $I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$ согласно осциллограмме, приведенной на рис. 7, и ЭВ его расщепленной круглой медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$. Усредненное амплитудное значение плотности импульсного тока в электрически взрывающейся медной жиле составляло при этом $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$.



Рис. 6. Внешний вид зоны концевой разделки ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м после прохождения по его расщепленной круглой медной жиле сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ испытательного импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии от генератора ГИТМ-10/350 и ее ЭВ с полной сублимацией меди ($I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$; $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$; $t_m \approx 28 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 310 \text{ мкс}$; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $q_L \approx 37,9 \text{ Кл}$)

Расчетная оценка для данного электротермического случая ($I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$) максимального значения критической плотности импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии по соотношению $\delta_{m1k} \approx 4,416 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [15] указывает на то, что $\delta_{m1k} \approx 27,6 \text{ кА/мм}^2$. Можно заключить, что для медной жилы кабеля марки РК 50-7-11 расчетное значение плотности тока $\delta_{m1k} \approx 27,6 \text{ кА/мм}^2$ от ее опытного значения $\delta_{m1k} \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$ отличается примерно на 6 %.

Укажем, что используемая на рис. 3, 6 и 7 величина прошедшего через токоведущие части ОО проводов

и кабелей в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 электрического заряда q_L определялась по соотношению $q_L \approx k_L I_{mL} (1,32 \tau_p + 0,27 t_m)$ [15], где k_L – нормирующий коэффициент, изменяющийся для проведенных нами испытаний в диапазоне (1,092 – 1,112).

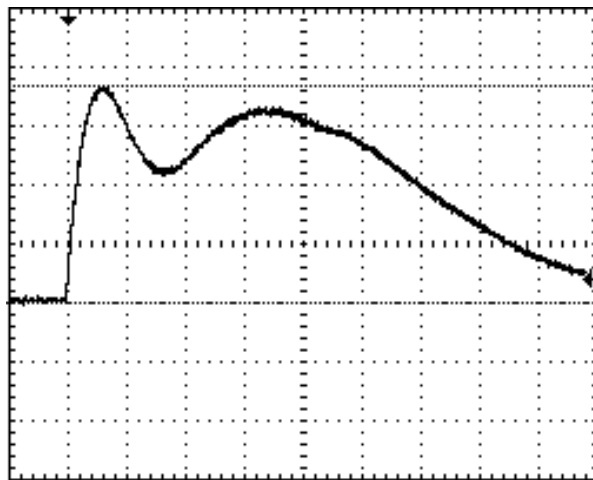


Рис. 7. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся расщепленную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м без использования при испытаниях его медного экраноплетки ($I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$; $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$; $t_m \approx 28 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 310 \text{ мкс}$; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $q_L \approx 37,9 \text{ Кл}$; $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

На рис. 8 запечатлен момент подготовки к электротермическим испытаниям в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м, содержащего две параллельно подключенные к массивным стальным электродам рабочего стола используемого высоковольтного источника импульсного тока сплошные круглые медные жилы сечением $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$.



Рис. 8. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленными на его массивных стальных электродах сплошными круглыми медными жилами общим сечением $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$ ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на них аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

На рис. 9 приведен внешний вид провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией, испытавший воздействие на его две параллельно включенные в разрядную цепь генератора типа ГИТМ-10/350 сплошные круглые медные жилы общим сечением $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$ аperiodического импульса тока 17/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$. Усредненное амплитудное значение плотности большого импульсного тока в медных жилах исследуемого провода в этом случае было равным около $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$.

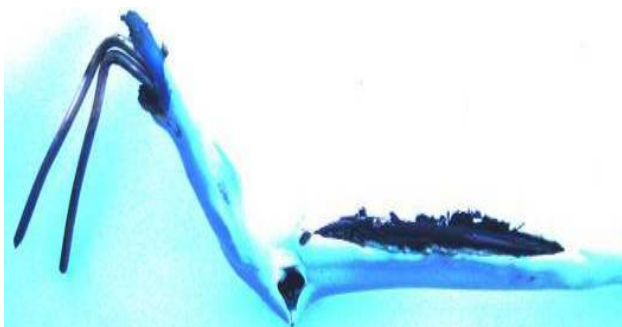


Рис. 9. Внешний вид фрагмента ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией с двумя параллельно соединенными в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 круглыми медными жилами общим сечением $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$ после протекания по ним испытательного аperiodического импульса тока 17/335 мкс искусственной линейной молнии ($I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$; $\tau \approx 17 \text{ мкс}$; $t_m \approx 28 \text{ мкс}$; $t_p \approx 335 \text{ мкс}$; $J_L \approx 1,91 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $q_L \approx 41,2 \text{ Кл}$; $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

Осциллограмма воздействующего на сплошные круглые медные жилы ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией аperiodического импульса тока искусственной молнии в этом случае практически повторяла осциллограмму, приведенную на рис. 3. Медные жилы данного провода выдержали оказанное на них сильное электротермическое и электродинамическое воздействие, а его ПВХ изоляция – нет. В этом случае имело место локальное разрушение его ПВХ изоляции из-за ее перегрева от протекающего по медным жилам рассматриваемого провода аperiodического импульса 17/335 мкс тока искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$.

На значительный нагрев ПВХ изоляции при этом виде испытаний указывает также то, что усредненное максимальное значение плотности импульсного тока $\delta_{m1} \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$ в медных жилах провода марки ПНП 2×2,5 примерно в 1,8 раза превышало расчетное амплитудное значение предельно допустимой в них плотности используемого импульса тока, равное $\delta_{m1d} \approx 1,506 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2} \approx 9,1 \text{ кА/мм}^2$ [15]. Кроме того, оценка температуры θ_1 импульсного джоулевого нагрева протекающим импульсом 17/335 мкс тока медных жил указанного провода по расчетному соотношению (2) из [15] показывает, что она составляла около $\theta_1 \approx 912 \text{ }^\circ\text{C}$. Разумеется, что такое значение θ_1 значительно превышает предельно допустимую кратковременную температуру θ_{1k} нагрева проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией, составляющую примерно $150 \text{ }^\circ\text{C}$ [15, 16]. Эти данные косвенно подтверждают достоверность экспериментально найденного нами максимального значения предельно допустимой плотности

импульса 15/335 мкс тока искусственной линейной молнии в медных токоведущих частях проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией, численно составляющего примерно $\delta_{m1d} \approx 9 \text{ кА/мм}^2$.

На рис. 10 приведен внешний вид закрепленной на электродах рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 сплошной круглой алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м (вторая алюминиевая жила испытываемого провода была нами «заглушена»).



Рис. 10. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

На рис. 11 изображена осциллограмма испытательного импульса 17/265 мкс тока искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$, протекающего через электрически взрывающуюся в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 алюминиевую жилу сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией ($\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14 \text{ кА/мм}^2$).

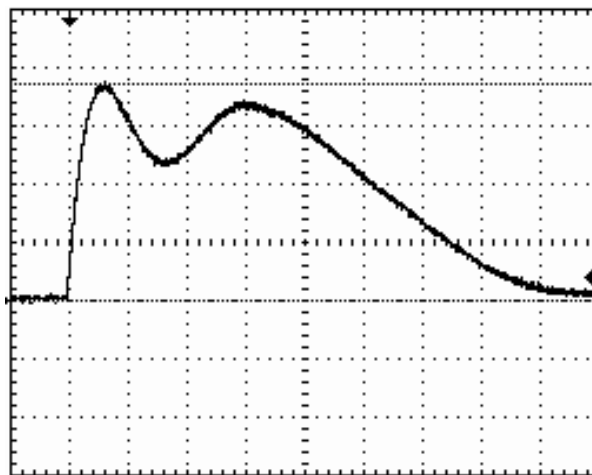


Рис. 11. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся сплошную круглую алюминиевую жилу сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ($I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14 \text{ кА/мм}^2$; $\tau \approx 17 \text{ мкс}$; $t_m \approx 28 \text{ мкс}$; $t_p \approx 265 \text{ мкс}$; $J_L \approx 1,58 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $q_L \approx 33,3 \text{ Кл}$; $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$; масштаб по вертикали – $22,52 \text{ кА/клетка}$; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

На рис. 12 показана промежуточная стадия ЭВ испытываемой в силовоточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 [7] алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ($I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$; $\delta_{m1k} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$).



Рис. 12. Промежуточная стадия ЭВ сплошной круглой алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м в силовоточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350

Расчетная оценка максимального значения критической плотности импульса тока 17/265 мкс искусственной линейной молнии для алюминиевой жилы провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией по приближенному соотношению $\delta_{m1k} \approx 2,863 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2}$ [15] свидетельствует о том, что в данном электротермическом случае оно численно составляет около 19 кА/мм^2 . Полученное опытным путем для алюминиевой жилы значение $\delta_{m1k} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$ отличается от указанного расчетного значения $\delta_{m1k} \approx 19 \text{ кА/мм}^2$ примерно на 26 %. Выполненный в дальнейшем эксперимент на генераторе типа ГИТМ-10/350 с ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м и его двумя параллельно подключенными к электродам разрядной цепи указанного силовоточного генератора импульсного тока искусственной молнии алюминиевыми жилами общим сечением $S_1 \approx 12 \text{ мм}^2$ (рис. 13) показал, что испытываемый провод при этом практически выдержал оказанное на него сильное электротермическое и электродинамическое воздействие.



Рис. 13. Внешний вид провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м с его параллельно подключенными к электродам рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 двумя алюминиевыми жилами общим сечением $S_1 \approx 12 \text{ мм}^2$ до воздействия на них импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ (справа отчетливо виден измерительный шунт типа ШК-300 [7, 10], включенный в силовоточную разрядную цепь данного генератора)

Осциллограмма испытательного импульса 15/335 мкс тока имитированной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ в этом случае практически повторяла осциллограмму, показанную нами ранее на рис. 3. Амплитудное значение плотности импульсного тока в алюминиевых жилах ОО указанного провода составляло около $\delta_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 6,9 \text{ кА/мм}^2$. Оценка максимального значения предельно допустимой в алюминиевых жилах ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией плотности импульса тока 15/335 мкс по расчетному соотношению $\delta_{m1d} \approx 0,975 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2}$ [15] приводит нас к тому, что в данном случае $\delta_{m1d} \approx 5,9 \text{ кА/мм}^2$. Видно, что полученное при электротермических испытаниях опытное амплитудное значение предельно допустимой плотности $\delta_{m1d} \approx 6,9 \text{ кА/мм}^2$ используемого импульса 15/335 мкс тока искусственной молнии в алюминиевых жилах провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией от соответствующего расчетного значения $\delta_{m1d} \approx 5,9 \text{ кА/мм}^2$ отличается примерно на 14 %.

Выводы.

1. Впервые экспериментальным путем установлено, что при решении актуальных прикладных задач молниезащиты электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики к короткому удару грозовых разрядов в соответствии с требованиями ряда действующих в настоящее время международных и национальных стандартов необходимо исходить из того, что предельно допустимая плотность импульса 15/335 мкс тока молнии в медных токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией численно составляет около $\delta_{m1d} \approx 9 \text{ кА/мм}^2$, а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – около $\delta_{m1d} \approx 6 \text{ кА/мм}^2$.

2. Из результатов, выполненных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» экспериментальных исследований молниестойкости образцов кабельно-проводниковой продукции ЭЭО на уникальном высоковольтном генераторе импульсов тока искусственной молнии типа ГИТМ-10/350 следует, что критическая плотность ее импульса 15/335 мкс тока в медных токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией составляет примерно $\delta_{m1k} \approx 26 \text{ кА/мм}^2$, а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – примерно $\delta_{m1k} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$. При достижении в медных (алюминиевых) жилах (экранах) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО таких плотностей указанного импульса тока молнии последние будут подвергаться ЭВ и выходу из строя.

3. Найденные опытные значения плотностей δ_{m1d} и δ_{m1k} нормированного согласно требований действующих международных и национальных стандартов импульса 15/335 мкс тока искусственной молнии в медных и алюминиевых токоведущих частях кабельно-проводниковой продукции электрических цепей ЭЭО будут при соответствующем выборе и обоснованной установке с их учетом подобной продукции в силовых электрических цепях ЭЭО способствовать повышению уровня их функциональной и противопожарной безопасности в условиях активной грозовой деятельности в постоянно окружающей объекты промышленной электроэнергетики воздушной атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. Part 2: Risk management». Geneva, IEC Publ., 2010.
3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, IEC Publ., 2010.
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.
6. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbauteile. – Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile. Berlin, Buchverlag DS, 2008. – 16 [.
7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №1. – С. 51-56.
8. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
9. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
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. – С. 81-85.
11. Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2014. – №50(1092). – С. 13-20.
12. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Недзельский О.С., Пличко А.В., Понуждаева Е.Г. Высоковольтный управляемый сильноточный искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50 // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2014. – № 50(1092). – С. 28-37.
13. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С. Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – №6. – С. 58-62.
14. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
15. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии // *Электричество*. – 2013. – №10. – С. 7-15.
16. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, кн. 1 / Под ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning.– Part 2: Risk management». Geneva, IEC Publ., 2010.
3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning.– Part 3: Physical damage to structures and life hazard». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning.– Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, IEC Publ., 2010.
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]. Berlin, Publ. DS, 2008. 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. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 51-56. (Rus).
8. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevsky M.N., Ermuratsky V.V., Kuchinsky G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Spravochnik* [The electrical capacitors and condenser options. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 656 p. (Rus).
9. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tekhnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skiy 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. Baranov M.I. Selection and installation of high-voltage ceramic protective resistors in the charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp. 13-20. (Rus).
12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Nedzel'skiy O.S., Plichko A.V., Ponuzhdaeva E.G. High voltage-controlled high-current spark gap with graphite electrodes RVGU-50. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp. 28-37. (Rus).
13. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skiy O.S. High-voltage high-current generator air gaps of the current artificial lightning. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*, 2008, no.6, pp. 58-62 (Rus).
14. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).
15. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance wire and cable to the aircraft to the striking action pulsed current lightning. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no.10, pp. 7-15. (Rus).
16. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, kn. 1* [Electrical Engineering Handbook. Production and distribution of electric

REFERENCES

1. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.

energy. Vol. 3, book 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 880 p. (Rus).

Поступила (received) 11.09.2015

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,

Рудаков Сергей Валерьевич², 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 Национальный университет гражданской защиты Украины,

61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, S.V. Rudakov²

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

² National University of Civil Protection of Ukraine, 94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Experimental researches of electro-thermal resistibility of send-offs and cables to action rationed on the International Standard of IEC 62305-1-2010 of aperiodic impulse of current of artificial lightning.

