

ISSN 2074-272X

науково-практичний
журнал

2015/1

ЕІЕ Електротехніка і Електромеханіка

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Електротехнічні комплекси та системи.

Силова електроніка

Техніка сильних електричних та магнітних полів.

Кабельна техніка

Електричний транспорт

Дискусії

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



"ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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



ELEKTROTEKHNIKA I ELEKTROMEKHANIKA – ELEKTROTEHNİKA İ ELEKTROMEHANİKA – 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, Vice-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.Ostrohradskiy 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, проректор НТУ "ХПІ"
Розов В.Ю. заступник головного редактора, член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ"
Гречко О.М. відповідальний секретар, к.т.н., НТУ "ХПІ"
Баранов М.І. д.т.н., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"
Боєв В.М. професор, НТУ "ХПІ"
Веприк Ю.М. професор, НТУ "ХПІ"
Гриб О.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Гурин А.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Данько В.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Жемеров Г.Г. професор, НТУ "ХПІ"
Кравченко В.І. професор, директор НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"
Мілих В.І. професор, НТУ "ХПІ"
Михайлов В.М. професор, НТУ "ХПІ"
Омельяненко В.І. професор, НТУ "ХПІ"
Пуйло Г.В. професор, ОНТУ, Одеса
Резинкін О.Л. професор, НТУ "ХПІ"
Рудаков В.В. професор, НТУ "ХПІ"
Сосков А.Г. професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова, Харків
Ткачук В.І. професор, НУ "Львівська Політехніка"
Шинкаренко В.Ф. професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

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

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

- Klymenko B.V.** Editor-in-Chief, professor, NTU "KhPI"
Sokol Ye.I. Deputy Editor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-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"
Vepryk Yu.M. Professor, NTU "KhPI"
Gryb O.G. Professor, NTU "KhPI"
Guryn A.G. Professor, NTU "KhPI"
Dan'ko V.G. Professor, NTU "KhPI"
Zhemerov G.G. Professor, NTU "KhPI"
Kravchenko V.I. Professor, NTU "KhPI"
Milykh V.I. Professor, NTU "KhPI"
Mikhaylov V.M. Professor, NTU "KhPI"
Omel'yanenko V.I. Professor, NTU "KhPI"
Puilo G.V. Professor, Odessa National Polytechnic University
Rezynkin O.L. Professor, NTU "KhPI"
Rudakov V.V. Professor, NTU "KhPI"
Soskov A.G. Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy
Tkachuk V.I. Professor, Lviv Polytechnic National University
Shynkarenko V.F. Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

* 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 (Гречко Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

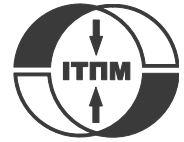
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2015
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2015

Підписано до друку 14.02.2015 р. Формат 60 x 90 %. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,75.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-01-2015. Ціна договірною.

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

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 24:
Покорение земной суши и мирового океана 3

Електричні машини та апарати

Афанасов А.М. Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока 12

Василевский В.В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения 16

Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов 20

Матющенко А.В. Полевые математические модели вентильных двигателей с постоянными магнитами и их сопоставительный анализ 25

Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе Парето-оптимального решения 29

Плюгин В.Е. Объектно-ориентированная полевая модель электромеханических преобразователей энергии 36

Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами 41

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Хлопенко Н.Я., Гаврилов С.А., Хлопенко И.Н. Стабилизация параметров асинхронного электропривода при векторном управлении 46

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

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 51

Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчёт полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки 57

Сакун О.В., Болюх В.Ф., Месенко О.П., Коритченко К.В. Дослідження умов індукування "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі 63

Електричний транспорт

Костин Н.А., Шейкина О.Г. Неканоническое спектральное разложение случайных функций тяговых напряжения и тока в системах электрического транспорта 68

Дискусії

Кутковецький В.Я. Фізична основа закону електромагнітної індукції 72

Рекомендації щодо оформлення анотацій англійською мовою для публікації у журналі "Електротехніка і електромеханіка" 79

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in a science and technique. Part 24:
Subjugation of earthly dry land and world ocean 3

Electrical Machines and Apparatus

Afanasov A.M. Increase of energy efficiency of testing of traction electric machines of direct and pulsating current 12

Vasilevskij V.V. Assessment of the resource consumption of oil-filled power transformer paper insulation based on updated aging integral 16

Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers 20

Matyushenko A.V. Mathematical field models of brushless DC motors with permanent magnets and their comparative analysis 25

Nikitina T.B. Multiobjective synthesis of robust control by multimass electromechanical systems based on Pareto-optimal solution 29

Pliugin V.E. An object-oriented field model of electromechanical transformers of energy	36
Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Objective functions of the comparative analysis of the energy efficiency of electromagnetic systems of induction motors with inner and outer rotors	41

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

Khlopenko N.Ja., Gavrilov S.A., Khlopenko I.N. Stabilization of parameters of asynchronous electric drive with vector control	46
---	----

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

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	51
--	----

Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening	57
---	----

Sakun O.V., Bolyukh V.F., Mesenko O.P., Korytchenko K.V. Conditions investigations of induction of the "steady" plasma ring in the electrodynamic accelerator	63
---	----

Electric Transportation

Kostin N.A., Sheikina O.G. Non-canonical spectral decomposition of random functions of the traction voltage and current in electric transportation systems	68
--	----

Discussions

Kutkovetsky V.J. Physic basis of electromagnetic induction law	72
--	----

English-language abstracts recommendations in "Electrical Engineering & Electromechanics"	79
---	----

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" – передплатне видання. Вартість передплати на 2015 рік – 173,10 грн., на два місяці – 28,85 грн., на чотири місяці – 57,70 грн., на шість місяців – 86,55 грн., на вісім місяців – 115,40 грн., на десять місяців – 144,25 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

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

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

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

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

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



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

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 24: ПОКОРЕНИЕ ЗЕМНОЙ СУШИ И МИРОВОГО ОКЕАНА

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії підкорення і вивчення людством земної континентальної суші і величезних морських просторів Землі. Бібл. 15, рис. 11.

Ключові слова: історія, підкорення, земна суша, світовий океан.

Приведен краткий очерк из всемирной истории покорения и изучения человечеством земной континентальной суши и огромных морских просторов Земли. Библ. 15, рис. 11.

Ключевые слова: история, покорение, земная суша, мировой океан.

Введение. Люди издревле стремились покорить бескрайние земные дали, морские просторы, их высоты и глубины. До начала 20-го столетия основное внимание уделялось *Земной суше* – континентам и островам нашей планеты. Именно они открывались взору путешественников в эпоху Великих географических открытий (15-18-е века) и в более позднее время [1]. О *Мировом океане* к этому времени стало известно в основном лишь то, что он почти втрое больше, чем вся Земная суша [1]. Заметим, что в середине 17-го столетия нидерландский географ Бернхардус Варениус предложил употреблять по отношению к огромным водным просторам Земли приведенный выше термин "Мировой океан" [2]. Согласно принятой классификации все географические открытия и соответственно исследования в Мировом океане можно разделить на две основные группы [2]: *океанографические* – описание различных объектов океана (континентов, островов, заливов и проливов) и *океанологические* – изучение состояния водных масс, рельефа дна, биологии и экологии океана. Океанографическое изучение океанов всегда предшествовало океанологическому. Поэтому долгое время под поверхностью морской воды Мирового океана оставался огромный неведомый для человека мир, о жизни которого можно было лишь догадываться и на основе разрозненных наблюдений строить различные предположения. Зачем же люди так настойчиво в течение многих столетий стремятся в глубины океанов? Думаю, что по многим причинам. При этом одни думают о том, как поднять с морских глубин затонувшие сокровища или заполучить с их дна дорогостоящие полезные ископаемые (сырье) для экономики своих стран. Другие надеются заработать большие деньги на продаже глубоководных аппаратов собственной разработки. Третьи мечтают о громкой славе первооткрывателя или научной карьере. Но какие бы цели ни преследовали все *акванавты* (это понятие, как и *гидронавты*, происходит от греческого слова "αqua" – "вода" и греческого слова "nautēs" – "мореплаватель" [3] и обозначает "человека, выполняющего с помощью подводного аппарата различные работы под водой на глубинах, которые недоступны специалистам-водолазам, облаченным в специальные гидрокостюмы и имеющим при себе устройства для дыхания человека под водой") мира, они всегда готовы помочь науке и людям. Ведь в глубинах земных океанов до сих пор скрыто немало тайн, разгадка которых может реально

помочь человечеству в практическом решении многих своих насущных проблем и задач.

1. Краткая хронология основных достижений человечества в покорении до XX столетия земных территорий и водных пространств. Считается, что первые *океанографические исследования* были выполнены лучшими мореходами древности – финикийцами. В 7-6 веках до н.э. они на парусных судах обошли вокруг Африки и хорошо изучили Средиземное море, его острова и побережье [2, 4]. Примерно в то же время исследование Индийского океана начали шумеры, индийцы и малайцы, а Тихого океана – полинезийцы, китайцы и те же малайцы. Принято считать, что первые письменные документы об океане и карты отдельных его частей появились еще в Древней Греции (5-4 века до н.э.) [4]. Греки и римляне исследовали Черное море, достигли Британских островов (например, Пифей) и Скандинавского полуострова [2, 4]. В 7-9 веках арабами были обследованы африканское побережье Индийского океана, остров *Мадагаскар* и *Малайский архипелаг*. В 10-11 веках северную часть Атлантического океана активно исследуют скандинавские викинги (например, Эрик Рыжий и Лейф Эйрикссон), открывая при этом *Исландию*, *Гренландию* и *Северную Америку* [2, 4]. В 11-16 веках поморы России исследуют Белое и Баренцево моря и открывают острова *Шпицберген* и *Новую Землю* [4]. С 15-го века ведет свое начало эпоха Великих географических открытий. Первыми на этот путь первооткрывателей встали португальцы, изучившие атлантическое побережье Африки. В 1488 году Бартоломеу Диаш на самой южной части Африки открыл *мыс Доброй Надежды*. В период 1497-1499 гг. Васко да Гамма достиг восточным морским путем *Индии*. В 1500 году Педру Алвариш Кабрал открывает *Бразилию* [4]. Испанские открытия начинаются с плаваний Христофора Колумба (в периоды с 1492-1493 гг. и с 1502-1504 гг.) на трех каравеллах "Санта-Мария", "Пинта" и "Нинья", открывшего часть *Больших и Малых Антильских островов* и часть *побережья Центральной Америки*. Отметим здесь тот исторический факт, что 4 сентября 1504 года анонимный флорентийский печатник выпустил в свет небольшую (всего 16 страниц) брошюру под названием "*Письмо Америго Веспуччи об островах, открытых им во время четырех его путешествий*" [2, 4]. На последней странице этой брошюры было начертано следующее