Purpose. Experimental researches of electro-thermal resistibility of cable-explorer products, applied in the power electric circuits of objects of electric-power industry, to action on its

copper and aluminum parts bearings a current rationed on the International Standard of IEC 62305-1-2010 aperiodic impulse 10/350 μ s of current of artificial lightning. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high tensions and high pulsed currents (HPC), and also scientific and technical bases of planning of devices of high-voltage impulsive technique and measuring HPC in them. **Results.** Experimental a way the quantitative levels of maximal values maximum of possible and critical closenesses of aperiodic impulse 10/350 μ s of current of artificial lightning with rationed on the international standard of IEC 62305-1-2010 peak-temporal parameters and admittances on them in copper (aluminum) parts bearings a current of send-offs and cables with a polyethylene (PET) and polyvinylchloride (PVCH) isolation. **Originality.** First in world practice on the unique powerful high-voltage generator of HPC of artificial lightning experimental researches of resistibility to lightning of pre-production models of send-offs (cables) are conducted with copper (aluminum) tendons, PET and PVCH by an isolation, in-use in power electric circuits of electric-power industry objects. **Practical value.** The use in practice of protecting from lightning of the got results will allow substantially to promote functional and fire-prevention safety of engineering communications of objects of industrial electroenergy in the conditions of action on them of short shots of linear lightning. References 16, figures 12.

Key words: high impulsive current of lightning, wires and cables of electric chains of objects of electric-power industry, generator of high pulsed current of artificial lightning, electro-thermal resistibility to lightning of cable-explorer products.

D.A. Gapon, Ya.S. Bederak

GUARANTEEING THE TROUBLE-FREE OPERATION OF CAPACITOR BANKS IN POWER-SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Purpose. The problem of resonance phenomena in power systems of industrial enterprises using capacitor banks for reactive power compensation was detected. Circuit of the capacitor banks tier to downshift main substation tires is present. But there is no common algorithm to calculate and avoid such trouble. The main goal of this article is to introduce some basics for power supply systems with possible resonant circuits engineering. *Methodology.* At the first step the data on the change of the current in the chemical company network when changing capacitor banks value are received. For these purposes the oscilloscope function of digital protection relay was used. Current data samples were analyzed by spectrum detection software. Most significant levels of the 3rd and 5th harmonics were achieved. Comparison of harmonic distortion levels with and without capacitor bank is given. *Results.* Achieved data allow making conclusion about overloading reasons of capacitor banks while higher harmonics currents presence. A voltage and current harmonious composition measuring in the absence of power quality analyzers using digital protection relay terminals or emergencies registers are proposed. The necessity of power quality monitoring near capacitor banks connections to avoid resonance phenomena (current and voltage resonance) in industrial power supply systems is proven. The control algorithm of capacitor banks to provide electromagnetic compatibility, while various modes of nonlinear load operation is given. *Originality.* Using of digital protection relay oscilloscoping for current resonant detection can allow to significantly reduce time and cost of solution. Replacement parallel circuit comprising a branch and one active-inductive load to another branch network in the presence of higher harmonics source are proposed. *Practical value.* A sequence for measuring the levels of harmonic components at the connections of capacitor banks in the absence of specialized instruments is proposed. The algorithm to avoid possible resonance currents in the presence of condensing units is proposed. References 9, tables 2, figures 2.

Key words: power supply system, resonance, capacitor bank, power quality, electromagnetic compatibility.

В статье рассматривается проблема резонансных явлений в системах электроснабжения промышленных предприятий, использующих конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности. Приведены данные по изменению токов 3-й и 5-й гармонических составляющих в сети химического предприятия при изменении мощности присоединенных конденсаторных установок. Предложен способ измерения качества электроэнергии при отсутствии анализаторов. Разработан алгоритм обеспечения электромагнитной совместимости на присоединениях конденсаторных установок. Библи. 9, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: система электроснабжения, резонанс, конденсаторные установки, качество электрической энергии, электромагнитная совместимость.

Problem definition. In some cases in power-supply systems of industrial enterprises dangerous resonant phenomena can arise. For example, at simultaneous utilization of the smooth soft start device which includes a semiconductor converter and a capacitor bank, the failure resonant currents able to destroy the capacitor bank as well as the whole power supply-system were fixed [1]. Generally, we can speak that the phenomenon of the current resonance is inherent for power-supply systems to which nonlinear customers and devices of reactive power compensation are connected simultaneously. Trends of the modern electrical customers' development permit to speak that power and number of used semiconductor converters increase permanently. Devices of reactive power compensation including capacitor banks become more and more widely used. So, a task of the capacitor banks and, in general, power supply systems of industrial enterprises protection from resonant phenomena is actual. There is necessity to develop methods and techniques to improve electromagnetic compatibility of power supply systems of industrial enterprises.

Analysis of last investigations and publications. In [2] it is noted that resonance arising on the substation's buses results in sharp increase of the current, mainly by sharp increase of its harmonic components in the resonance circuit. In [3] it is determined that in the circuit including capacitor bank in one loop and active-inductive load in another one, voltage resonance in addition to current one can arise. A technique of the calculation of the resonant frequency in such a circuit is proposed in [4].

Ya.E. Shklyarskiy and A.N. Skamin have determined the dependence of the capacitor bank's overload factor on compensating devices' power, power of linear and nonlinear loads, spectra of current and voltage. Besides, assessment of the power grid's parameters at various conditions of arising of higher harmonics which guarantees the capacitor bank operation without overload is presented [5].

The goal of the paper: to develop a methodology of measurement of harmonic components on capacitor banks' connections and propose measures to prevent current resonance in power supply systems of industrial enterprises which include capacitor banks.

Main research material. Operational regulations for exploitation of consumers' electrical installations [6] recommend that on the medium voltage capacitor installations' connections on-line monitoring of the electrical energy quality parameters should be carried out, and on the low voltage capacitor installations' connections such measurements should be carried out periodically. To do it, it is necessary to use specialized analyzers of the electrical energy quality. A lot of world-wide manufacturers develop and produce such devices. However, they are very expensive, so utilization of such devices in power supply systems of industrial enterprises requires huge expenses. High price of electrical energy quality analyzers is determined mainly by utilization of high-technological elementary base that is necessary to guarantee high requirements for the measurement's

© D.A. Gapon, Ya.S. Bederak

precision. However, the presence of the high accuracy is not principal to determine and analyze the resonance. So, in the case of the absence of specialized measurement devices it is possible to measure the voltage and current harmonic compositions by using microprocessor terminals of the relay protection or fault recorders which have the accuracy class 0.5 for current and voltage measurement. Mainly they have a function of the registration of current and voltage oscillograms at arbitrary time. However, it is necessary to note that some terminals of relay protection (for example, by Siemens) use preliminary signal processing by using an analog band filter to extract first harmonic. It is obvious that in this case information about presence and parameters of higher harmonics losses. Therefore, before the oscillograms registration it is necessary to be sure that the device is able to save necessary spectral components. Obtained data are converted in the COMTRADE format which is open and described in the free Standard permits to proceed information by using a wide spectra of computer codes. There are developments by Siemens, Aniger, Hartron, Uniti and other Companies. Most of codes permits to carry out computations of higher harmonic components of current and voltage.

One-line diagrams of the capacitor bank 6 kV No. 1, 2 are presented in Fig. 1, 2 respectively.

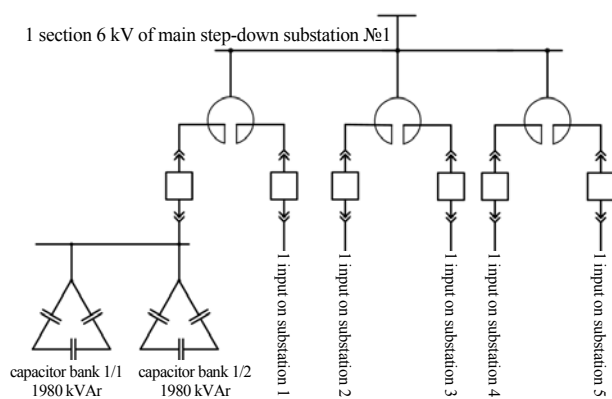


Fig. 1. One-line diagram of the capacitor bank No. 1 connection to buses 6 kV of the main step-down substation of the industrial enterprise

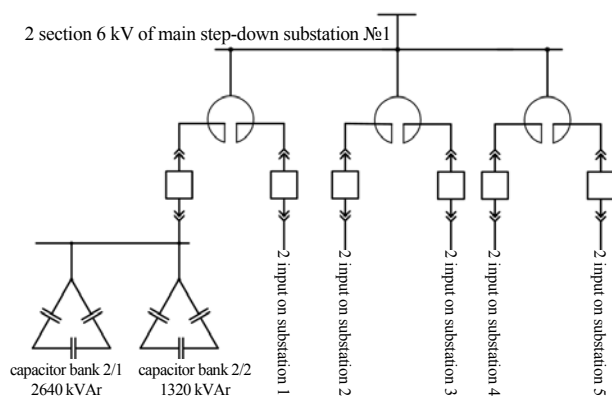


Fig. 2. One-line diagram of the capacitor bank No. 2 connection to buses 6 kV of the main step-down substation of the industrial enterprise

Measurement was carried out on the capacitor bank's connections of 6 kV which are used for the reactive power compensation on the bus section of the

step-down substation at the chemical enterprise. In Tables 1, 2 values on n -th harmonic components on buses of the capacitor banks No. 1, 2 are respectively presented. It is necessary to note that in both case amplitude of the 3rd voltage harmonic does not exceed 4%, and amplitude of the 5th harmonic component isles than 5% that is permissible in the correspondence with the Sate Standard GOST 13109 – 97 [7].

Table 1

Values of coefficients of the n -th current harmonic component in percent before and after the capacitor bank No. 1 connection

Harmonic No.	After the capacitor unity connection (partial connection)		After the capacitor unity connection (full)	
	Current of the phase A	Current of the phase C	Current of the phase A	Current of the phase C
3	0.7	0.41	0.74	0.44
5	8.95	6.63	26.00	18.78

Results of measurements prove that at the change of the connected capacitor bank's power (see Table 1, 2) currents of higher harmonic components can arise essentially exceeding permissible normative values [8] resulting in the capacitor bank's overload. In the same time load on connections can vary widely. Depending on the value of the inductive load the current resonance at the frequency of one or another current harmonic can arise. To prevent such situations it is necessary to change the capacitor bank's connected capacity in such a way that the quiescent frequency of the oscillation circuit do not coincide with the frequency of one of any present higher harmonics. It is necessary to note that realization of such a adjustment requires huge investigations at the first stage of which it is necessary to collect a lot of information about resonant phenomena in power-supply systems of industrial enterprises. Therefore, there is an actual necessity to organize monitoring of the electrical energy quality on the capacitor bank's connections. Proceeding of data collected in such a way will permit to guarantee in the future electromagnetic compatibility of capacitor banks independently on the composition and character of the network loading [9].

Table 2

Values of coefficients of the n -th current harmonic component in percent before and after the capacitor bank No. 2 connection

Harmonic No.	After the capacitor unity connection (partial connection)		After the capacitor unity connection (full)	
	Current of the phase A	Current of the phase C	Current of the phase A	Current of the phase C
3	1.06	0.76	0.59	0.48
5	13.7	10.65	8.9	2.29

So, to prevent resonant phenomena on the capacitor banks' connections the following sequence of actions is proposed:

1. Measurement of parameters of electrical energy quality on the capacitor banks' connections.

1.1. Measurement of parameters of electrical energy quality on the capacitor banks' disconnected connections (determination of the voltage harmonic set).

1.2. Measurement of parameters of electrical energy quality on each stage of the capacitor bank from minimal power to full power of the capacitor bank.

2. Proceeding of the measurement results. Determination of the capacitor bank's power at which there is essential increase of the coefficient of the n -th current harmonic component.

3. Determination of sources of nonlinear distortions influencing on the electrical energy quality.

4. Building an equivalent circuit of the parallel one which includes the capacitor unit in one loop and active-inductive load in another one at presence a higher harmonics source in the network.

5. Calculation of the resonance frequency and the pass band in the circuit.

6. Decrease of the capacitor bank's power at the coincide of the resonance frequency in the circuit with the frequency of odd higher harmonics divisible by 50 Hz.

7. Check of the possibility of resonance phenomena arising in the mode of the nonlinear load start at presence of the higher harmonics source in the network that is connected for short time [1].

Conclusions.

1. It is propose to measure the voltage and current harmonics set *crpymy* at the absence of electrical energy quality analyzers by using microprocessor relay protection terminals or by fault recorders.

2. Necessity of organization of the electrical energy quality monitoring on the capacitor banks' connections to prevent resonance phenomena (current and voltage resonance) in power-supply systems of industrial enterprises is proved.

3. An algorithm to guarantee the electromagnetic compatibility on the capacitor banks' connections which can work in the mode of the nonlinear load start as well as in the mode of steady operation of electrical load.

REFERENCES

1. Gapon D.A., Bederak Ya.S. Features of the operation regime of the mains during soft start of powerful synchronous motors. *Promyshlennaiia energetika – Industrial Power Engineering*, 2014, no.2, pp.27-30 (Rus).

2. Beliy V.B. Electromagnetic compatibility of power-supply systems' elements comprising reactive power compensation devices. *Vestnik Altaiskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta – Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2009, no.6, pp. 62-65 (Rus).

3. Bederak Y.S., Oleynik S.V., Shuliak A.A. Research of capacitors mode 6 (10) kV connected to branches of dual limiting current reactor. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2013, vol.2, part 2, pp. 290-294. (Ukr).

4. Bederak Y.S. Electromagnetic compatibility of complex industrial power supply systems *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.60, pp. 37-45. (Ukr).

5. Shklyarskiy Ya.E., Skamin A.N. Industrial research into high harmonic influence on compensation devices. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 69-71 (Rus).

6. Rules of technical operation of electrical consumers, approved by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine 25.07.2006, no.258 (as amended by Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of 13.02.2012 no.91) with amendments, approved by the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine 11.16.2012 no.905. (Ukr).

7. State Standard 13109-97. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Standards of quality of electric energy in power systems for general use. Interstate standard. Moscow, IPC Standards Publ., 1998. 31 p. (Rus).

8. IEEE Standard 519-1992. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. – 100 p.

9. Bederak Y.S. Current and voltage monitoring implementation with varying load character in the branches of twin reactor in the presence of higher harmonics sources. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energetic and electrification*, 2013, no.8, pp. 48-51 (Ukr).

Received 09.10.2015

D.A. Gapon¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Ya.S. Bederak², Engineer,

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

phone +38 057 7076551, e-mail: dima12345ml@mail.ru

² PJSC «AZOT»,

72, Pervomayskaya Str., Cherkassy, 18014, Ukraine.

phone +38 047 2392979, e-mail: ei@uch.net

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Метою статті є розробка методології визначення якості системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) силового електрообладнання тягових підстанцій (ТП) електрифікованих залізниць в умовах невизначеності експлуатації на основі експертної інформації. Методика. Для вирішення поставленого завдання застосовано основні положення теорії нечітких множин, а також бальних, лінгвістичних та інтервальних оцінок експертів. Результати. Аналіз існуючої різноманітності підходів до розробки сучасних методів вдосконалення системи ТО і Р дозволяє зробити висновки, що проблема підвищення якості системи вирішується шляхом розв'язання індивідуальних завдань підвищення експлуатаційної надійності силового електрообладнання ТП в таких основних взаємопов'язаних напрямках: технічному, економічному та організаційному. В основу оцінки якості системи покладено початкові експертні дані та розроблено варіант формалізованого документа оцінки якості обслуговування електрообладнання ТП експертами. Здійснено вибір визначення рівня показника якості системи обслуговування на основі бальних, лінгвістичних і інтервальних оцінок експертів, які відображаються в кількісній і/або якісній формі. Розглянуто можливі варіанти представлення експертних даних і відповідні їм методики розрахунку кількісного інтегрального показника рівня підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП. Розроблена методика та метод оцінки якості системи ТО і Р ТП дозволяє оперативно реагувати на зміни умов функціонування силового електрообладнання ТП, а також визначати найбільш ефективні стратегії ТО і Р електрообладнання ТП в умовах невизначеності функціонування дистанції електростанції. Наукова новизна. У статті набув подальшого розвитку метод системного підходу з підвищення якості функціонування системи ТО і Р силового електрообладнання ТП в умовах невизначеності на основі експертної інформації. У цьому напрямку автор вперше пропонує: варіант формалізованого документа оцінки якості обслуговування силового електрообладнання ТП експертами; вираз для визначення інтегрального показника якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП, який відсутній у стандартах системи ТО і Р; матрицю якості системи з урахуванням етапів (методів) та напрямків підвищення якості обслуговування силового електрообладнання ТП. Цей метод дозволяє виконувати експертну оцінку стану системи обслуговування та прогнозувати й вибирати раціональний варіант підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП з урахуванням не тільки технічних, але й організаційно-правових та фінансово-економічних заходів. Практична значимість. Удосконалення на електрифікованих залізницях України системи управління якістю ТО і Р ТП дозволить підвищити ефективність і якість системи технічного обслуговування силового електрообладнання ТП та запобігти виникненню або зменшити тяжкість можливих відмов обладнання. На основі взаємозв'язків складових матриці якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП сформовано вирази для розрахунку інтегральних показників якості системи за напрямками й етапами для конкретного обладнання та системи в цілому. Визначено, що при підвищенні якості ТО і Р електрообладнання швидкість зміни вимірюваного значення параметра x_i на i -му кроці під час експлуатації зменшується, при цьому середньоквадратичне відхилення параметра σ також зменшується, а ймовірність $P(t)$ безвідмовної роботи електрообладнання ТП збільшується. Бібл. 8, табл. 3.

Ключові слова: тягова підстанція, технічний стан обладнання, якість системи технічного обслуговування і ремонту, експертна інформація, нечіткі множини, інтегральний показник якості.

Целью статьи является разработка методологии определения качества системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) силового электрооборудования тяговых подстанций (ТП) электрифицированных железных дорог в условиях неопределенности эксплуатации на основе экспертной информации. Методика. Для решения поставленной задачи применены основные положения теории нечетких множеств, а также бальных, лингвистических и интервальных оценок экспертов. Результаты. Анализ существующего многообразия подходов к разработке современных методов совершенствования системы ТО и Р позволяет сделать вывод, что решение проблемы повышения качества системы достигается путем решения индивидуальных задач повышения эксплуатационной надежности силового электрооборудования ТП в следующих основных взаимосвязанных направлениях: техническом, экономическом и организационном. В основу оценки качества системы положены начальные экспертные данные и разработан вариант формализованного документа оценки качества обслуживания электрооборудования ТП экспертами. Проведен выбор определения уровня показателя качества системы обслуживания на основе бальных, лингвистических и интервальных оценок экспертов, которые отображаются в количественной и/или качественной форме. Рассмотрены возможные варианты представления экспертных данных и соответствующие им методики расчета количественного интегрального показателя уровня повышения качества системы ТО и Р силового электрооборудования ТП. Разработанная методика и метод оценки качества системы ТО и Р ТП позволяет оперативно реагировать на изменения условий функционирования силового электрооборудования ТП, а также определять наиболее эффективные стратегии ТО и Р электрооборудования ТП в условиях неопределенности функционирования дистанции электроснабжения. Научная новизна. В статье получил дальнейшее развитие метод системного подхода по повышению качества функционирования системы ТО и Р силового электрооборудования ТП в условиях неопределенности на основе экспертной информации. В этом направлении автор впервые предлагает: вариант формализованного документа оценки качества обслуживания силового электрооборудования ТП экспертами; выражение для определения интегрального показателя качества системы ТО и Р силового электрооборудования ТП, которое отсутствует в стандартах системы ТО и Р; матрицу качества системы с учетом этапов (методов) и направлений повышения качества обслуживания силового электрооборудования ТП. Данный метод дает возможность проводить экспертную оценку состояния

системи обслуговування, прогнозувати і вибрати раціональний варіант підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП з урахуванням технічних, організаційно-правових і фінансово-економічних заходів. Практична значимість. Удосконалення на електрифікованих залізничних дорогах України системи управління якістю ТО і Р ТП дозволить підвищити ефективність і якість системи технічного обслуговування силового електрообладнання ТП, а також запобігти виникненню або знизити тяжкість можливих відмов обладнання. На основі взаємозв'язків складових матриць якості системи ТО і Р сформульовані вирази для розрахунку інтегральних показників якості системи по напрямках і етапах для конкретного обладнання і системи в цілому. Встановлено, що при підвищенні якості ТО і Р електрообладнання швидкість змін змінюваного значення параметра x_i на i -м етапі в час експлуатації зменшується, при цьому середньоквадратичне відхилення параметра σ також зменшується, а ймовірність $P(t)$ безотказної роботи електрообладнання ТП збільшується. Бібл. 8, табл. 3.

Ключові слова: тягова підстанція, технічний стан обладнання, якість системи технічного обслуговування і ремонту, експертна інформація, нечіткі множини, інтегральний показник якості.

Стан проблеми. Актуальність. Якість системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) силового електрообладнання тягових підстанцій (ТП) електрифікованих залізниць може бути оцінена множиною різних показників (одиночних, групових, інтегральних), кожен з яких має кількісний або якісний характер. Зв'язки між показниками, якими описується процес організації та проведення ТО і Р ТП, мають складну структуру. У загальному випадку деякі показники можуть бути виражені через інші, які розташовані на одному або різних рівнях моделі процесу обслуговування й діагностування обладнання. Як показує теорія та практика діагностування [1, 2], дуже поширеним підходом аналізу даних діагностики обладнання є перехід від певної множини показників (найчастіше одиночних), значення яких можуть бути легко виміряні (обчислені) при великій їх кількості, до невеликого числа інтегральних показників, які функціонально пов'язані з вихідними. Основною метою переходу від множини одиночних показників у групові, а останніх в інтегральні є отримання значень показників, які характеризують інтегральні характеристики досягнутої якості системи ТО і Р (або) її окремих складових. Оцінка системи ТО і Р обладнання ТП визначається ступенем (повнотою) виконання вимог, які ставляться до системи ТО і Р. Для виконання такої оцінки необхідно здійснити формальну постановку завдання перетворення показників якості складових системи обслуговування в інтегральні.

Аналіз досліджень. У основу оцінки якості системи покладемо початкові експертні дані визначення рівня інтегрального показника якості системи. Для проведення експертизи створюється експертна група та надаються рекомендації з проведення експертизи [3]. З метою проведення експертизи для різного типу обладнання складається «Карта оцінки об'єкта експертизи». Для прикладу автор пропонує варіант формалізованого документа оцінки якості обслуговування електрообладнання ТП експертами (табл. 1).

У експертних дослідженнях, як правило, використовують три типи питань – закриті, відкриті й напіввідкриті. При відповіді на закриті питання можна вибрати відповідь лише із заздалегідь сформульованих складових анкети варіантів. У відповіді на відкрите питання викладається думка експерта у вільній формі. Напіввідкриті питання займають проміжне положення: окрім вибору із перерахованих у карті оцінки варіантів, можна додати свої міркування та думки.

Визначення рівня показника якості системи ТО і Р ТП може здійснюватися на основі бальних, лінгвіс-

тичних і інтервальних оцінок експертів, які виражаються в кількісній і/або якісній формі [3-5]. Шкала відповідності оцінок наведена в табл. 2.

Завдання експертної комісії – вибрати оптимальну стратегію системи ТО і Р ТП. Є два принципово різні підходи до його розв'язання [3].

Перший підхід базується на порівнянні існуючих систем ТО і Р. Наприклад, кожен з експертів вибирає систему відповідно до своїх міркувань. Отримані від експертів впорядкування (ранжування) обробляються тими чи іншими математичними методами з метою розрахунку підсумкової думки комісії експертів.

Другий підхід має на меті порівняти важливість різних показників якості системи ТО і Р та побудувати інтегральний показник якості (рейтингову оцінку), за допомогою якого можна упорядкувати розглянуті системи ТО і Р за якістю (розрахувати рейтинг систем).

У цьому випадку для обробки результатів експертних оцінок та визначення результуючих показників підвищення якості системи ТО і Р можна застосувати адитивний, мультиплікативний або максимінний результуючі показники [3, 6].

Адитивний показник є сумою зважених нормованих частинних показників підвищення якості системи ТО і Р ($\Pi_{\text{я}}$) та має вигляд

$$\Pi_{\text{я}} = \sum_{i=1}^m \alpha_i q_i, \quad (1)$$

де α_i – коефіцієнт відносної важливості напрямку підвищення якості системи обслуговування силового електрообладнання ТП; q_i – дійсне значення показників рівня виконання вимог підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП; $0 \leq \Pi_{\text{я}} \leq 1$,

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1.$$

Чим більше значення $\Pi_{\text{я}}$, тим більше він впливає на підвищення якості функціонування системи;

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i q_i = 1; \quad \alpha_i > 0; \quad i = 1, m.$$

Мультиплікативний показник утворюється шляхом перемноження частинних показників з урахуванням їх вагових коефіцієнтів і має вигляд

$$\Pi_{\text{я}} = \prod_i^m q_i^{\alpha_i}, \quad (2)$$

де q_i і α_i мають таке саме значення, що і в адитивному показнику.

Таблиця 1

Карта оцінки якості системи ТО і Р електрообладнання ТП		
Складові етапів (методів) експертизи	Варіанти оцінки	Напрями оцінки
1. Наукова значущість прийнятої стратегії системи ТО і Р силового електрообладнання ТП	1. Надзвичайно висока 2. Значна 3. Невисока 4. Невизначена (нині) 5. Відсутня	Технічні Економічні Організаційні
2. Практична значущість прийнятої стратегії обслуговування	1. Надзвичайно висока 2. Значна 3. Невисока 4. Невизначена (нині) 5. Відсутня	
3. Наукова новизна, оригінальність прийнятої стратегії обслуговування	1. Немає аналогів 2. Немає аналогів у країні, є за кордоном 3. Немає аналогів за кордоном, є в країні 4. Є відомості про окремі вітчизняні й зарубіжні аналоги 5. Наукова новизна відсутня	
4. Методи й способи досягнення мети підвищення якості системи ТО і Р	1. Нові 2. Сучасні 3. Традиційні 4. Застарілі 5. Неадекватні	
5. Потенціал виконавців проведення ТО і Р електрообладнання ТП	1. Достатній 2. Недостатній у частині наукового забезпечення (досвіду роботи) 3. Недостатній у частині матеріально-технічної бази 4. Недостатній у частині досвіду складу ремонтних бригад 5. Даних для оцінки недостатньо	
6. Термін виконання робіт з ТО і Р силового електрообладнання ТП	1. Реальний 2. Завищений 3. Занижений 4. Даних для оцінки недостатньо	
7. Вартість робіт (обсяг фінансування) з ТО і Р силового електрообладнання ТП	1. Прийнятна 2. Завищена 3. Занижена 4. Даних для оцінки недостатньо	
8. Рекомендації пріоритету заходів і робіт з підвищення якості системи ТО і Р ТП	1. Заходи (роботи) першочергової важливості 2. Заходи (роботи) високої важливості 3. Заходи (роботи) становлять певний інтерес 4. Заходи (роботи) становлять незначний інтерес, але заслуговують на підтримку за наявності достатніх засобів 5. Заходи (роботи) підтримки не заслуговують	
9. Підвищення експлуатаційної надійності силового електрообладнання ТП	1. Надзвичайно високе 2. Значне 3. Невисоке 4. Невизначено (нині) 5. Відсутній	
10. Контроль ефективності та якості системи ТО і Р ТП	1. Надзвичайно високий 2. Значний 3. Невисокий 4. Невизначений (нині) 5. Відсутній	
Тощо.....		

Таблиця 2

Шкала відповідності бальної, лінгвістичної та інтервальної оцінок		
Бальна оцінка	Лінгвістична оцінка	Інтервальна оцінка
5 – відмінно	(В) Повністю задовольняє вимоги	0,9–1
4 – добре	(ВС) Майже задовольняє	0,7–0,9
3 – задовільно	(С) Задовольняє в основному	0,5–0,7
2 – незадовільно	(НС) Не задовольняє	0,3–0,5
1 – повністю незадовільно	(Н) Повністю не задовольняє	0–0,3

Максимінний показник. У низці випадків вид результуючої цільової функції достатньо важко обґрунтувати або застосувати. У подібних випадках можливим простим шляхом розв'язання задачі є застосування максимінного показника. У цьому випадку правило вибору оптимальної системи підвищення якості ТО і Р ТП (S_0) має вигляд

$$\max(S \in M) \min(1 \leq i \leq m) \left\{ q_1^{a_i}(S), \dots, q_i^{a_i}(S), \dots, q_m^{a_m}(S) \right\}. \quad (3)$$

Максимінний показник підвищення якості системи ТО і Р забезпечує якнайкраще (найбільше) значення якнайгіршого (найменшого) з частинних показників якості.