© М.И. Баранов

[2, 4]: "Написано в Лиссабоне, 4 сентября 1504 года Америго Веспуччи, служащим в Лиссабоне". Считается, что во многом именно благодаря этому небольшому печатному изданию земной континент, впервые открытый генуэзцем Х. Колумбом (1451-1506 гг.), и был назван *Америкой* в честь флорентинца Америго Веспуччи [4, 5]. В период 1519-1522 гг. совершается первое в мире кругосветное плавание Фернана Магеллана (завершено оно было его помощником Хуаном Элькано) [4]. Напомним читателю, что 21 октября 1520 года Ф. Магеллан открыл и прошел на своем корабле пролив между Атлантическим и Тихим океанами, названный впоследствии его именем (*Магелланов пролив*). Путешествие Ф. Магеллана и последующие экспедиции англичанина Джеймса Кука (1728-1779 гг.) в период 1768-1780 гг. позволили европейцам получить представление об огромных водных пространствах, окружающих материки нашей планеты [2, 4]. Их научные результаты дали возможность определить в общих чертах очертания земных континентов. На основании полученных ими географических данных были созданы первые карты мира. В 17-18-е века очертания береговой линии на Земле были детализированы и географическая карта нашего Земного шара практически приобрела вид, близкий к современному. В дальнейшем на путь географических открытий встали англичане, голландцы, французы и россияне. В 18-19-е века были проведены первые специальные географические экспедиции первооткрывателей земель и морей В. Беринга, Г.И. Чирикова, Х.П. Лаптева, С.И. Челюскина, Ж.Ф. Лаперуза, И.Ф. Крузенштерна, Ю.Ф. Лисянского, Ф.Ф. Беллинсгаузена, М.П. Лазарева, О.Е. Коцебу и Э.Х. Ленца (этот исследователь морей и океанов впоследствии, как известно, стал выдающимся электрофизиком [6]) и многих других [2, 4]. Выдающимся по научным результатам было длительное и тяжелое плавание в Антарктиду русских адмиралов Фаддея Фаддеевича Беллинсгаузена и Михаила Петровича Лазарева в период 1819-1821 гг. на двух парусных шлюпах – "Восток" и "Мирный". Русские моряки здесь впервые встретились с суровой антарктической природой при обследовании с моря этой земной суши. 28 января 1820 года считается датой одного из величайших географических открытий, совершенного указанными русскими первопроходцами – открытия шестого континента Земли, называемого *Антарктидой* [4, 5]. Благодаря этим экспедициям уточнялась карта Мирового океана и накапливались сведения о таких свойствах его морских вод как температура, удельный вес (плотность), прозрачность, в том числе и на разных глубинах. Однако, к этому времени глубины Мирового океана были изучены еще очень слабо. Последние белые пятна с географической карты Мирового океана были стерты только в 20-ом веке после исследования Российского и Канадского секторов Арктики и плаваний экспедиционных судов к побережью Антарктиды. 14 декабря 1911 года Рауль Амундсен (1872-1928 гг.), выдающийся норвежский полярный путешественник и исследователь первым достиг *Южного полюса Земли*. В конце 1909 года Р. Амундсен на судне "Фрам" отправился в Арктику, чтобы повторить ледовый дрейф другого вы-

дающегося норвежского полярного исследователя Фритьофа Нансена. В ходе плавания в северных широтах Атлантического океана он получил известие о том, что американский исследователь Арктики, адмирал (1911 год) Роберт Пири (1856-1920 гг.) еще 6 апреля 1909 года на собачьих упряжках достиг *Северного полюса Земли*. После этой новости Р. Амундсен неожиданно для участников плавания взял курс на Антарктиду. Высадившись в Китовой бухте этого самого южного и вечно покрытого многокилометровыми толщами льда континента Земли, Р. Амундсен, аналогично, как и Р. Пири, на собачьих упряжках спешно двинулся покорять Южный полюс Земли. Он первым достиг его, опередив на 33 дня английскую антарктическую экспедицию, руководимую Робертом Скоттом (1868-1912 гг.), который 18 января 1912 года в невероятно тяжелых условиях достиг Южного полюса Земли, но трагически погиб (замерз во льдах без продуктов питания) на своем обратном пути [4, 7].

Океанологические исследования также имеют достаточно длительную историю. Так, еще в работах древнегреческих ученых Геродота и Посидония описывались приливы, а великий Аристотель указывал на различия в температуре воды на глубинах морей, в течениях и проливах [4]. Плиний Старший изучал биологию моря. В его работах описывалось уже 179 видов морских животных. На основании такого известного ему числа морских животных он считал океан изученным в высокой степени. К этому заметим, что сейчас в океанологии известно около 160 тысяч видов представителей морской фауны [4,5]. Океанологические наблюдения проводились как в эпоху Великих географических открытий, так и нового времени. Об одном из таких комплексных исследований периода 1872-1876 гг. на английском корвете "*Челленджер*" речь пойдет ниже в разделе 3. В конце 19-го века наиболее крупный вклад в исследование Мирового океана внесли русская экспедиция на корвете "*Витязь*" (1886-1889 гг.) и экспедиция США на судне "*Альбатрос*" (1883-1905 гг.) [4]. Обработав огромный материал наблюдений, проведенных на "Витязе"; руководитель русской экспедиции, известный в будущем российский вице-адмирал С.О. Макаров впервые в мире дал полную океанографическую характеристику *северной части Тихого океана*. На основании анализа своих данных и результатов кругосветных экспедиций других русских и иностранных судов он установил *новые закономерности природных процессов Мирового океана* в целом. Он впервые пришел к выводу о том, что поверхностные течения во всех морях Северного полушария имеют, как правило, круговое вращение и направлены они против часовой стрелки. В Южном же полушарии океанические течения движутся по часовой стрелке. Интересно, что С.О. Макаров верно определил причину этого физического явления – отклоняющую силу вращения Земли, подчиняющуюся закону Кориолиса, согласно которому все тела при движении отклоняются в Северном полушарии вправо, а в Южном полушарии – влево. Результаты этой экспедиции имели настолько большое научное значение, что название русского корвета "Витязь" высечено рядом с названием английского корвета

"Челленджер" на фронтоне океанографического музея в г. Монако – старейшего океанографического учреждения мира [4]. Значительный вклад в развитие мировой океанологии внесли такие ученые-океанографы как В. Бьеркнес, М. Кнудсен, С.О. Макаров и Ф. Нансен. Авторами одних из первых обобщающих научных трудов по океанологии были в Германии О. Крюммель, а в России И.Б. Шпиндлер и Ю.М. Шокальский [4, 5]. В конце 19-го столетия экспедиционные исследования океанов и морей стали дополняться стационарными. Например, в России были созданы биологические станции в г. Севастополе и на Соловецких островах [4, 5]. В 1921 году в СССР было создано первое крупное научное океанологическое учреждение – Плавучий морской научный институт. Крупный вклад в советскую океанологию внесли такие ученые как Н.М. Книпович, Ю.М. Шокальский, Н.Н. Зубов, В.Б. Штокман, В.В. Шулейкин и П.П. Ширшов [4, 5]. Советский исследователь Арктики, академик АН СССР (с 1939 года), Герой Советского Союза (1938 год) Петр Петрович Ширшов (1905-1953 гг.) опроверг ошибочное представление людей о безжизненности Северного Ледовитого океана в высоких широтах. Он стал одним из основных организаторов в 1946 году Института океанологии АН СССР и его первым директором (1946-1953 гг.) [4]. В 1946 году учеными СССР и США был открыт сверхбольшой *подводный звуковой канал*, звук по которому распространяется на сверхбольшие расстояния [4], а в 1960-х годах под основными течениями Мирового океана были открыты соответствующие противотечения [5].

2. Мировой океан и его роль для планеты Земля. Воды Мирового океана составляют основную часть гидросферы Земли – ее океаносферу. Известно, что на морские воды океана приходится более 96 % (около 1338 миллионов км³) от всей воды Земли [2]. Объем пресных вод, поступающих в океан с речным стоком и атмосферными осадками, не превышает 0,5 миллиона км³ [2, 4]. Этим обстоятельством обуславливается постоянство солевого состава морских вод океана и незначительные изменения их плотности. Единство Мирового океана как водной массы обеспечивается её непрерывным движением как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Если мысленно собрать всю воду *Мирового океана* (примерно 1,34 миллиарда км³) в единую емкость и сделать из неё шар, то получится небольшая водяная планета диаметром около 1400 км [4, 5]. В океане, как и в земной атмосфере, нет резких природных границ. Именно здесь осуществляется глобальный механизм трансформации тепловой энергии и обмена веществ, который поддерживается неравномерным нагревом солнечной радиацией поверхностных вод и земной атмосферы. Всем нам хорошо известно, что на поверхности Земли жизнь в растительном и животном мирах поддерживается благодаря солнечной энергии. Это основной энергетический источник жизни на Земле. Недавно учеными был открыт совершенно другой энергетический источник жизни на Земле – термальная энергия, выходящая на больших морских глубинах из земных недр из-за расколов тонкой коры Земли в некоторых зонах Мирового океана и обу-