Виклад матеріалу дослідження, отримання наукових результатів. Проте велика кількість показників рівня виконання вимог підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП може призвести до втрати об'єктивності визначення коефіцієнтів важливості α_i . Тому перспективним шляхом розв'язання цієї проблеми є визначення *інтегрального показника якості* ($I_{я}$) системи ТО і Р ТП з урахуванням коефіцієнтів важливості показників системи за напрямками, методами та етапами підвищення якості ТО і Р силового електрообладнання ТП.

Для визначення інтегрального показника якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП з урахуванням розглянутих умов та (1) автор вперше пропонує такий вираз:

$$I_{я} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot \sum_{j=1}^h \alpha_j q_{ikj} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot q_i + \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot q_k + \sum_{j=1}^h \alpha_j \cdot q_j \quad (4)$$

де $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$, $\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1$, $\sum_{j=1}^h \alpha_j = 1$ – коефіцієнти відносної важливості відповідно напрямків, методів та етапів підвищення якості системи обслуговування;

q_{ikj} – дійсне значення показників рівня виконання вимог підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП за напрямками, методами та етапами. Такий показник оцінки якості системи ТО і Р відсутній у стандарті [7].

Згідно із запропонованими складовими визначення інтегрального показника якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП (4), побудуємо матрицю якості системи (табл. 3) з урахуванням етапів (методів), напрямків підвищення якості обслуговування силового електрообладнання ТП (див. табл. 1).

На основі взаємозв'язків складових матриці якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП, які наведені в табл. 2, сформуємо вирази для розрахунку інтегральних показників якості системи за напрямками й етапами для обладнання (1, 2...N) та системи в цілому, згідно з формулами (1) та (4):

1. $I_{я111} = q_{111} \cdot \alpha_{111}$ – інтегральний показник якості системи ТО і Р при обслуговуванні *обладнання 1* ТП, за умови виконання рівня вимог підвищення якості за етапом 1 та технічним напрямком.

2. $I_{я22} = q_{221} \cdot \alpha_{221} + q_{222} \cdot \alpha_{222} + q_{223} \cdot \alpha_{223}$ – інтегральний показник якості системи ТО і Р при обслуговуванні *обладнання 2* ТП, за умови виконання рівня вимог підвищення якості за етапом 2 та технічним, економічним, організаційним напрямками.

3. $I_{яN} = q_{1n1} \cdot \alpha_{1n1} + \dots + q_{mn3} \cdot \alpha_{mn3}$ – інтегральний показник якості системи ТО і Р при обслуговуванні *обладнання N* ТП, за умови виконання рівня вимог підвищення якості за етапами 1÷M та технічним, економічним, організаційним напрямками.

4. $I_{я, \text{системи ТО і Р}} = I_{я1} \cdot \alpha_{\text{облад.1}} + I_{я2} \cdot \alpha_{\text{облад.2}} + \dots + I_{яN} \times \alpha_{\text{облад.N}}$ – інтегральний показник якості системи ТО і Р при обслуговуванні *обладнання 1÷N* ТП, за умови виконання рівня вимог підвищення якості за етапами 1÷M та технічним, економічним, організаційним напрямками.

Таблиця 3

Матриця якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП

Етапи підвищення якості ТО і Р ТП	Обладнання 1			Обладнання 2				Обладнання <i>N</i>		
	Напрямки підвищення якості ТО і Р облад- нання 1			Напрямки підвищення якості ТО і Р облад- нання 2				Напрямки підвищення якості ТО і Р облад- нання <i>N</i>		
	<i>010</i>			<i>020</i>				<i>0n0</i>		
	Технічні	Економічні	Організаційні	Технічні	Економічні	Організаційні		Технічні	Економічні	Організаційні
1. <i>(100)</i>	<i>I_я (111)</i>	<i>I_я (112)</i>	<i>I_я (113)</i>	<i>I_я (121)</i>	<i>I_я (122)</i>	<i>I_я (123)</i>		<i>I_я (1n1)</i>	<i>I_я (1n2)</i>	<i>I_я (1n3)</i>
2. <i>(200)</i>	<i>I_я (211)</i>	<i>I_я (212)</i>	<i>I_я (213)</i>	<i>I_я (221)</i>	<i>I_я (222)</i>	<i>I_я (223)</i>		<i>I_я (2n1)</i>	<i>I_я (2n2)</i>	<i>I_я (2n3)</i>
.....										
<i>M.</i> <i>(M00)</i>	<i>I_я (m11)</i>	<i>I_я (m12)</i>	<i>I_я (m13)</i>	<i>I_я (m21)</i>	<i>I_я (m22)</i>	<i>I_я (m23)</i>		<i>I_я (mn1)</i>	<i>I_я (mn2)</i>	<i>I_я (mn3)</i>

Як бачимо, згідно зі сформованими виразами можна розрахувати інтегральні показники якості системи ТО і Р при обслуговуванні:

- обладнання 1÷N ТП за будь-яким напрямком та

вибраним етапом;

- обладнання 1÷N ТП за усіма напрямками та вибраним етапом;
- обладнання 1÷N ТП за усіма напрямками та етапами;

• системи ТО і Р силового електрообладнання ТП за усіма етапами та напрямками – 111÷mn3 (табл. 1).

Розглянемо можливі варіанти представлення експертних даних і відповідні їм методики розрахунку кількісного інтегрального показника рівня підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП [3, 8]:

1. Ступінь виконання кожної вимоги підвищення якості системи ТО і Р визначається як: вимога виконана $q_i = 1$; вимога не виконана $q_i = 0$, $i = 1, m$. Коли ступінь виконання визначається з урахуванням важливості кожної вимоги, інтегральний показник оцінки рівня якості оцінюється співвідношеннями (1) та (4).

2. Ступінь оцінки виконання вимог при оцінці за бальною шкалою (табл. 2). Наприклад, у найбільш поширеній 5-бальній шкалі: $b_i = 5$ – відмінно; $b_i = 4$ – добре; $b_i = 3$ – задовільно; $b_i = 2$ – незадовільно; $b_i = 1$ – повністю незадовільно.

Для оцінки (прогнозування) якості системи ТО і Р бальну оцінку запишемо таким чином: відмінно – якість системи повністю задовольняє вимоги; добре – майже задовольняє; задовільно – задовольняє в основному; незадовільно – не задовольняє; повністю незадовільно – повністю не задовольняє.

Коли ступінь виконання вимог при оцінці за бальною шкалою визначається з урахуванням важливості кожної вимоги a_j , тоді показник оцінки рівня підвищення якості системи ТО і Р визначається з виразу

$$B_{\text{я}} = \sum_{j=1}^m a_j b_j, \quad (5)$$

де $1 \leq B_{\text{я}} \leq 5$, $0 \leq a_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^m a_j = 1$.

Дуже часто при бальній оцінці рівня виконання вимог зручно підсумкову оцінку мати в шкалі від 0 до 1 ($0 < I_{\text{я}} < 1$). У зв'язку з цим сформуємо шкалу відповідності: $B_{\text{я}} = I_{\text{я}}$, $b_j = q_j$, $j = 1, \bar{m}$.

Розрахунок інтегрального показника оцінки рівня підвищення якості системи ТО і Р виконується згідно з (1) та (4).

3. Розрахунок показника підвищення якості системи ТО і Р із застосуванням лінгвістичної змінної.

Наприклад, лінгвістична змінна «Показник якості системи ТО і Р» визначена на універсальній множині варіантів: u_j ; $j = 1, \bar{n}$. Рівень показника оцінюватимемо термами В, ВС, С, НС, Н, наведеними в табл. 2.

Нехай експертним шляхом отримані функції належності вимог до системи ТО і Р заданому рівню якості $\mu(u_{ij})$. Тоді, використовуючи співвідношення (4), (5), можна отримати інтегральний показник якості системи ТО і Р ТП електропостачання залізниць

$$B_{\text{я}} = \sum_{j=1}^m a_j \sum_{b_j=1}^5 b_j \mu(u_i b_i). \quad (6)$$

Розглянемо питання залежності експлуатаційної надійності силового електрообладнання ТП від якості системи ТО і Р. Багаторічний досвід експлуатації обладнання ТП підтверджує, що якість ТО і Р здійснює вплив на безвідмовність роботи обладнання як при раптовій відмові, так і при поступовому накопиченні відмов. У зв'язку з цим загальну ймовірність безвідмовної роботи обладнання можна виразити як

$$P(t) = P_k(t) \cdot P_m(t), \quad (7)$$

де $P_k(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи електрооб-

ладнання ТП, яка зумовлюється наявністю елементів обладнання, відмови яких є раптовими та можуть бути усунені підвищенням якості ТО і Р; $P_m(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи електрообладнання ТП при поступовому накопиченні відмов елементів обладнання, яким можна запобігти підвищенням якості ТО і Р за рахунок зниження швидкості зміни параметра, який визначає працездатність електрообладнання.

Для розрахунку $P(t)$ у першому наближенні можна прийняти нормальний закон розподілу оцінки безвідмовної роботи [2]

$$P(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (8)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення параметра; x – вимірне значення параметра; $\bar{x}$ – середнє значення параметра (математичне сподівання).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

де x_i – вимірне значення параметра на i -му кроці; n – кількість вимірювань параметра.

Аналіз отриманих розрахункових виразів дозволяє зробити висновок, що при зменшенні швидкості зміни вимірюваного значення параметра x_i на i -му кроці під час експлуатації за рахунок підвищення якості ТО і Р електрообладнання ТП середньоквадратичне відхилення параметра σ також буде зменшуватись, а ймовірність $P(t)$ безвідмовної роботи електрообладнання ТП буде збільшуватись.

Висновки. Розроблена методика та метод оцінки якості системи ТО і Р електрообладнання ТП дозволяє: оперативно реагувати на зміни умов функціонування силового електрообладнання ТП; визначати найбільш ефективні стратегії ТО і Р електрообладнання ТП в умовах невизначеності функціонування дистанції електропостачання; задавати (імітувати) різні умови експлуатації обладнання ТП для вибору оптимального варіанта обслуговування та досягнення необхідного рівня якості системи ТО і Р; контролювати стан удосконалення системи; визначати рівень дійсного інтегрального показника якості системи.

У статті автор вперше пропонує: варіант формалізованого документа оцінки якості обслуговування силового електрообладнання ТП експертами; вираз для визначення інтегрального показника якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП, який відсутній у стандартах системи ТО і Р; матрицю якості системи з урахуванням етапів (методів) та напрямків підвищення якості обслуговування силового електрообладнання ТП. Цей метод дозволяє виконувати експертну оцінку стану системи обслуговування та прогнозувати й вибрати раціональний варіант підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП з урахуванням не тільки технічних, але й організаційно-правових та фінансово-економічних заходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рассальский А.Н., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Гук А.А. Основные принципы непрерывного контроля

высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа под рабочим напряжением // *Электромеханика и энергосберегающие системы*. – 2009. – № 2. – С. 53-55.

2. Матусевич О.О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій : монографія. – Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295 с.

3. Панков Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман Н.В. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. – М.: Наука, 1984. – 214 с.

4. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.

5. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования. – Рига: Знание, 1990. – 184 с.

6. Матусевич О.О. Методика проведення експертизи оцінки надійності функціонування системи автоматизованого керування тягового електропостачання електричного транспорту // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. – 2009. – №28. – С. 42-44.

7. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения – М.: Стандартиформ, 2007. – 12 с.

8. Матусевич О.О. Методи підвищення надійності функціонування системи керування тягового електропостачання електричного транспорту на основі експертної інформації // *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – 2009. – №26. – С. 63-66.

REFERENCES

1. Rassalsky A.N., Sakhno A.A., Konogray S.P., Spitsa A.G., Guk A.A. The basic principles of continuous monitoring of high-voltage oil-filled electrical isolation condenser type under operating voltage. *Elektromekhanichni i enerhohzberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2009, no.2, pp. 53-55. (Rus).
2. Matuskevych O.O. *Udoskonalennia metodolohii systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu tiahovykh pidstantsii : monohrafiia* [Improving the system of maintenance and repair of traction substations: Monograph]. Dnipropetrovsk, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Publ., 2015. 295 p. (Ukr).
3. Pankov L.A., Petrovsky A.M., Schneiderman N.V. *Organizatsiia ekspertizy i analiz ekspertnoi informatsii* [Organization of examination and analysis of expert information]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 214 p. (Rus).
4. Kruglov V.V. *Nechetkaia logika i iskusstvennye seti* [Fuzzy logic and artificial networks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 221 p. (Rus).
5. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Priniatie resheniia na osnove nechetkikh modellei: primery ispol'zovaniia* [Making a decision based on fuzzy models usage examples]. Riga, Znanie Publ., 1990. 184 p. (Rus).
6. Matuskevych O.O. The method of reliability estimation of the automated control system functioning of traction power supply of electric transport. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2009, no.28, pp. 42-44. (Ukr).
7. GOST 18322-78. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta tekhniki. Terminy i opredeleniia* [State Standard 18322-78. System maintenance and repair of equipment. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2007. 12 p. (Rus).
8. Matuskevych O.O. Methods of improving the reliability of the control system traction power supply of electric transport based on an expert information. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2009, no.26, pp. 63-66. (Ukr).

Надійшла (received) 30.11.2015

Матусевич Олександр Олександрович, к.т.н., доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 49069, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, тел/phone +38 067 6367851, e-mail: al_m0452@meta.ua

O.O. Matuskevych

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, 49069, Ukraine.

Methodology of determination of quality index of maintenance service system of power equipment of traction substations.