словленная расплавленной (перегретой) вязкой мантией Земли, находящейся под высоким давлением. Такие бьющие из-под земли (со дна океана) термальные источники становятся теми энергетическими центрами, вокруг которых, несмотря на практически полную темноту и высокое давление окружающей жидкой среды, активно развивается подводная жизнь (например, для красных трубчатых червей больших размеров и разных ракообразных организмов). Учеными из разных областей знаний на основании многочисленных результатов опытных наблюдений было показано, что Мировой океан играет огромную роль в формировании климата на планете Земля. Под действием солнечной радиации вода испаряется и переносится на континенты, где выпадает в виде различных атмосферных осадков. Океанические течения, перенося нагретые или охлажденные воды в другие широты нашей планеты, в значительной мере ответственны за распределение тепла по поверхности Земли. Сейчас однозначно установлено, что морские течения, связанные с перемещением огромных масс океанической воды, оказывают серьезное влияние на климат многих регионов мира. Как мы уже отмечали выше, на направление морских течений в Мировом океане оказывает влияние отклоняющая сила Кориолиса, вызванная круговым вращением Земли. В Северном полушарии она отклоняет морские течения вправо, а в Южном полушарии – влево. Скорость океанических течений в среднем не превышает 10 м/с, а в глубину они распространяются не более чем на 300 м [2, 5]. Глубочайшей точкой Мирового океана является *Марианская впадина*, находящаяся в Тихом океане вблизи Северных Марианских островов. Её максимальная глубина – 11022 м [2]. Она была частично исследована еще в 1951 году британской подводной лодкой "Челленджер II", в честь которой самая глубокая часть этой впадины получила название "Бездна Челленджера" [5, 7]. Мировой океан обладает огромными рыбными и сырьевыми ресурсами. Он имеет громадное транспортное значение. Ведь по нему морскими судами перевозится огромное количество грузов между мировыми морскими портами. По цене перевозки единицы условного груза на единицу расстояния морской транспорт один из самых дешёвых, но далеко не самый быстрый. Для сокращения протяжённости морских путей в мире были построены глубоководные каналы, важнейшими из которых являются Панамский (в Центральной Америке) и Суэцкий (на Ближнем Востоке в Северо-восточной части Африки) [2, 4].

3. Научное исследование Мирового океана. Начнем с того, что в 1940-е годы в Европе был изобретен "*акваланг*", существенно помогший людям при изучении морских глубин. Кстати, этот термин происходит от латинского слова "*aqua*" – "*вода*" и английского слова "*lung*" – "*легкое*" [3] и поэтому им обозначается "*аппарат, помогающий человеку дышать под водой*". В баллонах акваланга (как правило, их не более двух) содержится запас сжатого воздуха, позволяющий с помощью специальной аппаратуры, включающей дыхательную маску, резиновые шланги и редуктор, человеку-аквалангисту пребывать в океане на глубине погружения не более 100 м до 1,5-2 часов.

Принято считать, что изобретен акваланг был французскими исследователями морских глубин Ж.-И. Кусто и Э. Ганьяном в 1943 году [8]. Отметим здесь и тот интересный научно-технический факт, что прославленный французский океанограф, кинорежиссер, зачинатель многих подводных экспедиций (исследований) и киносъемок Жак-Ив Кусто (1910-1997 гг.) стал изобретателем и современной фотокамеры для подводных съёмок. Укажем и то, что он был с 1952 года и до конца своей жизни бессменным руководителем морских экспедиций на известном любителем морских путешествий научно-исследовательском судне "*Калипсо*" [5, 7]. До изобретения акваланга морские глубины исследовались людьми обычно с палуб надводных кораблей различной конструкции, бороздящих по бескрайним океанским просторам [4, 9].

Научное исследование Мирового океана фактически началось еще в 19-ом веке. Первое же серьёзное морское плавание по основным океанам Земли (Атлантическому, Индийскому и Тихому океанам) с научной целью состоялось в период 1872–1876 гг. на борту специально снаряжённого для этого британского парусно-парового судна "*Челленджер*" (рис. 1), команда которого состояла из моряков и учёных [10].



Рис. 1. Английское парусно-паровое океанографическое судно-корвет "*Челленджер*", совершившее первое в мире длительное плавание для проведения комплексных и обширных научных исследований Мирового океана [10]

Результаты этой длительной океанографической экспедиции по ряду основных океанов (рис. 2) обогатили знания человека об океанах, их фауне и флоре [8]. В ходе экспедиции было получено такое количество новых сведений, что над их обработкой трудились около 70 ученых-океанографов и биологов почти целых 20 лет. Изданные результаты научных исследований этой экспедиции составили 50 больших томов [5]. Данной экспедицией впервые было обнаружено, что дно океана имеет очень сложный рельеф, что и в глубинах океана существует жизнь, несмотря на царящий здесь мрак и холод. Многие из того, что мы сейчас знаем об океанах (морях) и их обитателях, было обнаружено впервые научной экспедицией на корвете "*Челленджер*", хотя она лишь приподняла край завесы над неведомым миром океанских глубин. Для промера глубин океана на корвете "*Челленджер*" имелись специальные лотлины, содержащие свинцовые шары весом 91 кг, закреплённые на пеньковом канате. Этот метод промера глубины не обеспечивал нужной

точности измерения больших морских глубин, а опускание лотлиня на дно глубоководного желоба могло длиться часами. Появление в 1920-е годы на морских судах *ультразвуковых эхолотов* позволяло при известной скорости распространения звука в морской воде (например, при температуре 0 °С она равна около 1485 м/с [11]) определять глубины океана за считанные секунды по времени, прошедшему между посылкой звукового импульса и приёмом отражённого от морского дна сигнала. Оснащённые эхолотами суда измеряли глубину по ходу своего надводного следования и легко получали профиль ложа (дна) океана.

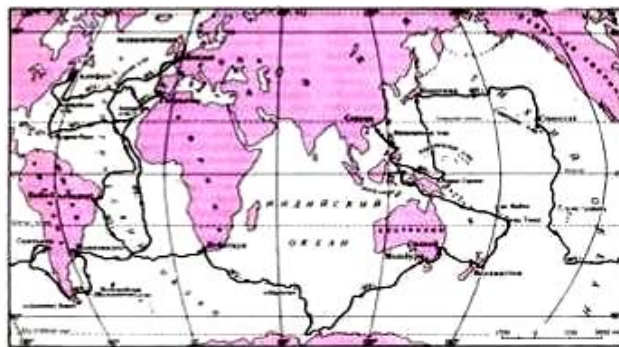


Рис. 2. Карта маршрутов плавания английского научно-исследовательского судна "*Челленджер*" (1872-1876 гг.) [10]

После Второй мировой войны началось интенсивное исследование Мирового океана. Научные открытия в период 1950-1960-х гг., связанные с видами пород океанической коры на морских глубинах, произвели настоящую революцию в науках о Земле. Они доказали относительно молодой возраст океанов и подтвердили, что породившее их (океаны) движение земных литосферных плит продолжается и сегодня, медленно изменяя облик нашей Земли. Как известно, движение этих плит, образующих твердую кору Земли, вызывает на нашей планете землетрясения и извержения вулканов и приводит к образованию гор [9]. Систематическое изучение дна Мирового океана в военных и гражданских целях началось именно с появлением ультразвукового эхолота. С помощью этого прибора было установлено, что большая часть дна океанов представляет собой ровные поверхности, так называемые абиссальные равнины. Их средняя глубина достигает 5 км. В центральных частях всех океанов расположены линейные поднятия дна на 1-2 км, образующие срединно-океанические хребты, которые связаны в единую подводную горную сеть [2]. Исследования Мирового океана в 20-ом веке активно велись на научно-исследовательских судах. Они совершали регулярные рейсы в определённые районы океанов мира. Большой вклад в науку внесли исследования на таких отечественных судах как "*Витязь*", "*Академик Курчатов*" (рис. 3), "*Академик Мстислав Келдыш*". Проводились и крупные международные научные эксперименты в открытом океане (например, Полигон-70, МОДЕ-1 и ПОЛИМОДЕ) [2, 9]. Отметим, что при подобных океанологических исследованиях использовались также и лучшие глубоководные обитаемые аппараты разных стран мира (например, "*Пайсиус*" (рис. 5), "*Триест*" (рис. 6 и 7) и "*Мир-1*" (рис. 8).

Для изучения строения тонкой океанической коры во второй половине 20-го столетия была открыта международная программа "Мохол" по бурению океанического дна до границы с верхней мантией Земли.



Рис. 3. Советское научно-исследовательское судно "Академик Курчатов", многочисленные экспедиции которого внесли большой вклад в изучение Мирового океана [12]

Одним из основных результатов этой программы стало подтверждение разработанной в 1960-е годы ведущими учеными-геофизиками мира геологической теории о движении земной литосферы. На рис. 4 приведен внешний вид судна "Гломар Челленджер", предназначенного для проведения глубинного бурения дна океана с получением кернов породы длиной до 1 км [10]. Пробурив несколько сот скважин, эта плавучая буровая установка позволила получить бесценный материал по истории эволюции Мирового океана. Наряду с глубоководным бурением сейчас при изучении Мирового океана активно применяются и геофизические методы исследования, позволяющие получать наиболее ценный материал по происхождению и развитию океанических впадин. Геофизические методы включают в себя сейсмическое зондирование относительно тонкой земной коры под океаном, исследование магнитного и гравитационного полей, а также изучение теплового потока из недр Земли [10].



Рис. 4. Первое океанологическое судно "Гломар Челленджер", проводившее бурение дна океана на глубину до 1000 м (при толще морской воды над ним до 6000 м) [10]

Геологические исследования донных пород океана, познание истории эволюции океанического ложа невозможны в наши дни без развития методов лабораторного анализа и методов обработки получаемых

материалов. Современные физико-химические методы позволяют получать сведения о возрасте, происхождении и составе тех или иных геологических объектов, поднятых со дна океана. При этом широко используются рентгеноструктурный анализ, геохимические исследования и изучение изотопного состава океанических осадков. По изотопам углерода, урана, протактиния, иония и тория геологи научились в настоящее время определять абсолютный возраст горных пород, по изотопам кислорода – температуры океанических вод в те или иные геологические эпохи [9].

В конце 1970-х годов в мире были запущены первые океанографические искусственные спутники Земли ("SEASAT" в США и "Космос-1076" в СССР) [2, 9]. В 2006 году спутник НАСА (США) "Jason-2" начал участвовать в международном океанографическом проекте "Ocean Surface Topography Mission" для исследования циркуляции вод Мирового океана и колебаний его уровня [2]. Кроме того, 12 апреля 2007 года для исследования окраски и температуры вод Мирового океана был запущен китайский искусственный спутник Земли "Хайянь-1В" ("Ocean-1В") [9].

При исследовании больших глубин сейчас применяются такие подводные аппараты как *батискафы* и *батисферы* [1, 9]. Термин "батискаф" (происходит от греческих слов "bathus" – "глубокий" и "skaphos" – "судно" [3]) обозначает "самоуправляемый аппарат для исследования морских глубин". Водоизмещение батискафа составляет до 220 тонн, а экипаж состоит из 1-3 человек. Он свободно и самостоятельно опускается на дно океана (моря) и поднимается на его поверхность. Батискаф состоит из высокопрочного шара – гондолы для размещения экипажа и необходимой бортовой аппаратуры, включающей системы жизнеобеспечения, движения под водой, освещения, фотосъемки, забора в океане лабораторных образцов (например, воды, грунта, фауны и флоры) и средств связи [1, 5]. Сравнительно легкий несущий корпус батискафа заполнен твердым балластом и балластной жидкостью, причем более легкой, чем вода. Эта жидкость обеспечивает батискафу хорошую плавучесть в толще морской воды. Изобретателем батискафа является швейцарский инженер Огюст Пикар (1884-1962 гг.) [8]. Батисфера, в отличие от батискафа, представляет собой сферической формы аппарат, состоящий из толстой стальной кабины, которую на стальном тросе с помощью стрелы морского крана опускают в океанические воды с борта корабля. В современных батискафах (батисферах) устраиваются специальные отсеки с круглыми иллюминаторами, оборудованные мощными прожекторами. Через специальные камеры-шлюзы ученые-аквалангисты, снаряженные в специальные гидрокостюмы, могут выходить из этих подводных аппаратов в морскую воду и ограниченное время путешествовать по дну океана. В конце 1965 года был благополучно испытан подобный глубоководный аппарат французского океанолога Ж.-И. Кусто. Этот аппарат содержит технические приспособления, при помощи которых в случае аварии он может самостоятельно всплывать на поверхность моря [7, 8].

4. Основные достижения в XX столетии при надводном и подводном покорении Мирового океана. Вкратце укажем в хронологическом порядке

ряд достижений в освоении Мирового океана, осуществленных с помощью надводных и иных кораблей:

- В период 1918-1920 гг. выдающийся норвежский исследователь Арктики и Антарктиды Р. Амундсен проплыл вдоль северных берегов Евразии на судне "Мод" с двигателем внутреннего сгорания. В 1926 году он руководил первым перелетом через Северный полюс Земли на дирижабле "Норвегия" [7].

- С помощью мощных надводных судов и экспериментальных подводных глубоководных аппаратов уже в 1950-е годы была открыта *сложная система глубоководных желобов* – этого совершенно уникального феномена Мирового океана [2, 10]. Понимание генезиса этого феномена является несомненным ключом к познанию происхождения океанических впадин. Исключительно важное место в изучении глубоководных океанических желобов занимают исследования советских ученых, проводимые с 1949 года на первоклассном экспедиционном судне "Витязь" с дизельным двигателем, имевшем при своем водоизмещении в 5,5 тысяч тонн 13 научных лабораторий и 70 научных сотрудников на борту [2, 4].

- Важнейшим событием в изучении Мирового океана является открытие в конце 1950-х годов *единой планетарной системы срединных океанических хребтов* (работы Юинга и Хизена, 1956 год и Менарда, 1958 год) [10]. С учетом результатов научных работ указанных ученых многим геофизикам мира стало ясно, что эти горные структуры образуются и развиваются в океане под действием сложных процессов, происходящих в глубинах мантии Земли.

- 16 августа 1977 года советский атомный ледокол "Арктика" под командованием капитана Юрия Кучиева в надводном плавании достиг Северного полюса Земли. Этот корабль стал первым в истории надводным судном, достигшим "макушки Земли" [7].

- Выдающийся норвежский путешественник и ученый-океанограф Тур Хейердал (1914-2002 гг.) в период 1960-1980-х годов совершил в научных целях под парусом известные всему миру морские плавания в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах на балловом плоту "Кон-Тики", парусных лодках "Ра-1", "Ра-2" и тростниковой лодке "Тигрис" [2, 7]. Заметим, что в 1961 году на Гавайских островах (США) Т. Хейердал был долгожданным гостем на советском исследовательском судне "Витязь" Института океанологии АН СССР [9]. Этими морскими путешествиями Т. Хейердала была опытным путем доказана возможность пересечения океанов еще древними мореходами-шумерами, не обладавшими много столетий назад большими деревянными парусными судами.

Особое место в изучении океана занимают его подводные исследования. Постараемся ниже коротко перечислить основные достижения подобных работ:

- 15 августа 1934 года американские инженер Отис Бартон и биолог Вильям Биб на батисфере "Век прогресса" в районе Бермудских островов достигли глубины в 923 м [7]. Глория Холистер записывала все, что видел В. Биб, и передавала его команды экипажу надводного судна-базы "Реди". По этим записям и наброскам В. Биба художница Эльзе Бостельман выполнила рисунки ряда рыб, впервые увиденных акванавтами на указанной морской глубине [7].

- 26 октября 1948 года швейцарский ученый-океанограф Огюст Пикар и французский биолог Теодор Моно на батискафе собственной конструкции в районе Западной Африки совершили первое глубоководное погружение в автономном обитаемом аппарате на глубину в 1515 м [8]. Эту дату можно считать днем рождения в мире *подводных обитаемых аппаратов*.

- 3 августа 1958 года атомная подводная лодка военно-морских сил (ВМС) США "Наутилус" впервые в мире достигла Северного полюса под водой. В этот день в 23 часа 15 минут командир подлодки Уильям Андерсон объявляет 116 членам экипажа, что они находятся на Северном полюсе Земли [7].

- 29 сентября 1963 года советская атомная подводная лодка "К-181" Северного флота СССР пробив двухметровый вековой лед всплыла на Северном полюсе Земли. Моряки водрузили на нем Государственный флаг СССР и флаг военно-морского флота СССР. Эта подлодка стала первым в послевоенной истории морским кораблем, награжденным орденом Красного Знамени. Командир подлодки – капитан 2-го ранга Ю.А. Сысоев и командующий Северным флотом СССР – вице-адмирал В.А. Касатонов были удостоены высокого звания Героя Советского Союза [5, 7].

- 20 июля 1965 года глубоководный самоходный аппарат "Алвин" ВМС США с сотрудником американского океанографического института, базирующегося в г. Вудс-Холле, Уильямом Рейни (младшим) начал погружение в подводный каньон Язык Океана. Через 1 час 37 минут аппарат достиг морского дна Атлантического океана. Глубина погружения данного батискафа составила в этом случае 1829 м [7].

- Подводный аппарат "Пайсис" (рис. 5) в 1960-е годы стал мощным техническим средством при изучении различных морских организмов, свойств воды, геологии и рельефа дна Мирового океана [10].

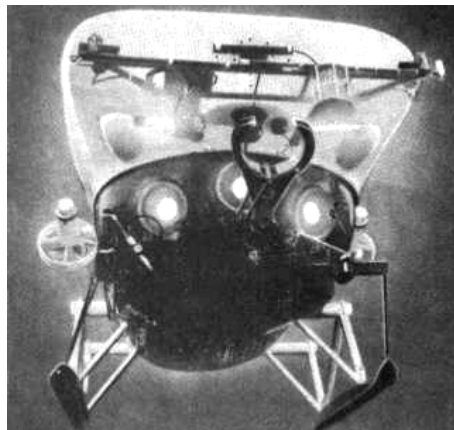


Рис. 5. Подводная исследовательская лодка "Пайсис", максимальная глубина погружения которой в морскую пучину составляла 2000 м (снимок в режиме ее погружения) [10]

- 23 мая 1960 года знаменитый швейцарский ученый-океанограф, профессор Жак Пикар (сын известного изобретателя батискафа О. Пикара) и лейтенант военно-морского флота США Дональд Уолш на батискафе "Триест" (рис. 6, 7) установили мировой рекорд погружения в самом глубоководном районе мира – в Марианской впадине Тихого океана ("Бездне Челленджера") [7]. На швейцарском батискафе "Триест" они, рискуя жизнями, опустились на глубину

10917 м [9]. Одним из важнейших научных результатов этого погружения стало обнаружение указанными акванавтами высокоорганизованной жизни на таких глубинах [2]. В ходе своего уникального рекордного погружения акванавты батискафа "Триест" открыли в океанических глубинах *шесть новых видов морских существ* и подводное течение у дна океана. После них никто из землян не опускался в воды океана на такую глубину, где давление составляло до 1100 атм.



Рис. 6. Спуск на воду глубоководного обитаемого аппарата "Триест", впервые совершившего уникальное погружение в Марианскую впадину Тихого океана (1960 год) [1, 9]

- На рис. 7 в укрупненном виде приведен ставшим историческим швейцарский батискаф "Триест", осуществивший в 1960 году рекордное погружение в Марианскую впадину Тихого океана на 10917 м [7, 9].



Рис. 7. Внешний вид швейцарского глубоководного обитаемого аппарата "Триест" крупным планом (1960 год, внизу батискафа, приобретенного ВМС США, установлена шарообразная гондола для размещения двух акванавтов) [1, 9]

- Наиболее впечатляющими для телезрителей многих стран мира в недавнем прошлом были события в период 1985-1986 гг., связанные с батискафом США "Элвин", когда с его помощью в Атлантическом океане изучались обломки затонувшего пассажирского корабля "Титаник" на глубине до 4000 м [7].

- 11 декабря 1987 года советский глубоководный обитаемый аппарат "Мир-1" (рис. 8) с борта научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш" впервые опустился в Атлантическом океане на глубину в 6170 м [1, 7]. В составе экипажа этого батискафа были советские ученые-океанографы И.Е. Михальцев, А.М. Сагалевич и финский инженер Пека Лаако. Наука океанология в результате данного погружения обогатилась многими неизвестными ранее

фактами из жизни глубоководных морских обитателей, новыми данными по рельефу дна этого океана, придонным отложениям, составу заборной воды на этих глубинах и обитаемой там морской флоре [1, 7].