Purpose. The purpose of this paper is development of methodology for definition of a quality system of maintenance and repair (M and P) power equipment of traction substations (TS) of electrified railways operating under conditions of uncertainty based on expert information. **Methodology.** The basic tenets of the theory of fuzzy sets and marks, linguistic and interval estimates of experts were applied to solve this problem. **Results.** Analysis of the existing diversity of approaches to development of modern methods of improvement of M and P allows us to conclude that the improvement in the quality of the system is achieved by solving individual problems increase the operational reliability of power equipment of traction substations in the following main interrelated areas. There are technical, economic and organizational. The basis of the quality evaluation system is initial data and expertise developed version of the document formalized quality evaluation of electrical equipment of traction substations by experts. The choice of determining the level of Quality service system based on the marks, linguistic and interval estimates of experts, which are reflected in quantitative and / or qualitative form was done. The possible options for expert data presentation and their corresponding quantitative methods of calculating the integral index of quality improvement system maintenance and P of traction substations were described. The methodology and the method of assessing the quality of system maintenance and P of TS allows quickly respond to changing operating conditions of power equipment of traction substations, and to determine the most effective strategies for maintenance of electrical and P TS under conditions of uncertainty functioning distance electricity. **Originality.** The method of a systematic approach to improve the quality of the system maintenance and P of power equipment of traction substation under conditions of uncertainty based on expert information was further developed. The author offers a number of options at first time. There are version of the document formalized quality evaluation of power equipment of traction substations by experts; expression to define the integral Quality systems maintenance and electrical power P TS, which is absent in the standard system maintenance and P; matrix of quality system with regard to steps (methods) and ways of increasing service quality electrical power control systems. This method makes it possible to conduct an expert assessment of the maintenance system and to predict and select the option rational system of quality improvement and maintenance of power equipment of traction substations considering not only technical but also organizational, legal, financial and economic measures. **Practical value.** Improvement on electrified railways of Ukraine quality management system maintenance and P TS will improve the efficiency and quality of maintenance of power equipment and provide TA prevent or reduce the severity of possible equipment failures. Based on the relationships matrix components as systems maintenance and electrical power P TP were formed expressions calculating quality indices of integrated systems with directions and stages for specific equipment and systems in general. It was determined that an increase in the quality and maintenance of electrical PR, the rate of change of the measured value at step k during operation is reduced while the standard deviation parameter is also reduced, and the probability of electrical TA increases. References 8, tables 3.

Key words: traction substation, technical condition of equipment, quality system of maintenance and repair, expert information, fuzzy sets, integral indicator of quality.

А.Н. Мороз, Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина, А.В. Холод

НЕЙРО-СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

У статті сформована нейро-фаззі мережа з урахуванням температурного моніторингу повітряної лінії. Відмінною особливістю, запропонованої мережі, є можливість обробки інформації, яку задано в різних шкалах вимірювання, і висока швидкодія для прогнозування режимів роботи електричної мережі. Бібл. 10, рис. 1.

Ключові слова: електрична мережа, нейромережа, нейро-фаззі мережа, температурний моніторинг повітряної лінії, прогнозування режимів роботи електричної мережі.

В статье сформирована нейро-фаззи сеть с учетом температурного мониторинга воздушной линии. Отличительной особенностью, предложенной сети, являются возможность обработки информации, заданной в разных шкалах измерения, и высокое быстродействие для прогнозирования режимов работы электрической сети. Библ. 10, рис. 1.

Ключевые слова: электрическая сеть, нейросеть, нейро-фаззи сеть, температурный мониторинг воздушной линии, прогнозирование режимов работы электрической сети.

Введение. Важным фактором, влияющим на режим работы электрических сетей (ЭС), является возрастание нагрузки и старение электросетевого оборудования, что характерно и для большинства промышленно развитых стран мира. Пропускная способность ЭС с течением времени снижается за счёт разветвлённости и усложнения конфигурации сети. Данный факт приводит к увеличению нагрузки воздушных линий (ВЛ), как магистральных, так и распределительных. Отсутствие информации о реальных параметрах ВЛ заставляет использовать приближенные к реальности расчеты допустимых режимов работы сети. В большинстве случаев они не соответствуют действительному состоянию режимов работы сетей, что ведет к значительному уменьшению транзитных потоков мощности и перегрузке элементов ЭС.

Для устранения недопустимой перегрузки элементов ЭС предусмотрены средства противоаварийной автоматики. Устройства автоматического ограничения перегрузки ВЛ предназначены для противоаварийного управления, включающего в себя: изменение конфигурации ЭС, отключение части потребителей электрической энергии, категория надёжности которых допускает перерыв электроснабжения, отключение ВЛ.

Основное требование к таким устройствам – селективность действия, т.е. автоматика должна действовать только в недопустимых режимах работы, не ограничивая пропускную способность ЭС. Спрогнозировать пропускную способность ЭС возможно на основе реальной и накопленной информации о ее параметрах.

Анализ последних публикаций. Как показал анализ научных информационных источников, задачи прогнозирования потребления электроэнергии решаются практически всеми организациями, связанными с производством и её распределением. Для решения этих задач используются как традиционные методы прогнозирования (регрессионный, корреляционный, спектральный анализы, подход Бокса-Дженкинса, экспоненциальное сглаживание, адаптивные предикторы и т.п.), так и более «продвинутые» подходы, основанные на интеллектуальном анализе данных – Data Mining [1].

Преимущество традиционных подходов состоит в простоте применения прогнозирующих моделей и

наличии доступного программного обеспечения. Однако, в силу того, что связи между потреблением электроэнергии и влияющими на него факторами зачастую носят сложный нелинейный характер, в рамках указанных подходов получить приемлемые по точности прогнозы удастся далеко не всегда [2].

Существенные трудности при использовании систем вычислительного интеллекта возникают в случае, когда часть обрабатываемой информации задана не в количественной, а в порядковой или номинальной шкалах. Ставшие уже традиционными нейро- и нейро-фаззи сети плохо приспособлены к обработке информации вида «плохая, нормальная, хорошая погода», «сильный или слабый ветер», «облачно – туманно – морозно» и т.п. [3].

В связи с этим предлагается синтез прогнозирующей нейро-фаззи сети, способной к восприятию данных в разных шкалах и алгоритма ее обучения, обладающего высокой скоростью сходимости и способностью к обработке информации по мере ее поступления в реальном времени [4].

Эффективной альтернативой может служить подход, основанный на применении методов вычислительного интеллекта и, прежде всего, искусственных нейронных сетей и систем нечеткого вывода. Эффективность этих систем связана с их универсальными аппроксимирующими возможностями и способностью к обучению непосредственно в процессе прогнозирования.

На сегодня эти методы подтвердили свою эффективность при решении широкого круга задач, связанных с прогнозированием в электроэнергетике [5-7].

Методы прогнозирования электрической нагрузки ЭС, архитектура которых основанная на базе гибридных нейроподобных элементов с блоком оценивания точности, в значительной мере позволяет получить результаты максимально приближенные к реальным данным. Но учитывая значительное влияние условий окружающей среды (скорость и направление ветра, температура среды и т.д.) на пропускную способность ВЛ, существует необходимость в насыщении количественными и порядковыми переменными скрытого слоя, для более достоверного прогноза допустимого режима ЭС [7-9].

© А.Н. Мороз, Н.М. Черемисин, В.В. Черкашина, А.В. Холод

Система мониторинга параметров ВЛ станет инструментом измерения температуры провода, что позволит на основе ретроспективного анализа накопленной информации о параметрах ВЛ прогнозировать термическую стойкость линии и в результате проводить расчет допустимой нагрузки в реальном времени.

Цель статьи – сформировать нейро-фаззи сеть с учетом температурного мониторинга воздушной линии для прогнозирования режимов работы электрической сети.

Основные материалы исследования. Для прогнозирования допустимой нагрузки ВЛ предлагается применение архитектуры нейро-фаззи сети с учетом температурного мониторинга ВЛ.

Предлагаемая нейро-фаззи сеть имеет четырехслойную архитектуру с прямой передачей информации. Для создания полносвязной архитектуры сети на базе гибридных нейроподобных элементов с блоком оценивания точности выполнены два этапа процедур:

- первым этапом генерируется основная сеть (без блока оценивания точности);
- на втором этапе фиксируется архитектура и параметры сети, полученные в ходе выполнения первого этапа, и к ней добавляется блок оценивания точности, входными сигналами которого становятся все входные, внутренние и выходные сигналы основной сети, а также дополнительные входные сигналы (при необходимости).

С нулевого слоя информация поступает на первый скрытый слой задержек и фаззификации входных сигналов. В этом слое формируется предыстория прогнозируемого сигнала, а также функции принадлежности факторов, которые заданы в различных шкалах измерений. С выхода этого слоя информация в числовой форме поступает на второй и третий скрытые слои, которые сформированы из однотипных элементарных нейронов Розенблатта. Выходной слой образован единственным нейроном с нелинейной функцией активации, на выходе которого и формируется прогнозируемый сигнал [9, 10].

Добавление блока оценивания точности значительно расширяет эксплуатационные возможности сети за счет добавления к точечным аппроксимациям оценок их ожидаемой точности, что снижает уровень неопределенности в процессе дальнейшего принятия решений.

На вход первого скрытого слоя подается информация:

- количественные переменные:
 - текущее значение прогнозируемого сигнала $y(k)$ (здесь $k = 0, 1, 2, \dots, N$ имеет смысл текущего дискретного времени, N – длина выборки);
 - температура воздуха;
- порядковые переменные:
 - относительная влажность в форме «низкая – средняя – высокая»;
 - скорость ветра в форме «штиль – слабый – сильный – ураганный»;
 - облачность в форме «ясно – переменная – плотная»;
 - номер часа в сутках: 0, 1, 2, ..., 23;
 - день недели в форме «понедельник – вторник – ... – воскресенье»;

- номинальные переменные:

- тип дня в форме «рабочий – выходной – праздничный – региональный праздник – перенесенный выходной – перенесенный рабочий»;

- тип погоды в форме «без осадков – туман – дождь – снег».

Переменные предварительно кодируются в интервал $[0, 1]$ следующим образом:

$$\tilde{x}_l = \frac{\hat{x}_l - \hat{x}_{l\min}}{\hat{x}_{l\max} - \hat{x}_{l\min}}, \quad (1)$$

$$\hat{x}_l = \hat{x}_{l\max}\tilde{x}_l - \hat{x}_{l\min}(\tilde{x}_l - 1), \quad (2)$$

где $\hat{x}_l$ – значение l -й входной переменной в исходной шкале измерений: МВт·ч, °С; $\tilde{x}_l$ – кодированное значение l -й входной переменной; $\hat{x}_{l\min}$, $\hat{x}_{l\max}$ – минимальное и максимальное значение l -й входной переменной в исходной шкале.

Далее, в первом скрытом слое с помощью элементов задержки z^{-1} формируется предыстория прогнозируемого сигнала вида $y(k-1)$, $y(k-2)$, $y(k-24)$, $y(k-48)$, $y(k-168)$, $y(k-336)$, которая подается на второй скрытый слой в виде набора $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$, $x_4(k)$, $x_5(k)$, $x_6(k)$, при этом в зависимости от горизонта упреждения могут использоваться и другие значения задержек, отличные от указанных выше [8-10].

Далее в этом же слое производится фаззификация сигналов температуры воздуха, номера часа в сутках, относительной влажности, скорости ветра, облачности и дня недели с помощью треугольных функций принадлежности, равномерно распределенных в интервале $[0, 1]$ и которые имеют вид:

$$\mu_{l1} = \frac{c_{l2} - \tilde{x}_l}{c_{l2}}, \quad \tilde{x}_l \in [0, c_{l2}], \quad (3)$$

$$\mu_{li} = \begin{cases} \frac{\tilde{x}_l - c_{l,i-1}}{c_{li} - c_{l,i-1}}, & \tilde{x}_l \in [c_{l,i-1}, c_{li}] \\ \frac{c_{l,i+1} - \tilde{x}_l}{c_{l,i+1} - c_{li}}, & \tilde{x}_l \in [c_{li}, c_{l,i+1}] \\ i = 2, \dots, p_l - 1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{p_l} = \frac{\tilde{x}_l - c_{l,p_l-1}}{1 - c_{l,p_l-1}}, \quad \tilde{x}_l \in [c_{l,p_l-1}, 1], \quad (5)$$

где c_{li} – расположение центра i -й функции принадлежности l -й переменной, p_l – количество функций принадлежности l -й переменной.

Архитектура прогнозирующей нейро-фаззи сети с учетом параметров провода ВЛ показана на рис. 1.

В результате обработки исходных данных в первом скрытом слое формируется набор выходных сигналов $o_1^{[1]}$, $o_2^{[1]}$, ..., $o_n^{[1]}$, которые далее подаются на второй скрытый слой в форме $(n+1) \times 1$ -вектора

$$x^{[2]} = [1, o_1^{[1]}, o_2^{[1]}, \dots, o_n^{[1]}]^T, \quad (6)$$

где единичная компонента необходима для оценки смещения каждого из нейронов последующих слоев.

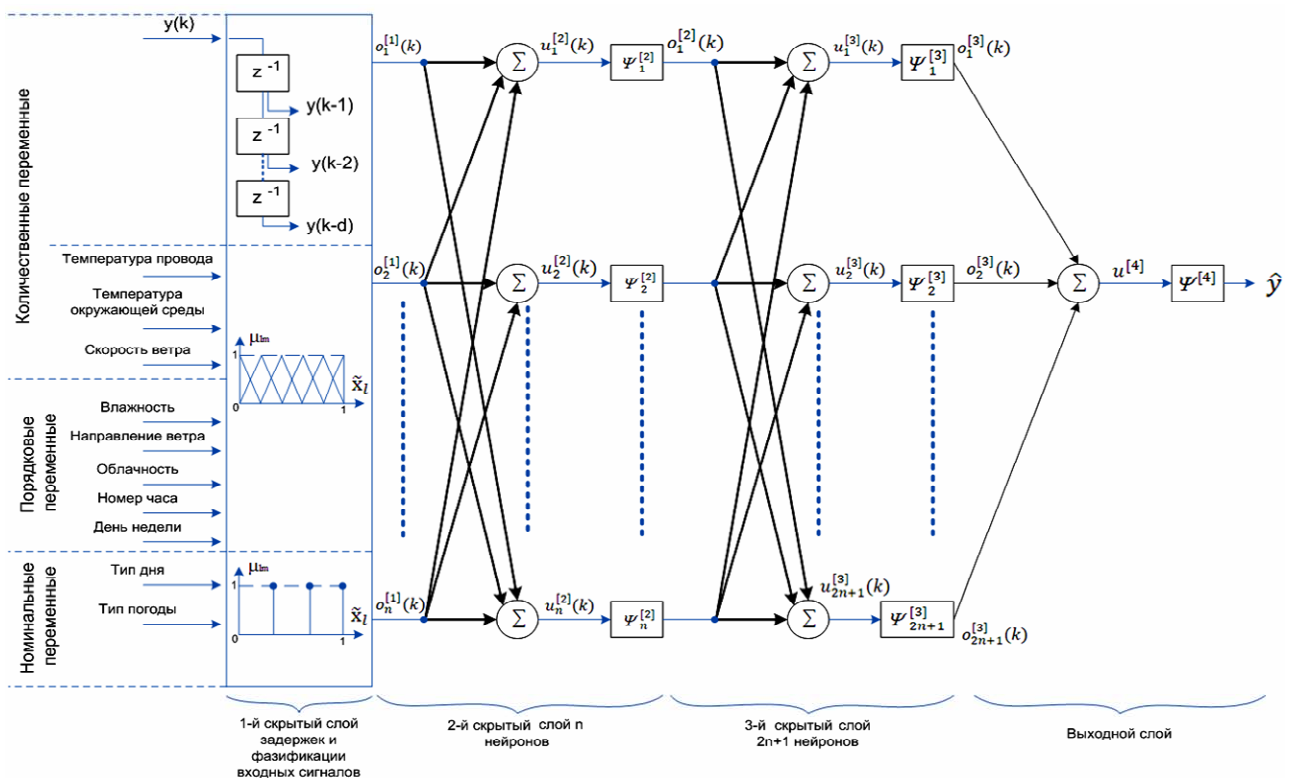


Рис. 1. Архитектура прогнозирующей многослойной нейро-фаззи сети

Второй скрытый слой предлагаемой нейро-фаззи сети содержит n однотипных нейронов с нелинейными сигмоидальными функциями активации $\psi_j^{[2]}$, $j = 1, 2, \dots, n$ и содержит $n(n+1)$ настраиваемых синаптических весов $w_{ji}^{[2]}$. Выходной сигнал j -го нейрона второго скрытого слоя имеет вид

$$o_j^{[2]} = \psi_j^{[2]}(u_j^{[2]}) = \psi_j^{[2]} \left(\sum_{i=0}^n w_{ji}^{[2]} x_i^{[2]} \right), \quad (7)$$

где $w_{j0}^{[2]} \equiv \theta_j^{[2]}$ – уровень смещения j -го нейрона, а выходной сигнал слоя:

$$o^{[2]} = \Psi^{[2]}(W^{[2]} x^{[2]}), \quad (8)$$

где $o^{[2]} - (n \times 1)$ – векторный сигнал, передаваемый на третий скрытый слой в виде $x^{[3]} = (1, o^{[2]T})^T$, $\Psi^{[2]} = \text{diag}\{\psi_j^{[2]}\}$ – $(n \times n)$ – матричная активационная функция, $W^{[2]} - n \times (n+1)$ – матрица настраиваемых синаптических весов.