Рис. 8. Внешний вид спускаемого морским краном на поверхность океана советского глубоководного обитаемого аппарата "Мир-1" (1987 год) [1, 7]

- К началу 21-го века в Российской Федерации был создан глубоководный обитаемый аппарата нового поколения "Мир-2" (рис. 9), используемый при изучении фауны и флоры Мирового океана на предельных глубинах (до 10000 м), разведывании на морских шельфах полезных ископаемых и проведении аварийно-спасательных работ в открытом море [1].



Рис. 9. Внешний вид российского глубоководного обитаемого аппарата нового поколения "Мир-2" (2000 год) [1, 7]

- Отметим, что в 2008 году глубоководные аппараты "Мир-1" и "Мир-2" были использованы российскими специалистами-биологами при изучении акватории самого глубокого пресноводного водоема в мире – озера Байкал (Восточная Сибирь), максимальные глубины которого составляют до 1600 м. При этих глубоководных исследованиях указанные аппараты в сумме совершили более 50 погружений с двумя акванавтами на борту. Итогом этих погружений, с одной стороны, стало понимание того, что происходит в придонных зонах этого уникального озера с неповторимой фауной и флорой. С другой стороны, ученые по данным проведенных физико-химических анализов проб воды из озера убедились в том, что его экосистема способна к самовосстановлению и самоочищению от вредных промышленных загрязнений.

- В мае 2009 года беспилотный батискаф "Непей", созданный Вудсхоулским океанографическим институтом (США), стал третьим подводным аппаратом, достигшим дна Марианской впадины за всю историю ее изучения [7, 9].

- В настоящее время ученые-океанографы и океанологи Китая приняли за активное развитие отечественной научно-технической базы. На рис. 10 представлен внешний вид современного действующего китайского батискафа "*Jiaolong*", оснащенного по последнему слову науки и техники [1, 7]. Данный глубоководный обитаемый аппарат используется КНР в реальных прикладных работах, связанных с проведением подробных обследований китайских морских шельфов (подводных частей континента) на предмет разведывания на них ценных полезных ископаемых.

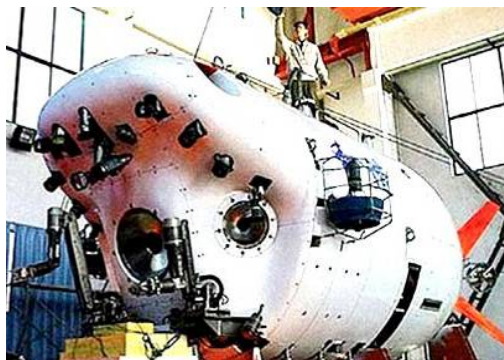


Рис. 10. Внешний вид китайского глубоководного обитаемого аппарата "*Jiaolong*", подготавливаемого в монтажно-испытательном корпусе к работе в океане (2011 год) [1, 9]

Ученые и специалисты Китая при этом не забывают о проведении собственных глубоководных океанографических исследований в районе Желтого моря и Марианской впадины Тихого океана, углубляющих наши познания об окружающей нас природе [1, 4].

- 26 марта 2010 года знаменитый кинорежиссер и искатель приключений Джеймс Кэмерон в одиночку спустился на дно "Бездны Челленджера" в глубоководном аппарате "*Deepsea Challenge*" и провел на дне Тихого океана около трех часов, снимая на видеокамеру все, что можно было увидеть через иллюминаторы [7]. На создание аппарата ушло 10 миллионов долларов. Его конструкцию разработал в Австралии известный инженер и спелеолог Ронни Аллум [9].

5. Ближайшие перспективы в изучении Мирового океана. Океанологи для проведения необходимых измерений и наблюдений непосредственно в толще морской воды используют на сегодня акваланги, подводные лодки, батискафы и стационарные подводные лаборатории. В настоящее время в разных странах мира работает уже до 300 подводных аппаратов, способных погружаться на различные глубины и исследовать морские организмы, свойства морской воды, геологию и рельеф морского дна. Правда, подводные лодки и батискафы не дают возможности исследователю прямо находиться в подводной среде. В них он отделен от нее стенками подводного корабля. Другое дело – подводные научно-исследовательские лаборатории или подводные дома, когда в любое время человек может выплыть из помещения в открытое море. Впервые такие дома поставил на дно Средиземного моря еще известный французский ученый-океанолог и аквалангист Ж.-И. Кусто [2, 13]. Он на собственном примере доказал, что человек может неделями жить под водой, не выходя на поверхность. Для расширения знаний о морских экосистемах и лучшего понимания последствий изменения климата на нашей планете

в Европе сейчас реализуется инновационный проект по углубленному изучению океана. Данный проект направлен на создание в морской воде подводной научно-исследовательской лаборатории "*Sea Orbiter*" (рис. 11), имеющей экипаж до 18 акванавтов, способных жить под водой в течение долгого времени [13]. На этой подводной лаборатории будут созданы все условия для комфортной жизни океанографов: лаборатории и жилые помещения, спортивный зал и библиотека, зоны отдыха и антистрессовые кабинеты.



Рис. 11. Уникальная подводная научно-исследовательская лаборатория "*Sea Orbiter*" (на сегодня она находится пока в проекте, планируемый срок создания – 2013 год) [13]

Отметим, что за разработку и реализацию проекта подводной лаборатории "*Sea Orbiter*" отвечает француз Жак Руджери, специализирующийся на проектировании подводных домов и кораблей с прозрачным днищем [2, 4]. В данный проект уже вложено 43 миллиона долларов [13]. Принцип функционирования этой подводной лаборатории выглядит следующим образом. Гигантский "поплавок лаборатории" будет на две трети погружен в воду, а остальная его часть окажется на поверхности. Энергию для работы своего технического и научного оборудования эта лаборатория будет получать от Солнца, ветра и морских волн. Предполагается, что создаваемая в Европе лаборатория "*Sea Orbiter*" будет находиться в свободном плавании. Следует указать, что в последние годы некоторыми странами для изучения водных пространств Мирового океана на морском дне при глубинах в (10-20) м уже установлены подводные лаборатории (специальные крупногабаритные подводные лодки), оборудованные новейшей научной аппаратурой [2, 13]. В июле 2009 года в Канаде было закончено создание одного из самых больших научных комплексов для исследования Мирового океана [7, 13]. Сейчас в исследованиях Мирового океана участвуют специальные суда, самолеты, искусственные спутники Земли, с помощью цифровой фотоаппаратуры в реальных условиях производится фотографирование и киносъемка подводной фауны и флоры. При изучении обширных по площади участков океанов ученые разных стран объединяют свои научно-технические усилия. Практика показала, что результаты научного исследования

огромных просторов морей и океанов имеют большое значение для рыболовства, судоходства, поиска и добычи различных полезных ископаемых [10].

Одной из вековых проблем в современной науке остается проблема долгосрочного прогноза погоды. Несмотря на наличие работоспособной гидродинамической модели краткосрочного прогноза погоды (ее автор – советский ученый-гидролог И.А. Кибель [14]) и большие современные возможности по решению сложных нелинейных термогидродинамических задач с использованием все более совершенных и все более мощных электронно-вычислительных машин, задача долгосрочного прогноза погоды остается пока нерешенной. По авторитетному мнению еще известного советского ученого-океанографа В.В. Шулейкина причина этого кроется в отсутствии непрерывных атмосферных наблюдений на преобладающей части планеты, занятой ее океанами [14]. В этой связи решить эту сложную задачу в будущем можно будет только при учете взаимодействия между земной атмосферой, Мировым океаном и материками Земли [2, 9].

Как известно, традиционные методы исследования океана с применением исследовательских судов и автономных буёв не позволяют охватить постоянными метеорологическими измерениями всю акваторию любого из известных нам земных океанов или даже его отдельных частей [15]. Поэтому использование космических средств для дистанционного наблюдения с орбитальных космических станций и искусственных спутников Земли за состоянием Мирового океана становится сейчас обыденным делом. Так, 4 марта 2010 года в России был осуществлен успешный запуск ракетносителя с метеорологическим спутником "GOES-P" на борту, предназначенным для изучения климата на нашей планете в рамках международной программы "GOES" [15]. Кроме того, 10 июня 2011 года для реализации международных программ по аэрокосмическому изучению океанов Земли в США был запущен научный спутник "Aquarius", предназначенный для составления первой в мире карты распределения морских солей в Мировом океане [15]. Заметим, что благодаря электромагнитному зондированию с космоса Земли удалось установить, что поверхность Мирового океана на самом деле не всюду гладкая. Так, на севере Индийского океана она понижена на ~100 м, а на западе Тихого океана – поднята на ~80 м. В ближайшие годы космические наблюдения в мире за земной сушей и Мировым океаном, судя по материалам из [15], будут активизированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://fideviva.ru/submariny-batiskafy-i-podvodnye-lodki-kratkaya-istoriya>.
2. http://ru.wikipedia.org/wiki/Мировой_океан.
3. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
4. <http://www.geo-site.ru/index.php/2011-01-11-14-44-21/83/315-izychenie-okeana.html>.
5. <http://rui-tur.ru/izuchenie-okeana.html>.
6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
7. <http://world-ocean.ru/ru/dates>.
8. http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_изобретателей.
9. <http://www.id4.ru/idea/zemlya/issledovanie-okeana>.
10. <http://www.okeanavt.ru/proishojdenie-okeana/1023-osherk-istorii-izushenia-mirovogo-okeana.html>.
11. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
12. <http://www.seapeace.ru/oceanology/science/643.html>.
13. <http://www.spb-venchur.ru/news/16467.html>.
14. <http://www.natuerlich.ru/art1/inter5.shtml>.
15. http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/int_sem7/sem7_1.html.