Третий скрытый слой содержит $2n+1$ нейронов и формирует сигналы вида

$$o_j^{[3]} = \psi_j^{[3]}(u_j^{[3]}) = \psi_j^{[3]} \left(\sum_{i=0}^n w_{ji}^{[3]} x_i^{[3]} \right), \quad (9)$$

$$o^{[3]} = \Psi^{[3]}(W^{[3]} x^{[3]}), \quad (10)$$

где $\Psi^{[3]} = \text{diag}\{\psi_j^{[3]}\}$ – $((2n+1) \times (2n+1))$ – матричная активационная функция, $W^{[3]} - ((2n+1) \times (n+1))$ – матрица настраиваемых синаптических весов, $o^{[3]} - ((2n+1) \times 1)$ – векторный сигнал, передаваемый на выходной слой в виде

$$x^{[4]} = (1, o^{[3]T})^T.$$

Выходной слой сети образован единственным нейроном, формирующим скалярный сигнал прогноза

$$\hat{y} = \psi^{[4]}(u^{[4]}) = \psi^{[4]} \left(\sum_{i=0}^{2n+1} w_i^{[4]} x_i^{[4]} \right) = \psi^{[4]}(w^{[4]T} x^{[4]}), \quad (11)$$

где $w^{[4]} - ((2n+2) \times 1)$ – вектор настраиваемых синаптических весов.

Объединяя выражения (9-11), передаточная функция сети в целом имеет вид:

$$\hat{y} = \psi^{[4]}(w^{[4]T} \Psi^{[3]}(W^{[3]} \Psi^{[2]}(W^{[2]} x^{[2]}))). \quad (12)$$

Предлагаемый в статье подход обеспечивает высокую точность прогнозирования в условиях изменчивости и стохастичности исходных данных для прогнозирования набора взаимосвязанных временных рядов, описывающих потребление электрической энергии в пределах нескольких областей одной территории, входящих в единую энергосистему.

Выводы. Сформирована нейро-фаззи сеть с учетом температурного мониторинга воздушной линии. Отличительной особенностью, предложенной сети, являются возможность обработки информации, заданной в разных шкалах измерения, и высокое быстродействие для прогнозирования режимов работы электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов А.Н., Вендров А.М., Иванов В.К. Системы управления базами данных и знаний. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 352 с.
2. Kenneth C. Sevcik. Priority scheduling disciplines in queueing network models of computer systems. In Proceedings of IFIP Congress'77. August 8-12, 1977, Toronto, Canada, pp. 565-570.
3. V. Mainkar, K.S. Trivedi. Approximate analysis of priority scheduling systems using stochastic reward nets. In Proceedings of the 13th International Conference on Distributed Computing Systems ICDCS'93. May 1993, Pittsburgh, PA, USA, pp. 466-473. doi: 10.1109/icdcs.1993.287678.

4. Leonard Kleinrock. *Queueing Systems. Volume 8: Computer Applications*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1976.
5. Попов С.В., Черемисин М.М., Пархоменко О.В., Шкуро К.А. Нейромрежевий метод прогнозування аварійних ситуацій внаслідок утворення ожеледі на повітряних лініях електропередачі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С. 161-163.
6. Попов С.В., Шкуро К.А., Черемисин Н.М., Пархоменко О.В. Гибридный метод прогнозирования гололедной нагрузки на ВЛ // Энергетика та електрифікація. – 2013. – №5. – С. 33-38.
7. Круглов В.В. Методы прогнозирования многомерных временных рядов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №2. – С. 62-66.
8. Попов С.В., Шкуро К.А. Эволюционная нейро-фаззи сеть на базе гибридных нейроподобных элементов // 17 міжн. конф. з автоматичного управління «Автоматика-2010». Тези доповідей. Т. 2. – Харків, 2010. – С. 193-194.
9. Попов С.В. Специализированные архитектуры искусственных нейронных сетей на базе гибридных нейроподобных элементов // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2009. – Т.2. – №33. – С. 76-82.
10. Титов Н.Н. Повышение надежности и качества функционирования автоматизированных систем диспетчерского управления электроэнергетическими системами. – Харьков: Факт, 2013. – 200 с.

REFERENCES

1. Naumov A.N., Vendrov A.M., Ivanov V.K. *Sistemy upravleniia bazami dannyykh i znaniy* [Database management systems and knowledge]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1991. 352 p. (Rus).
2. Kenneth C. Sevcik. Priority scheduling disciplines in queueing network models of computer systems. In *Proceedings of IFIP Congress'77*. August 8-12, 1977, Toronto, Canada, pp. 565-570.
3. V. Mainkar, K.S. Trivedi. Approximate analysis of priority scheduling systems using stochastic reward nets. In *Proceedings of the 13th International Conference on Distributed Computing Systems ICDCS'93*. May 1993, Pittsburgh, PA, USA, pp. 466-473. doi: 10.1109/icdcs.1993.287678.
4. Leonard Kleinrock. *Queueing Systems. Volume 8: Computer Applications*. John Wiley and Sons, New York, USA, 1976.
5. Popov S.V., Cheremisin M.M., Parkhomenko O.V., Shkuro K.A. Neural network method for predicting accidents due to formation of ice on power lines overhead. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2012, no.1, pp.161-163. (Ukr).
6. Popov S.V., Shkuro K.A., Cheremisin N.M., Parkhomenko O.V. A hybrid method of predicting ice load on power lines overhead. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energetic and electrification*, 2013, no.5, pp. 33-38. (Rus).
7. Kруглов В.В. Methods of forecasting multivariate time series. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika – Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics*, 2005, no.2, pp. 62-66. (Rus).
8. Popov S.V., Shkuro K.A. Evolutionary neuro-fuzzy network based on hybrid neural elements. *17 mizhn. konf. z avtomatychnoho upravlinnia «Avtomatika-2010»*. Tezy dopovidei [Proceedings of 17th Int. Conf. of Automatic Control «Automation 2010»]. Kharkiv (Ukraine), 2010, vol.2, pp. 193-194. (Rus).
9. Popov S.V. Specialized architecture of artificial neural networks based on hybrid neural elements. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo hirnychoho universytetu – The collection of scientific works of National Mining University*, 2009, vol.2, no.33, pp. 76-82.

10. Titov N.N. *Povyshenie nadezhnosti i kachestva funktsionirovaniia avtomatizirovannykh sistem dispetcherskogo upravleniia elektroenergeticheskimi sistemami* [Improving the reliability and quality of the functioning of the automated systems of dispatching management of power systems]. Kharkov, Fakt Publ., 2013. 200 p. (Rus).

Поступила (received) 20.10.2015

Мороз Александр Николаевич¹, д.т.н., проф.,
Черемисин Николай Михайлович¹, к.т.н., проф.,
Черкашина Вероника Викторовна², к.т.н., доц.,
Холод Андрей Владимирович³, инженер,

¹ Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. П. Василенко,
61052, Харьков, ул. Энгельса, 19,
e-mail: moroz-fekt@inbox.ru, cheremisin.energy@rambler.ru

² Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: cherk34@rambler.ru

³ ЧАО «ЭЛАКС»,
61085, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 1, корпус 12,
e-mail: underholod@mail.ru

A.N. Moroz¹, N.M. Cheremisin¹, V.V. Cherkashina², A.V. Kholod³

¹ Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of
Agriculture,
19, Engelsa Str., Kharkiv, 61052, Ukraine.

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³ Company «ELAKS»,
1, build. 12, Ac. Proskura Str., Kharkiv, 61085, Ukraine.

Neural network modeling in problems of prediction modes of electrical grids.

Purpose. Form a neuro-fuzzy network based on temperature monitoring of overhead transmission line for the prediction modes of the electrical network. **Methodology.** To predict the load capacity of the overhead line architecture provides the use of neuro-fuzzy network based on temperature monitoring of overhead line. The proposed neuro-fuzzy network has a four-layer architecture with direct transmission of information. To create a full mesh network architecture based on hybrid neural elements with power estimation accuracy of the following two stages of the procedure: - in the first stage a core network (without power estimation accuracy) is generated; - in the second stage architecture and network parameters are fixed obtained during the first stage, and it is added to the block estimation accuracy, the input signals which are all input, internal and output signals of the core network, as well as additional input signals. **Results.** Formed neuro-fuzzy network based on temperature monitoring of overhead line. **Originality.** A distinctive feature of the proposed network is the ability to process information specified in the different scales of measurement, and high performance for prediction modes mains. **Practical value.** The monitoring system will become a tool parameter is measuring the temperature of the wire, which will, based on a retrospective analysis of the accumulated information on the parameters to predict the thermal resistance of the HV line and as a result carry out the calculation of load capacity in real time. References 10, figures 1.

Key words: electric grid, neural grid, neuro-fuzzy grid, temperature monitoring of air electric line, prediction modes of electric grid.

Ю.А. Сиротин, Т.С. Иерусалимова

УРАВНЕНИЯ МГНОВЕННЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ 3-ФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для 3-фазной схемы электропоставки рассмотрены несинусоидальные режимы, которые классифицируются скалярной и векторной миттсвими потужностями (МП). В рамках часового та спектрального підходів теорії потужності отримані комплексні форми активної (скалярної) МП і (неактивної) векторної МП. Для 4-провідної мережі отримані рівняння потужності комплексних скалярних і комплексних векторних потужностей несинусоїдальних режимів. Рівняння потужностей узагальнюють відповідні рівняння синусоїдальних несимметричних режимів у 4-провідній мережі. Бібл. 3, рис. 3.

Ключові слова: трифазне коло, класична миттєва потужність, векторна миттєва потужність, комплексний 3-вимірний ряд Фур'є, активна і реактивна потужність, комплексна векторна потужність, повна потужність, комплексна потужність, рівняння потужності, незбалансований режим, несинусоїдальний режим, 3-вимірний комплексний коефіцієнт.

Для 3-фазной схемы электроснабжения рассмотрены несинусоидальные режимы, классифицируемые скалярной и векторной мгновенными мощностями (ММ). В рамках временного и спектрального подходов теории мощности получены комплексные формы активной (скалярной) ММ и (неактивной) векторной ММ. Для 4-проводной сети получены уравнения мощностей комплексных скалярных и комплексных векторных мощностей несинусоидальных режимов. Уравнения мощностей обобщают соответствующие уравнения синусоидальных несимметричных режимов в 4-проводной сети. Библ. 3, рис. 3.

Ключевые слова: трехфазная цепь, классическая мгновенная мощность, векторная мгновенная мощность, комплексный 3-мерный ряд Фурье, активная и реактивная мощность, комплексная векторная мощность, кажущаяся мощность, комплексная мощность, уравнение мощности, несбалансированный режим, несинусоидальный режим, трехмерный комплексный коэффициент.

Введение. Неидеальная (активно-реактивная, несимметричная и нелинейная) нагрузка потребляет не только электроэнергию (ЭЭ) активной мощности, но и ЭЭ неактивных составляющих полной мощности (ПМ). Для ряда таких нагрузок потребление ЭЭ неактивных составляющих обусловлено технологическими причинами и обеспечивает долговременный нормальный режим работы неидеальной (искажающей) нагрузки. Неактивные составляющие ПМ (некачественное потребление) приводят к дополнительным потерям в энергосистеме, ухудшая качество энергоснабжения, однако не учитываются и недоплачиваются.

Эффективным решением задачи сокращения потерь и повышения точности учета ЭЭ является совместное применение компенсирующих устройств (КУ) и средств учета ЭЭ. Существующие средства учета измеряют ЭЭ, обусловленную симметрией и линейностью элементов нагрузки. Неактивные составляющие ПМ, обусловленные несимметрией и нелинейностью активно-реактивных элементов нагрузки, не измеряются и не учитываются. Компенсация, измерение и учет составляющих ПМ – связанные, дополняющие друг друга задачи, которые с разных экономических позиций решают проблему эффективного потребления ЭЭ и должны решаться в рамках общей теории мощности (ТМ), в реальных условиях нарушения симметрии и синусоидальности режима поставки и потребления.

Постановка задачи. Растущий теоретический и практический интерес к определениям ТМ, интерпретациям понятий реактивной мощности, поиски физического смысла, неоднозначность определения полной мощности в многофазных системах, сложность задачи привели к созданию различных «школ» ТМ (частичную библиографию см. в [1]). Для несинусоидальных многофазных процессов используют два альтернативных метода исследования и анализа понятий ТМ: спектральный (Budeanu, Quade, Пухов, Emanuel, Czarnecki, Шидловский, Кузнецов, Lev-Ari и Stanković и др.) и временной (Buchholz, Fryze, Depenbrock, Демирчан, Маевский, Nabae и Akagi, Willems, Watanabe и Aredes, Tolber, Тонкаль и Новосельцев и др.).

Временной метод анализа основан на специальном разложении 3-фазного тока на ортогональные составляющие. Одна из компонент такого специального разложения определяет активный ток, который после компенсации остается в цепи источника и обеспечивает поставку ЭЭ активной мощности. Временной метод использует два подхода исследования 3-фазных процессов. Первый подход рассматривает 3-фазные процессы как 3-мерные кривые на интервале усреднения, связан с обобщением на многофазные процессы метода Fryze, и использует интегральные мощности (ИМ). Второй подход основан на мгновенных энергетических характеристиках: классической (скалярной) ММ и новой векторной ММ (кросс-векторная теория). Подход имеет практическую значимость и привел к разработке так называемых активных фильтров. Однако, даже для синусоидального режима математические связи между новыми ММ и классическими (ИМ) спектрального подхода до конца не установлены [1].

Цель работы состоит в установлении связи между ММ и ИМ и получении комплексной формы скалярной и векторной ММ для классификации несинусоидальных режимов в 3-фазной 4-проводной схеме электроснабжения в терминах спектрального подхода.

Используемая методология основана на векторном подходе, который с единых позиций позволяет анализировать энергетические характеристики как для 4-проводных, так и для 3-проводных цепей, как в синусоидальном, так и несинусоидальном режиме, как во временной, так и частотной области.

Скалярная ММ. При рассмотрении 3-фазной 4-проводной цепи полагаем, что напряжения в фазах измеряются относительно нейтрали (рис. 1). В каждый момент времени мгновенные значения (м.з.) напряжений (относительно «нейтрального» проводника) и м.з. токов в фазах рассматриваются как 3-мерные вектора арифметического 3-мерного пространства $R^{(3)}$

$$u(t) = [u_a(t) \ u_b(t) \ u_c(t)]^T, \quad i(t) = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T, \quad (1)$$
здесь и дальше τ – знак транспонирования.

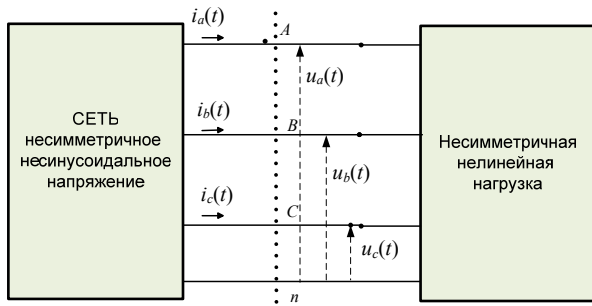


Рис. 1. Энергетические процессы в 4-проводной схеме электроснабжения

Определение нормы в 3-мерном арифметическом пространстве $R^{(3)}$ в каждый момент времени определяет норму вектора м.з. тока и напряжения

$$|\mathbf{u}| = |\mathbf{u}(t)| = \sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{u}} = \sqrt{u_a(t)^2 + u_b(t)^2 + u_c(t)^2}, \quad (2)$$

$$|\mathbf{i}| = |\mathbf{i}(t)| = \sqrt{\mathbf{i}^T \mathbf{i}} = \sqrt{i_a(t)^2 + i_b(t)^2 + i_c(t)^2}. \quad (3)$$

Локальное состояние энергетического режима в трехфазном сечении $\langle A, B, C \rangle$ характеризуется мгновенной мощностью (ММ)

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \frac{dW}{dt}. \quad (4)$$

ММ определена как сумма попарных произведений м.з. тока и напряжения трех фаз и определяет скорость передачи энергии $W = W(t)$ в сечении $\langle A, B, C \rangle$. Как следует из (4), в каждый момент времени ММ равна скалярному произведению (СП) векторов (1) в пространстве $R^{(3)}$

$$p(t) = (\mathbf{i}, \mathbf{u}) = \mathbf{i}^T \mathbf{u} = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)] \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Векторная ММ и уравнение ММ. Произведение норм векторов (2) и (3) определяет кажущуюся (полную) ММ энергетического режима

$$s(t) = |\mathbf{i}(t)| \cdot |\mathbf{u}(t)| = \mathbf{i}^T \mathbf{u}. \quad (6)$$

В 3-мерном пространстве $R^{(3)}$ для любой пары векторов справедливо неравенство Коши-Шварца [2], что для векторов (1) дает импликацию

$$|\mathbf{i}^T \mathbf{u}(t)| \leq |\mathbf{i}(t)| \cdot |\mathbf{u}(t)| \Rightarrow p(t) \leq s(t). \quad (7)$$

Векторная ММ – это вектор пространства $R^{(3)}$, который вводится как векторное произведение (ВП) м.з. векторов (1) токов и напряжений [1]

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{i} \times \mathbf{u} = \begin{bmatrix} i_b u_c - i_c u_b \\ i_c u_a - i_a u_c \\ i_a u_b - i_b u_a \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

Определитель Грама [2], составленный из попарных СП векторов м.з. тока и напряжения, равен квадрату нормы ВП векторов м.з. токов и напряжений – скалярному квадрату векторной ММ (8)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}^T \mathbf{i} & \mathbf{i}^T \mathbf{u} \\ \mathbf{i}^T \mathbf{u} & \mathbf{u}^T \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} \times \mathbf{u} \\ \mathbf{q}(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{i} \times \mathbf{u} \\ \mathbf{q}(t) \end{bmatrix} = |\mathbf{q}(t)|^2. \quad (9)$$

Геометрический смысл определителя Грама: «квадрат площади параллелограмма, который образован векторами напряжения и тока» иллюстрируется на рис. 2.

Площадь такого «мгновенного» параллелограмма равна

$$q(t) = |\mathbf{i}(t)| \cdot |\mathbf{u}(t)| \cdot \sin \varphi(t) = s(t) \cdot \sin \varphi(t), \quad (10)$$

здесь $\varphi(t)$ – мгновенный угол между векторами (1) в пространстве $R^{(3)}$ в момент времени t .

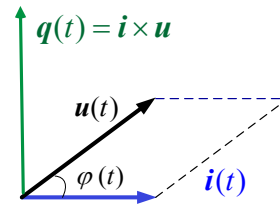


Рис. 2. Вектор тока, вектор напряжения и векторная ММ

Площадь параллелограмма равна нулю, если образующие его вектора параллельны (коллинеарны, $\mathbf{i} \parallel \mathbf{u}$), когда кажущая ММ равна скалярной ММ. Поэтому норму ВП тока и напряжения интерпретируется как неактивная ММ. Чтобы подчеркнуть эту интерпретацию, скалярную ММ (5) называют активной ММ. Разложение (9) инвариантно относительно перестановки векторов $\mathbf{i}$ и $\mathbf{u}$, однако $\mathbf{i} \times \mathbf{u} = -\mathbf{u} \times \mathbf{i}$. В данной работе (как и в [1]) векторная (неактивная) ММ определяется согласно (8). Вектора $\mathbf{i}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{i} \times \mathbf{u}$ образуют правую тройку.

Определитель Грама в каждый момент квадратично дополняет скалярную ММ до полной (кажущейся) ММ (6)

$$\underbrace{(\mathbf{i}^T \mathbf{i})}_{i^2(t)} \underbrace{(\mathbf{u}^T \mathbf{u})}_{u^2(t)} = \underbrace{(\mathbf{i}^T \mathbf{u})}_{p(t)}^2 + \underbrace{[\mathbf{i} \times \mathbf{u}]^T [\mathbf{i} \times \mathbf{u}]}_{q^2(t)} \quad (11)$$

дает уравнение мощности для мгновенных мощностей

$$s^2(t) = p^2(t) + q^2(t), \quad (12)$$

которое иллюстрируется на рис. 3.

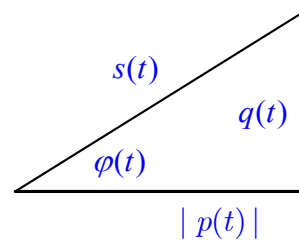


Рис. 3. Треугольник мгновенных мощностей

В треугольнике ММ два катета соответствуют активной и неактивной мгновенным мощностям. Если неактивная ММ обусловлена $\sin \varphi(t)$, то активная ММ обусловлена $\cos \varphi(t)$

$$p(t) = (\mathbf{i}^T \mathbf{u}) = \underbrace{|\mathbf{i}|}_{s(t)} \cdot \underbrace{|\mathbf{u}|}_{\cos \varphi(t)} = s(t) \cdot \cos \varphi(t). \quad (13)$$

Угол $\varphi(t)$ в треугольнике ММ равен введенному ранее углу между векторами тока и напряжения. Если активная ММ (4) характеризует эффективность энергетического режима, то векторная ММ (13) характеризует потери энергетического режима.

Установившийся неуровновешенный и несбалансированный энергетический режим. Установившийся энергетический режим в 3-фазном сечении $\langle A, B, C \rangle$ определен 3-мерными T -периодическими кривыми процессов тока и напряжения:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t+T), \quad \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}(t+T). \quad (14)$$

Для T -периодических процессов корректно определено (интегральное) среднее ММ и однозначно выделяется переменная составляющая

$$P = \bar{p} = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} p(t) dt, \quad p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t). \quad (15)$$

Если ММ не имеет переменной (пульсирующей) компоненты $\tilde{p}(t) \equiv 0$, то режим *уравновешен*. В общем случае $\tilde{p}(t) = p(t) - \bar{p} \neq 0$ и установившийся режим *неуравновешен*.

Подобно (15) в векторной ММ можно выделить векторные составляющие: постоянную и переменную

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} q(t) dt; \quad q(t) = \bar{q} + \tilde{q}(t). \quad (16)$$

Режим, при котором *векторная* ММ не имеет переменной составляющей $\tilde{q} = \tilde{q}(t) \equiv 0$, назван *сбалансированным режимом* [1].

Режим *реально сбалансирован*, если векторная ММ (*неактивная* ММ) тождественно равна нулю

$$q(t) \equiv 0 \Leftrightarrow (\bar{q} = 0) \& (\tilde{q}(t) \equiv 0). \quad (17)$$

Тем самым, режим *реально сбалансирован* ($q(t) \equiv |q(t)| \equiv 0$), если в каждый момент (тождественно) вектора тока и напряжения (1) параллельны в арифметическом 3-мерном пространстве $R^{(3)}$

$$q(t) \equiv 0 \Leftrightarrow i \parallel u \Leftrightarrow i(t) = y(t)u(t). \quad (18)$$

Скалярная величина $y(t)$ (имеет размерность проводимости) не обязана быть константой.

Таким образом, пара мгновенных характеристик: скалярная (5) и векторная (8) классифицирует локальный энергетический режим в сечении $\langle A, B, C \rangle$.

Спектральный анализ периодических процессов конечной энергии. Множество 3-мерных (3-фазных) T -периодических векторных кривых

$$x(t) = [x_a(t) \ x_b(t) \ x_c(t)]^T, \quad (19)$$

с конечной интегрально-усредненной квадратичной величиной (нормой)

$$\|x\|^2 = \bar{x}^2 = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} x(t)^T x(t) dt < \infty \quad (20)$$

образуют гильбертово бесконечномерное пространство 3-мерных кривых «конечной энергии»

$$L_2^{(3)}(T) = \{x(t), \quad t \in (v, v+T) : \|x\| < \infty\}. \quad (21)$$

Для 3-фазных векторных кривых $x(t)$, $y(t) \in L_2^{(3)}(T)$ определено скалярное произведение

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} x(t)^T y(t) dt = \frac{1}{T} \int_v^{v+T} (x(t), y(t)) dt \quad (22)$$

как интегральное среднее СП м.з. в 3-мерном пространстве $R^{(3)}$. Справедливо неравенство Коши-Шварца [2]

$$\langle x, y \rangle \leq \|x\| \cdot \|y\|. \quad (23)$$

T -периодичная кривая $x(t) = x(t+T)$ раскладывается в функциональный ряд 3-мерных гармонических составляющих – (синусный, косинусный, комплексный и т.д.) ряд Фурье

$$x(t) = x_0(t) + x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_k(t) + \dots \quad (24)$$

Для комплексного ряда Фурье 3-мерная векторная гармоника $x_k(t) \in L_2^{(3)}(T)$ k -порядка

$$x_k(t) = \sqrt{2} \Re e [X_k e^{jk\omega t}], \quad (T\omega = 2\pi), \quad (25)$$

вычисляется с помощью 3-мерного комплексного коэффициента (3-комплекса)

$$X_k = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_v^{v+T} x(t) e^{-jk\omega t}, \quad (k=0, 1, 2, \dots), \quad (26)$$

где $X_k = [\dot{X}_{a,k} \ \dot{X}_{b,k} \ \dot{X}_{c,k}]^T$ – трехмерный вектор с комплексными координатами, $\Re e(\dot{z})$ – реальная часть комплексного числа $\dot{z}$.

Множество 3-комплексов составляют 3-мерное комплексное пространство $C^{(3)}$ с комплексным скалярным произведением [1]

$$(X, Y) = X^T Y^*, \quad (27)$$

$*$ – символ комплексного сопряжения (КС). В дальнейшем будем считать, что постоянная составляющая в комплексном ряде Фурье отсутствует ($X_0 = 0$)

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \underbrace{\sqrt{2} \Re e [X_k e^{jk\omega t}]}_{x_k(t)}. \quad (28)$$

Комплексная форма скалярной ММ. Спектральный анализ T -периодических энергетических процессов тока и напряжения использует их представление комплексным рядом Фурье

$$u(t) = \sqrt{2} \Re e \sum_{k \geq 1} U_k e^{jk\omega t}, \quad (29)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \Re e \sum_{k \geq 1} I_k e^{jk\omega t}. \quad (30)$$

Формула Эйлера [2] представляет компоненты разложения 3-кривых напряжения (29) и тока (30) с помощью КС 3-комплекса

$$i_k(t) = \frac{1}{2} [I_k e^{jk\omega t} + I_k^* e^{-jk\omega t}], \quad (31)$$

$$u_k(t) = \frac{1}{2} [U_k e^{jk\omega t} + U_k^* e^{-jk\omega t}]. \quad (32)$$

В силу линейности скалярного произведения, ММ равна сумме парциальных скалярных ММ векторных гармоник тока k -порядка и напряжения m -порядка.

$$p(t) = (i, u) = i^T u = \sum_{k,m} \underbrace{i_k(t)^T}_{p_{k,m}(t)} u_m(t) = \sum_{k,m} p_{k,m}(t). \quad (33)$$

Представления (31), (32) векторной гармоник с помощью 3-комплекса и его КС для м.з. произведения векторных гармоник тока k -порядка и напряжения m -порядка дает тождество

$$p_{k,m}(t) = \Re e [\underbrace{I_k^T U_m^*}_{\dot{N}_{k-m}} e^{j(k-m)\omega t} + \underbrace{I_k^T U_m}_{\dot{N}_{k+m}} e^{j(k+m)\omega t}]. \quad (34)$$

Если гармоник тока и напряжения одного порядка ($m = k$), то их скалярная ММ имеет как постоянную, так и переменную составляющие

$$p_k(t) = \Re e [\underbrace{U_k^T I_k^*}_{\dot{S}_{G_k}} + \underbrace{I_k^T U_k}_{\dot{N}_k} e^{j2k\omega t}]. \quad (35)$$

Скалярная ММ (4) представляется через 3-комплексы тока и напряжения как

$$p(t) = \Re e \{ \sum_{k \geq 1} [\dot{S}_{G_k} + \dot{N}_k e^{j2k\omega t}] \} + \Re e \{ \sum_{k \neq m} [\dot{N}_{k-m} e^{j(k-m)\omega t} + \dot{N}_{k+m} e^{j(k+m)\omega t}] \} \quad (36)$$

и имеет постоянную и переменную (пульсирующую) составляющую.