REFERENCES

1. Available at: <http://fideviva.ru/submariny-batiskafy-i-podvodnye-lodki-kratkaya-istoriya> (accessed 08 August 2011).
2. *Mirovoi okean* (World ocean) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Мировой_океан (accessed 10 June 2012).
3. *Bol'shoy illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
4. Available at: <http://www.geo-site.ru/index.php/2011-01-11-14-44-21/83/315-izychenie-okeana.html> (accessed 11 April 2012).
5. Available at: <http://rui-tur.ru/izuchenie-okeana.html> (accessed 15 August 2012).
6. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushhiesja fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008. 252 p. (Rus).
7. Available at: <http://world-ocean.ru/ru/dates> (accessed 25 September 2011).
8. *Spisok izobretatelei* (List of inventors) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_изобретателей (accessed 22 May 2012).
9. Available at: <http://www.id4.ru/idea/zemlya/issledovanie-okeana> (accessed 21 February 2012).
10. Available at: <http://www.okeanavt.ru/proishojdenie-okeana/1023-osherk-istorii-izushenia-mirovogo-okeana.html> (accessed 05 May 2011).
11. Kuhlning H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
12. Available at: <http://www.seapeace.ru/oceanology/science/643.html> (accessed 19 April 2012).
13. Available at: <http://www.spb-venchur.ru/news/16467.html> (accessed 10 July 2011).
14. Available at: <http://www.natuerlich.ru/art1/inter5.shtml> (accessed 23 March 2012).
15. Available at: http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/int_sem7/sem7_1.html (accessed 03 May 2012).

Поступила (received) 31.08.2012

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.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 a science and technique. Part 24: Subjugation of earthly dry land and world ocean.
A short essay of world history of subjugation and study by humanity of earthly continental dry land and enormous marine spaces of Earth is presented. References 15, figures 11.
Key words: history, subjugation, earthly dry land, world ocean.*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

Наведено результати аналізу впливу струму навантаження тягових електромашин при їх випробуванні на нагрівання на загальні витрати електроенергії на випробування. Показано, що збільшення струму навантаження при випробуванні на нагрівання дозволяє суттєво знизити витрати електроенергії, а також зменшити час випробування без зниження його якості. Бібл. 4, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: тягова електромашинна, випробування на нагрівання, енергетична ефективність, струм навантаження, витрата електроенергії.

Приведены результаты анализа влияния тока нагрузки тяговых электромашин при их испытании на нагрев на общий расход электроэнергии на испытание. Показано, что увеличение тока нагрузки при испытании на нагрев позволяет существенно снизить расход электроэнергии, а также уменьшить время испытания без снижения его качества. Библ. 4, табл. 4, рис. 3.

Ключевые слова: тяговая электромашинна, испытание на нагрев, энергетическая эффективность, ток нагрузки, расход электроэнергии.

Введение. В соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] электрические машины тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта испытывают при приёмо-сдаточных испытаниях в течение одного часа под током нагрузки, дающим превышение температуры обмоток, соответствующее превышению температуры при номинальном режиме. Фактически это значение тока соответствует часовому режиму.

Правила ремонта тяговых электромашин [2] допускают проведение испытаний на нагрев при эквивалентном токе, дающем превышение температуры, соответствующее превышению температуры при номинальном режиме. Общий качественный анализ тепловых процессов, протекающих при испытаниях на нагрев, показывает, что энергия теплоотдачи за время нагревания до заданного превышения температуры обмоток электромашин с ростом тока уменьшается [3]. Следовательно, чем больше значение тока нагрузки испытываемой электромашин, тем, при прочих равных условиях, расход электроэнергии на её нагрев меньше.

Методика расчета. Коэффициент энергетической эффективности нагревания обмоток электромашин, представляющий отношение энергии, затраченной на повышение температуры обмотки якоря, к общей тепловой энергии, выделившейся в частях испытываемой электромашин за время испытания, может быть найден как [3]

$$k_{эфн} = \frac{T_3 \cdot \tau_1}{\tau_\infty(t_1 + \alpha(\tau_\infty t_1 - \tau_1 T_3))},$$

где T_3 – эквивалентная постоянная времени нагревания; t_1 – время испытания; τ_1 – превышение температуры на момент времени t_1 ; τ_∞ – установившееся значение превышения температуры; α – температурный коэффициент сопротивления.

Величина $1/k_{эфн}$ показывает во сколько раз полная энергия потерь в якоре тягового электродвигателя при его испытании на нагрев больше энергии, затраченной на нагревание обмотки якоря [3].

При известном значении τ_1 время испытания t_1 может быть найдено в виде [4]

$$t_1 = T_3 \cdot \ln \frac{\tau_\infty}{\tau_\infty - \tau_1}.$$

Результаты теоретических исследований.

В табл. 1 для примера приведены результаты расчёта зависимостей $t_1 = f(I)$, $k_{эфн} = f(I)$ и $1/k_{эфн} = f(I)$, полученные для тягового электродвигателя НБ-406Б магистрального грузового электровоза ВЛ8 с использованием тепловых характеристик его обмотки якоря ($\tau_1 = 120$ °С).

Таблица 1

Результаты расчёта зависимостей $t_1 = f(I)$ и $k_{эфн} = f(I)$ для тягового электродвигателя НБ-406Б

I, A	340	380	440	485	530	600
$t_1, \text{мин}$	∞	56,5	28,9	20,4	14,9	10,4
$k_{эфн}$	0	0,43	0,57	0,63	0,67	0,7
$1/k_{эфн}$	∞	2,32	1,75	1,59	1,5	1,42

В табл. 2 для примера приведены результаты расчёта зависимостей $t_1 = f(I)$, $k_{эфн} = f(I)$ и $1/k_{эфн} = f(I)$, полученные для тягового электродвигателя ДТ-9Н тягового агрегата ПЭ2М с использованием тепловых характеристик его обмотки якоря ($\tau_1 = 120$ °С).

Таблица 2

Результаты расчёта зависимостей $t_1 = f(I)$ и $k_{эфн} = f(I)$ для тягового электродвигателя ДТ-9Н

I, A	300	335	400	450	500	550
$t_1, \text{мин}$	∞	55,5	25,2	20,5	13,4	10,9
$k_{эфн}$	0	0,43	0,63	0,68	0,73	0,74
$1/k_{эфн}$	∞	2,32	1,6	1,47	1,37	1,34

Графически зависимости $t_1 = f(I)$, $k_{эфн} = f(I)$ и $1/k_{эфн} = f(I)$, полученные для тягового двигателя НБ-406Б (табл. 1), представлены на рис. 1, а для тягового двигателя ДТ-9Н (табл. 2) – на рис. 2.

Из данных табл. 1 и графиков на рис. 1 видно, что при испытаниях на нагрев тягового двигателя НБ-406Б под током нагрузки, близким к пусковому значению (485 А), суммарные потери энергии в якоре почти в 1,5 раза ниже, чем при часовом режиме (380 А). При этом время испытаний на нагрев уменьшается почти в 3 раза.

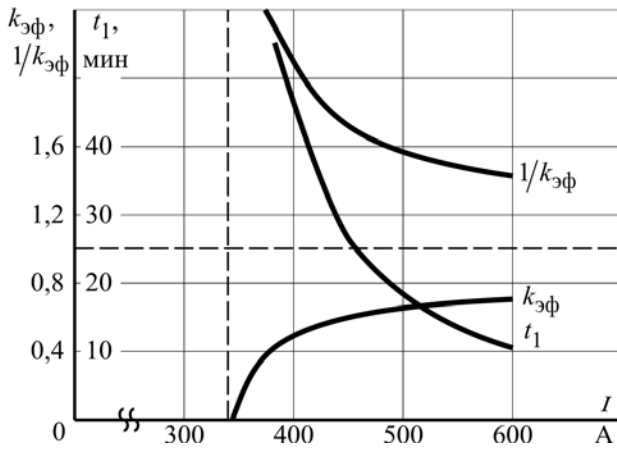


Рис. 1. Зависимости $t_1 = f(I)$, $k_{эфн} = f(I)$ и $1/k_{эфн} = f(I)$ для тягового двигателя НБ-406

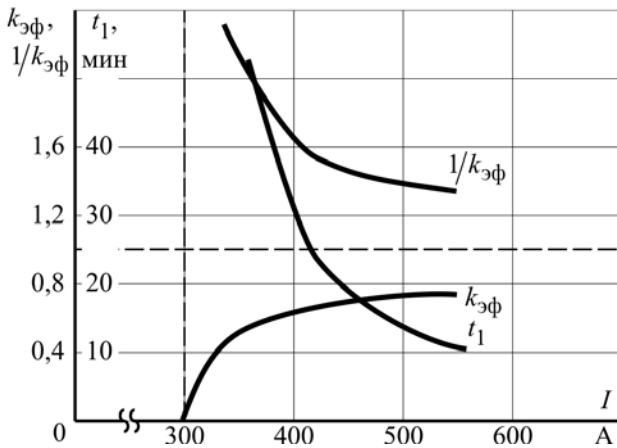


Рис. 2. Зависимости $t_1 = f(I)$, $k_{эфн} = f(I)$ и $1/k_{эфн} = f(I)$ для тягового двигателя ДТ-9Н

Из данных табл. 2 и графиков на рис. 2 видно, что при испытаниях на нагревание тягового двигателя ДТ-9Н под током нагрузки, близким к значению пятнадцатиминутного режима (480 А), суммарные потери энергии в якоре более чем в 1,5 раза ниже, чем при часовом режиме (335 А). При этом время испытаний на нагрев уменьшается в 4 раза.

Необходимо отметить, что суммарные электрические потери в других обмотках испытуемой электромашин при увеличении испытательного значения силы тока снижаются не в меньшей степени, чем потери в лимитирующей обмотке (обмотке якоря). Данные выводы будут справедливы и для других типов тяговых электродвигателей тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Экспериментальные исследования. Для подтверждения данных результатов теоретических исследований были проведены соответствующие экспериментальные исследования, целью которых являлось определение и сравнение суммарных полезных энергий источников испытательного стенда взаимной нагрузки, затраченных на испытания на нагрев тяговых электродвигателей РТ-51Д при пусковом и часовом токе нагрузки.

Экспериментальные исследования проводились на стенде взаимной нагрузки с использованием вольтдобавочной машины (ВДМ) и линейного генератора (ЛГ). Схема стенда взаимной нагрузки приведена на рис. 3.

На первом этапе экспериментального исследования проведено испытание на нагрев тяговых двигателей РТ-51Д при часовом токе нагрузки $I_ч = 266$ А и номинальном напряжении $U_н = 825$ В в течение часа. Коэффициент ослабления поля при испытании был номинальным, $\beta_н = 0,32$.

В конце испытания методом сопротивления были определены превышения температур обмоток якорей обеих тяговых электромашин (генератора G и двигателя M).