Постоянная составляющая

$$\bar{p} = \sum_{k \geq 1} \Re e [\dot{S}_{G_k}] = \sum_{k \geq 1} P_k = P \quad (37)$$

равна активной (средней) мощности несинусоидального режима и представляется как реальная часть комплексной (геометрической) мощности всех гармоник

$$\dot{S}G = \sum_{k \geq 1} \underbrace{U_k^T I_k^*}_{\dot{S}G_k} = \sum_{k \geq 1} \dot{S}G_k = P + jQ. \quad (38)$$

Комплексная (геометрическая) мощность (38) равна сумме комплексных мощностей гармонических составляющих

$$\dot{S}G_k = U_k^T I_k^* = (U_k, I_k) = P_k + jQ_k = S_{G_k} \cdot e^{j\varphi_k}. \quad (39)$$

Комплексная мощность (39) векторной гармоники тока и напряжения k -порядка равна комплексному скалярному произведению (27) 3-комплекса напряжения и 3-комплекса тока k -порядка в комплексном 3-мерном пространстве $C^{(3)}$.

Мнимая часть комплексной мощности (38)

$$Q = \Im m \sum_{k \geq 1} \underbrace{U_k^T I_k^*}_{\dot{S}G_k} = \sum_{k \geq 1} \underbrace{\Im m [U_k^T I_k^*]}_{Q_k} = \sum_{k \geq 1} Q_k$$

определяет реактивную мощность несинусоидального режима 3-фазного сечения $\langle A, B, C \rangle$ и дает обобщение реактивной мощности по Будеану на 3-фазные процессы

$$Q = \sum_{k \geq 1} \Im m [U_k^T I_k^*] = \sum_{k \geq 1} Q_k = \sum_{k \geq 1} S_{Q_k} \sin \varphi_k. \quad (40)$$

Комплексные *мощности пульсаций* скалярной ММ:

- гармоник k -порядка четной частоты $2k\omega$

$$\dot{N}_k = I_k^T U_k; \quad (41)$$

- гармоник k -порядка и m -порядка суммарной и разностной частоты

$$\dot{N}_{k+m} = I_k^T U_m, \quad \dot{N}_{k-m} = U_k^T I_m \quad (42)$$

определяют переменную (пульсирующую) составляющую скалярной ММ

$$\begin{aligned} \tilde{p}(t) = & \Re e \left\{ \sum_{k \geq 1} \dot{N}_k e^{j2k\omega t} \right\} + \\ & + \Re e \left\{ \sum_{k \neq m} [\dot{N}_{k-m} e^{j(k-m)\omega t} + \dot{N}_{k+m} e^{j(k+m)\omega t}] \right\}. \end{aligned} \quad (43)$$

Если три типа комплексных мощностей равны нулю

$$\dot{N}_k = \dot{N}_{k+m} = \dot{N}_{k-m} = 0, \quad (k, m = 1, 2, \dots),$$

то режим уравновешен.

Комплексная форма скалярной ММ несинусоидального режима (36) расширяет комплексную форму скалярной ММ несимметричного синусоидального режима [1]

$$p(t) = \Re e \{ \dot{S}G_1 + \dot{N}_1 e^{j2k\omega t} \},$$

где $\dot{S}G_1 = U_1^T I_1^*$, $\dot{N}_1 = I_1^T U_1$ – комплексная (геометрическая) мощность и комплексная *мощность пульсаций* фундаментальных гармоник тока и напряжения.

Векторная мгновенная мощность несинусоидального режима. В силу линейности векторного произведения, векторная ММ

$$q(t) = i \times u = \sum_{k,m} \underbrace{i_k \times u_m}_{q_{k,m}(t)} = \sum_{k,m} q_{k,m}(t) \quad (44)$$

равна сумме векторных произведений гармоник тока k -порядка и напряжения m -порядка

$$q_{k,m}(t) = \Re e \left[\underbrace{I_k \times U_m^*}_{D_{k-m}} e^{j(k-m)\omega t} + \underbrace{I_k \times U_m}_{D_{k+m}} e^{j(k+m)\omega t} \right]. \quad (45)$$

Если гармоники тока и гармоники напряжения одного порядка $m = k$, то их ВП имеет как постоянную, так и переменную составляющие

$$q_k(t) = \Re e \left[\underbrace{I_k \times U_k^*}_{K_k} + \underbrace{I_k \times U_k}_{D_k} e^{j2k\omega t} \right]. \quad (46)$$

Комплексная форма векторной ММ представляется через 3-комплексы гармоник как

$$\begin{aligned} q(t) = & \Re e \left\{ \sum_{k \geq 1} [K_k + D_k e^{j2k\omega t}] \right\} + \\ & + \Re e \left\{ \sum_{k \neq m} [D_{k-m} e^{j(k-m)\omega t} + D_{k+m} e^{j(k+m)\omega t}] \right\}. \end{aligned} \quad (47)$$

3-комплексы *сбалансированной* мощности гармоник тока и напряжения k -порядка

$$K_k = I_k \times U_k^* \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (48)$$

определяют постоянную составляющую векторной ММ.

Переменную (пульсирующую) составляющую векторной ММ определяют:

- 3-комплекс мощности *небаланса* гармоники тока и напряжения k -порядка удвоенной частоты $2k\omega$

$$D_k = I_k \times U_k \quad (k = 1, 2, \dots); \quad (49.a)$$

- 3-комплексы мощности *небаланса* гармоники тока k -порядка и гармоники напряжения m -порядка суммарной и разностной частоты $(k, m = 1, 2, \dots)$:

$$D_{k+m} = I_k \times U_m, \quad D_{k-m} = I_k \times U_m^*. \quad (49.b)$$

Если 3-комплексы (49) равны нулю

$$D_k = D_{k+m} = D_{k-m} = 0, \quad (50)$$

то режим сбалансирован.

Если дополнительно к условиям (50) выполнено

$$\Re e K_k = \Re e [I_k \times U_k^*] = 0 \quad (k = 1, 2, \dots), \quad (51)$$

то режим *реально сбалансирован*.

Комплексная форма векторной мгновенной мощности несинусоидального режима (47) расширяет комплексную форму векторной ММ синусоидального несимметричного режима [1]

$$q(t) = \Re e \{ K_1 + D_1 e^{j2\omega t} \},$$

где $K_1 = I_1 \times U_1^*$, $D_1 = I_1 \times U_1$ – 3-комплексы *сбалансированной* мощности и мощности *небаланса* фундаментальной гармоники тока и напряжения.

Уравнения комплексных мощностей несинусоидального режима. Для квадрата (кажущей) полной мощности справедливо равенство

$$S^2 = \left(\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2 \right) \cdot \left(\sum_{m=1}^{\infty} I_m^2 \right) = \sum_{m=k}^{\infty} I_m^2 \cdot U_m^2 + \sum_{m \neq k}^{\infty} I_m^2 U_k^2. \quad (52)$$

Связь скалярного и векторного произведения 3-комплексов $X, Y \in C^{(3)}$ определено тождеством [1]

$$|X|^2 |Y|^2 = |X^T Y^*|^2 + |X \times Y|^2, \quad (53)$$

которое расширяет соответствующее тождество векторной алгебры вещественных векторов [2].

При $X = U_k$, $Y = I_m$ из тождества (53) следуют равенства

$$I_m^2 U_k^2 = |U_k|^2 |I_m|^2 = \underbrace{|U_k^T I_m^*|^2}_{\dot{N}_{k-m}^2} + \underbrace{|U_k \times I_m|^2}_{D_{k+m}^2}, \quad (54)$$

которые при $m = k$ дают

$$I_k^2 U_k^2 = |U_k|^2 |I_k|^2 = \underbrace{|U_k^T I_k^*|^2}_{\dot{S}_{G_k}} + \underbrace{|U_k \times I_k|^2}_{D_k}. \quad (55)$$

Разложение квадрата полной мощности (52) с учетом (54, 55) дает уравнение мощности для комплексных скалярных и векторных мощностей, куда входит активная (37) и реактивная (40) мощность не-синусоидального режима

$$S^2 = \sum_{k=1}^{\infty} (P_k^2 + Q_k^2 + D_k^2) + \sum_{m \neq k}^{\infty} (N_{k-m}^2 + D_{k+m}^2). \quad (56)$$

Уравнение мощности (56) обобщает уравнение мощности для синусоидального, несимметричного режима [1]

$$S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2. \quad (57)$$

В уравнение (56) входят не все комплексные скалярные и векторные мощности комплексной формы скалярной (36) и векторной ММ (47).

Если использовать пару последовательностей $\{U_k\}_{k \geq 1}$, $\{I_m^*\}_{m \geq 1}$, то справедливо дополнительное уравнение для комплексных скалярных и векторных мощностей, не вошедших в (56). При $X = U_k$, $Y = I_m^*$ из тождества (53) следуют равенства

$$|U_k|^2 |I_m|^2 = \underbrace{|U_k^T I_m^*|^2}_{\dot{N}_{k+m}} + \underbrace{|U_k \times I_m^*|^2}_{D_{k-m}}. \quad (58)$$

При $m = k$ равенства (58) дают

$$|U_m|^2 |I_m|^2 = \underbrace{|U_m^T I_m^*|^2}_{\dot{N}_m} + \underbrace{|U_m \times I_m^*|^2}_{K_m}. \quad (59)$$

Разложение квадрата полной мощности (52) с учетом (58, 59) дает дополнительное уравнение для комплексных скалярных и векторных мощностей

$$S^2 = \sum_{k=1}^{\infty} (K_m^2 + N_m^2) + \sum_{m \neq k}^{\infty} (N_{k+m}^2 + D_{k-m}^2). \quad (60)$$

Можно показать, что для каждой гармоники справедлива импликация

$$D_m = 0 \Rightarrow K_m^2 + N_m^2 = P_m^2 + Q_m^2 \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Полученное уравнение мощностей (60) обобщает дополнительное уравнение для синусоидального несимметричного режима [1]

$$S^2 = K_1^2 + N_1^2. \quad (61)$$

Как показано в [1] в синусоидальном режиме уравнения (57), (61) обусловлены двумя различными ортогональными разложениями 3-фазного тока. Задача построения ортогонального разложения тока в синусоидальном режиме используется для решения задачи компенсации неактивных составляющих полной мощности [3]. Построение ортогонального разложения, которое ассоциируется с уравнениями мощностей (56), (60) выходит за рамки данной работы и требует дальнейшего исследования.

Практическая ценность полученных уравнений заключается в возможности их использования для повышения, как качества поставки, так и качества потребления электроэнергии.

Выводы. Для 3-фазной 4-проводной сети с не-синусоидальными (независимо от их симметрии) процессами получены комплексные формы активной (скалярной) ММ и (неактивной) векторной ММ.

Получены уравнения мощностей для комплексных скалярных и комплексных векторных мощностей не-синусоидальных режимов. Уравнения мощностей обобщают уравнения мощностей для синусоидальных режимов в 4-проводной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротин Ю.А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – №6. – С. 57-65.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 832 с.
3. Sirotin Iu.A. Non-pulsed mode of supply in a three-phase system at asymmetrical voltage // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2013. – №7. – pp. 54-58.

REFERENCES

1. Sirotin Iu.A. Vectorial instantaneous power and energy modes in three-phase circuits. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2013, no.6, pp. 57-65. (Rus).
2. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (Rus).
3. Sirotin Iu.A. Non-pulsed mode of supply in a three-phase system at asymmetrical voltage. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, no.7, pp. 54-58.

Поступила (received) 16.10.2015

Сиротин Юрий Александрович¹, д.т.н., проф.,
Иерусалимова Татьяна Сергеевна¹, ассистент,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: yuri_sirotin@ukr.net, Ierusalimovat@mail.ru

Iu.A. Sirotin¹, T.S. Ierusalimova¹

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

Instantaneous and integral power equations of nonsinusoidal 3-phase processes.

Purpose. To identify the mathematical relationship between the instantaneous powers (classical and vectorial) and integral powers in non-sinusoidal mode and to get complex form of instantaneous powers in 3-phase 4-wire power supply in terms of the spectral approach. **Methodology.** We have applied the vector approach with one voice allows you to analyze the energy characteristics of 3-phase power supply circuits (for 4-wire and 3-wire circuits) in sinusoidal and non-sinusoidal mode, both the time domain and frequency domain. We have used 3-dimensional representation of the energy waveforms with the complex multi-dimensional Fourier series. **Results.** For 4-wire network with a non-sinusoidal (regardless of their symmetry) processes, we have developed the mathematical model one-dimensional representations of the complex form for the active (scalar) instantaneous power (IP) and 3-dimensional form (inactive) vectorial IP. It is possible to obtain two dual integral power equations for complex scalar and vector integrated power of non-sinusoidal modes. The power equations generalize the equations of sinusoidal modes for 4-wire network. **Originality.** In addition to the classification of energy local regimes in the time domain for the first time we spent the classification of non-sinusoidal modes in the spectral region and showed the value and importance of the classification of regimes based on the instantaneous powers. **Practical value.** The practical value the obtained equations is the possibility of their use for improving the quality of electricity supply and the quality electricity consumption. References 3, figures 3.

Key words: three-phase circuit, classical instantaneous power, vector instantaneous power, complex 3-dimensional Fourier series, active and reactive power, complex vector power, apparent power, complex pulsation power, power equation, unbalanced mode, non-sinusoidal mode, 3-phaser.