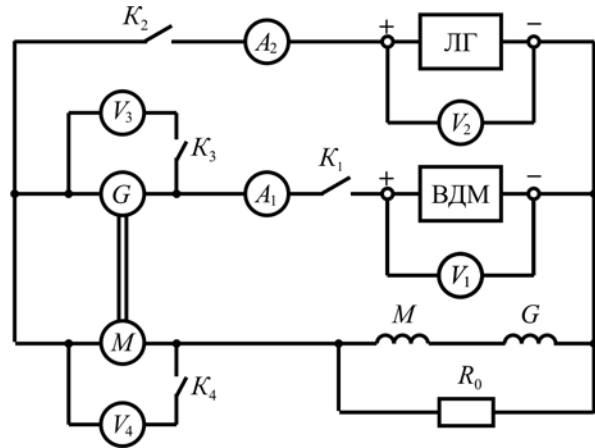


Рис. 3. Схема испытательного стенда

На втором этапе экспериментального исследования проведено испытание на нагрев при пусковом токе нагрузки $I_{пуск} = 370$ А. Значения напряжения и коэффициента ослабления поля тяговых двигателей на втором этапе поддерживались номинальными

Испытания на нагрев при пусковом токе ($I = 370$ А) проводились в течение времени достижения суммарного сопротивления цепи испытуемых двигателей того же значения, которое было зафиксировано в конце испытания в течение часа, при часовом токе нагрузки ($I_ч = 266$ А). Таким образом, было достигнуто условие равенства конечных превышений температур обмоток испытуемых тяговых двигателей для двух режимов нагружения.

Полезные энергии источников испытательного стенда (ВДМ и ЛГ) определялись по значениям их напряжений и токов, которые фиксировались в течение всего времени испытания (для двух режимов нагружения) с помощью вольтметров V_1 и V_2 , а также амперметров A_1 и A_2 .

Суммарная полезная электроэнергия каждого из источников (ВДМ и ЛГ) за время испытания может быть определен в виде:

$$Q_{ЛГ} = \int_0^{t_и} U_{ЛГ} \cdot I_{ЛГ} dt; \quad Q_{ВДМ} = \int_0^{t_и} U_{ВДМ} \cdot I_{ВДМ} dt,$$

где $U_{ЛГ}$, $I_{ЛГ}$ – напряжение и сила тока линейного генератора; $U_{ВДМ}$, $I_{ВДМ}$ – напряжение и сила тока вольтдобавочной машины; $t_и$ – время, затраченное на проведение испытания.

Как показывает опыт многочисленных испытаний на нагрев, ток линейного генератора в течение времени испытания практически не меняется. Это обусловлено отсутствием влияния температуры обмоток тяговых электромашин на величину потерь

холостого хода, которые и определяют ток линейного генератора.

Суммарная полезная энергия линейного генератора при условии постоянства его тока $I_{ЛГ} = \text{const}$ может быть определена в упрощенном виде как

$$Q_{ЛГ} = U_{ЛГ} \cdot I_{ЛГ} \cdot t_{и}.$$

При условии $I_{ЛГ} = \text{const}$ и $I_{д} = \text{const}$ ток ВДМ также постоянен: $I_{ВДМ} = \text{const}$.

Тогда выражение для определения $Q_{ВДМ}$ может быть представлено в виде

$$Q_{ВДМ} = I_{ВДМ} \cdot \int_0^{t_{и}} U_{ВДМ} dt.$$

Для поддержания постоянства тока нагрузки тяговых двигателей напряжение ВДМ по мере роста превышения температуры и сопротивления их обмоток повышается. Форма зависимости $U_{ВДМ}(t)$ повторяет форму изменения во времени суммарного сопротивления всех обмоток тяговых двигателей $\Sigma R(t)$ и имеет такой же характер (экспоненциальный).

Фиксация результатов замера токов и напряжений при испытании под током нагрузки $I_{ч} = 266$ А проводилась каждые 10 минут, а при испытании под током нагрузки $I_{пуск} = 370$ А – каждые три минуты. Испытания по двум этапам проводились с промежутком времени, равным двум суткам.

Результаты замеров токов и напряжений источников для режима $I = 266$ А (первый этап) приведены в табл. 3. Результаты замеров этих же параметров для режима $I = 370$ А (второй этап) приведены в табл. 4.

Сопротивления обмоток якорей определялось методом амперметра-вольтметра на стенде с использованием измерительных щёток. Падения напряжений на якорных обмотках определялись вольтметрами V_3 и V_4 при неподвижных якорях (ЛГ выключен).

Таблица 3

Данные испытаний и результаты расчёта полезных энергий ВДМ и ЛГ для часового режима нагрузки

t , мин	$U_{ВДМ}$, В	$U_{ВДМ\text{ ср}}$, В	$I_{ВДМ}$, А	$Q_{ВДМ}$, кВт·ч	$I_{ЛГ}$, А	$U_{ЛГ}$, В	$Q_{ЛГ}$, кВт·ч
0	87	–	266	–	11	–	–
10	97	92	266	3,297	11	825	1,513
20	105	101	266	3,619	11	825	1,513
30	111	108	266	3,870	11	825	1,513
40	117	114	266	4,085	11	825	1,513
50	122	119,5	266	4,282	11	825	1,513
60	126	124	266	4,443	11	825	1,513

Превышения температур якоря электромашины, которая испытывалась в режиме двигателя, в двух опытах ($I = 266$ А и $I = 370$ А) составили соответственно 110 и 112 °С. Время испытания при токе $I_{пуск} = 370$ А составило $t_2 = 16$ мин.

Значения полезной энергии вольтдобавочной машины для двух испытаний определены путём суммирования отдельных составляющих, полученных для каждого отрезка времени по среднему значению $U_{ВДМ}$ на соответствующем отрезке.

Результаты расчёта полезных энергий ВДМ и ЛГ, отданных за время испытания, для часового

режима нагрузки ($I = 266$ А) приведены в табл. 3, а для пускового режима нагрузки ($I = 370$ А) – в табл. 4.

Суммарные полезные энергии ВДМ и ЛГ для часового режима нагрузки соответственно:

$$\sum Q_{ВДМ\text{ ч}} = 23,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad \sum Q_{ЛГ\text{ ч}} = 9,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарная полезная энергия двух источников (ВДМ и ЛГ) для часового режима нагрузки

$$\sum Q_{ч} = 32,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таблица 4

Данные испытаний и результаты расчёта полезных энергий ВДМ и ЛГ для пускового режима нагрузки

t , мин	$U_{ВДМ}$, В	$U_{ВДМ\text{ ср}}$, В	$I_{ВДМ}$, А	$Q_{ВДМ}$, кВт·ч	$I_{ЛГ}$, А	$U_{ЛГ}$, В	$Q_{ЛГ}$, кВт·ч
0	157	–	370	–	10	–	–
3	170	163,5	370	3,025	10	825	0,413
6	182	176	370	3,256	10	825	0,413
9	193	187,5	370	3,469	10	825	0,413
12	202	197,5	370	3,654	10	825	0,413
15	212	207	370	3,830	10	825	0,413
16	215	213,5	370	1,317	10	825	0,138

Суммарные полезные энергии ВДМ и ЛГ для пускового режима нагрузки соответственно:

$$\sum Q_{ВДМ\text{ п}} = 18,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}; \quad \sum Q_{ЛГ\text{ п}} = 2,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарная полезная энергия двух источников (ВДМ и ЛГ) для пускового режима нагрузки

$$\sum Q_{п} = 20,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Отношение суммарных полезных энергий двух источников (ВДМ и ЛГ) в часовом и пусковом режимах нагрузки

$$\frac{\sum Q_{ч}}{\sum Q_{п}} = 1,57.$$

Экономия суммарной полезной энергии двух источников (ВДМ и ЛГ) в пусковом режиме нагрузки в сравнении с часовым режимом

$$\Delta Q = \sum Q_{ч} - \sum Q_{п} = 11,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Данная экономия составляет 36 % от суммарной полезной энергии для часового режима нагружения.

Мощность потерь холостого хода в малой степени влияет на превышение температуры обмотки якоря, но составляют существенную долю в общей мощности потерь в стенде взаимной нагрузки. Существенное сокращение времени испытания на нагрев (в 3 – 4 раза) в той же степени уменьшает общую полезную энергию, которая расходуется на покрытие потерь холостого хода.

Из результатов расчёта видно, что общая полезная энергия линейного генератора (ЛГ), который покрывает потери холостого хода, при испытании на нагрев с пусковым током нагрузки в 4 раза ниже, чем при испытании в часовом режиме. Такой характер снижения общей энергии потерь холостого хода при увеличении тока нагрузки будет присущ всем вариантам систем взаимного нагружения, независимо от того, каким способом в них компенсируются потери холостого хода.

Результаты расчёта по данным экспериментальных исследований достаточно хорошо согласуются

с результатами теоретических исследований, представленных выше.

Выводы. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- энергетическая эффективность испытания на нагрев может быть представлена как комплексный параметр, зависящий как от энергетической эффективности системы взаимного нагружения, так и от энергетической эффективности нагревания обмоток испытуемых электромашин;
- энергетическая эффективность нагревания обмоток испытуемой тяговой электромашин зависит как от тепловых характеристик электромашин, так и от тока нагрузки, с увеличением которого коэффициент энергетической эффективности нагревания повышается, а время проведения испытания уменьшается;
- наиболее рациональными для испытания на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта являются часовой ток и ток пятнадцатиминутного режима соответственно;
- использование пускового и пятнадцатиминутного токов нагрузки позволяет уменьшить расход электроэнергии на испытание тяговых электромашин на нагрев не менее чем на 30 % (в сравнении с часовым режимом), а также уменьшает время испытаний на нагрев в 3 – 4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
2. Правила ремонту электричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0204. – К.: Видавничий дім "САМ", 2012. – 286 с.
3. Афанасов А.М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электромашин при приёмо-сдаточных испытаниях // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – Том 5. – №8(59). – С. 6-9.
4. Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А. Тяговые электрические машины: учеб. пособие для вузов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.

REFERENCES

1. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashchaiushchiesia tiagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviia* [State Standard 2582-81. Rotating traction electrical machines. General specifications]. Moscow, Publishing House of Standards, 1981. 34 p. (Rus).
2. *Pravyly remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropoizdiv. TsT-0204* [Repair rules of electrical machines for locomotives and trains. TsT-0204]. Kyiv, SAM Publishing House, 2012. 286 p. (Ukr).
3. Afanasov A.M. Energy efficiency of coils heating of traction dynamoelectric machines during acceptance testing. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2012, vol.5, no.8(59), pp. 6-9. (Rus).
4. Zakharchenko D.D., Rotanov D.D. *Tiagovye elektricheskie mashyny* [Traction electrical machines]. Moscow, Transport Publ., 1991. 343 p. (Rus).

Поступила (received) 03.10.2014

*Афанасов Андрей Михайлович, д.т.н., доц.,
Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна,
49010, Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2,
тел/phone +38 056 3731531, e-mail: afanasof@ukr.net*

*A.M. Afanasov
Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after academician V. Lazaryan,
2, Lazaryan Str., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine.*

Increase of energy efficiency of testing of traction electric machines of direct and pulsating current.

The results of the analysis of the effect of the load current of traction electric machines when tested for heating on the total electricity consumption for the test are presented. It is shown that increase of load current at the heating test permits to significantly reduce the consumption of electrical energy, and reduce the testing time without reducing its quality. References 4, tables 4, figures 3.

Key words: electric traction machine, test for heat, energy efficiency, load current, electric energy consumption.

ОЦЕНКА РАСХОДА РЕСУРСА БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ПОМОЩЬЮ УТОЧНЕННОЙ ФОРМУЛЫ ИНТЕГРАЛА СТАРЕНИЯ

Запропоновано уточнення формули інтегралу старіння. Розроблено комп'ютерну модель зносу ізоляції з використанням уточненої формули. Виконано моделювання зносу ізоляції потужного трансформатору впродовж наступних десяти років експлуатації. Бібл. 4, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: інтеграл старіння, силовий трансформатор, знос ізоляції, прогноз, моделі технічного стану та факторів експлуатації.

Предложено уточнение формулы интеграла старения. Разработана компьютерная модель износа изоляции с использованием уточненной формулы. Выполнено моделирование износа изоляции силового трансформатора в течение следующих десяти лет эксплуатации. Библ. 4, табл. 4, рис. 3.

Ключевые слова: интеграл старения, силовой трансформатор, износ изоляции, прогноз, модели технического состояния и факторов эксплуатации.

Введение. Силовой трансформатор (СТ) – один из важнейших элементов систем электроснабжения. Оценка текущего состояния и прогнозирование остаточного ресурса трансформаторного оборудования является актуальной научно-технической задачей, особенно учитывая общую тенденцию старения трансформаторного парка Украины. Срок службы трансформатора в большой степени определяется состоянием его изоляции. В процессе эксплуатации бумажно-масляная изоляция подвергается влиянию повышенной температуры, увлажнению, окислению. Эти факторы оказывают влияние на ее техническое состояние в каждый определенный момент времени, и, соответственно, на срок службы трансформатора.

В настоящее время большое внимание уделяется внедрению систем непрерывного контроля, в частности, систем непрерывного контроля состояния изоляции СТ. Такие системы позволяют осуществлять контроль параметров изоляции в реальном времени. Базируясь на полученных данных возможно спрогнозировать расход ресурса изоляции в течение предстоящих лет эксплуатации.

Анализ исследований. Одним из расчетных методов определения расхода ресурса изоляции обмоток СТ является формула интеграла старения, корректировка которой предложена в работах [1, 2]:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \left(\frac{K}{K_{\text{БАЗ}}} \right)^{2,05} \times \left(\frac{W}{W_{\text{БАЗ}}} \right)^{1,493} \cdot \exp \left[\ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt, \quad (1)$$

где $L(t_0, t_0 + T)$ – износ изоляции в интервале времени, который начинается в момент t_0 и имеет длительность T ; $K, K_{\text{БАЗ}}$ – текущий и базовый показатель кислотности масла, выраженный в мг КОН/г, соответственно; $W, W_{\text{БАЗ}}$ – текущий и базовый показатель влагосодержания бумажной изоляции, выраженный в % от массы, соответственно; θ_h – температура наиболее нагретой точки изоляции выраженная в °С; Δ – интервал температур θ_h , на котором происходит, при прочих равных условиях, удвоение износа изоляции, $\Delta = 6$ °С

или 7 °С в соответствии с международными и российскими стандартами [3].

Подынтегральное выражение в формуле (1) можно представить в виде:

$$V = V_K \cdot V_W \cdot V_\theta, \quad (2)$$

где V – относительная скорость старения бумажной изоляции СТ (за единицу принята скорость старения высушенной и пропитанной маслом бумаги с остаточным содержанием влаги 0,3 % и температуре 98 °С [4]); V_K – относительная скорость старения изоляции, зависящая от степени окисленности трансформаторного масла; V_W – относительная скорость старения изоляции, зависящая от степени увлажненности бумаги; V_θ – скорость термического износа изоляции. Формула (1) справедлива для обычной трансформаторной бумаги. Скорость V_θ , вычисляемая по формуле (3), будет отличаться при использовании термически улучшенной бумаги.

Зависимость скорости старения от значения влажности выводится авторами [1, 2] на основе двух точек, полученных из графика 19.12 [4]. Значению $W = 0,3$ % соответствует значение скорости износа $V_W = 1$, а при $W = 1,0$ % скорость износа увеличится в 6 раз, то есть $V_W = 6$. В частности, эти значения используются для аппроксимации исходных данных с помощью степенной функции от времени t :

$$V_W = \left(\frac{W(t)}{W_{\text{БАЗ}}} \right)^{1,493}. \quad (3)$$

Недостатком формулы (3) является то, что значения аппроксимации, полученные в одном интервале, используются для вычислений вне этого интервала. При этом вклад фактора W в величину расхода L преобладает над остальными. В качестве примера можно принять значение кислотного числа масла K , равным 0,15 мг КОН/г (что соответствует значению ограничивающему область нормального состояния по ГОСТ 5985-79). Влажность бумажной изоляции W изменяется от 0,3 % (допустимое содержание влаги в новой высушенной изоляции) до 5 % (в соответствии

с РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытания электрооборудования" 4 % является допустимым значением влажности СТ находящегося в эксплуатации). Значения $K_{БАЗ}$ и $W_{БАЗ}$ равны, соответственно, 0,1 мг КОН/г и 0,3 %. Температура наиболее нагретой точки θ_h принята равной 104 °С. В соответствии с таблицей, приведенной в [3] относительная скорость износа изоляции при такой температуре увеличивается вдвое. Результаты расчета факторов V_W , V_θ и V_K по формуле (1) для приведенных значений представлены в табл. 1.

Расчет скорости износа

$W, \%$	V_W	$K, \text{мг КОН/г}$	V_K	$\theta_h, \text{°C}$	V_θ
0,3	1	0,15	2,29	104	2
1	6,03	0,15	2,29	104	2
1,5	11,05	0,15	2,29	104	2
2	16,98	0,15	2,29	104	2
3	31,117	0,15	2,29	104	2
4	47,811	0,15	2,29	104	2
5	66,7	0,15	2,29	104	2

Из полученных результатов видно, что при увеличении значения W при неизменных значениях других исходных данных пропорциональное отношение V_W к V_θ и V_K резко возрастает. При $W=5\%$ V_W превышает значение V_K в 29,12 раз, а значение V_θ – в 33,35 раза.

Задача исследования. Цель исследования заключается в повышении достоверности оценки расхода ресурса бумажной изоляции СТ. Для достижения поставленной цели необходимо:

- рассмотреть возможность расширения базы исходных данных для оценки скорости старения,
- провести коррекцию формулы интеграла старения;
- выполнить компьютерное моделирование, которое позволит определить разницу в полученных значениях прогнозируемого износа

Методы и результаты. Для корректировки зависимости скорости старения от влажности бумаги используем третью точку – в [4] указано, что если

принять скорость старения при влажности 0,3 % за 1, то при 1 % влажности скорость старения увеличивается в 6-16 раз, а при 4 % – в 12-45 раз. Эти данные можно представить в виде таблицы (см. табл. 2).

Данные табл. 2 для значений скорости старения могут быть аппроксимированы с помощью экспоненциальной, степенной, линейной, логарифмической функций, коэффициенты которых приведены в табл. 3.

Таблица 2

Исходные данные

Влажность, %	Диапазон оценок скорости старения по [4].	Усредненное значение
0,3	1	1
1,0	6-16	11
4,0	12-45	28,5

Как видно из табл. 3 наибольшее значение величины достоверности R может быть получено при использовании логарифмической функции. Для дальнейших расчетов примем функцию, полученную для усредненных значений:

$$V_W = 10.66 \ln(Wt) + 12.85, \quad (4)$$

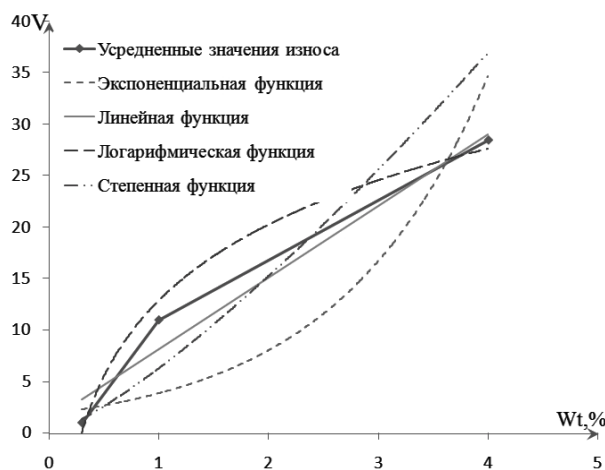


Рис. 1. Результаты аппроксимации усредненных значений зависимости скорости износа СТ от степени увлажнения бумажной изоляции

Таблица 3

Результаты аппроксимации значений зависимости скорости износа СТ от степени увлажнения бумажной изоляции

Функция	Общий вид функции	a			b			Величина достоверности R^2		
		Минимальные	Максимальные	Усредненные	Минимальные	Максимальные	Усредненные	Минимальные	Максимальные	Усредненные
Экспоненциальная	$y = ae^{bx}$	1,601	2,086	1,869	0,540	0,825	0,730	0,686	0,679	0,691
Линейная	$y = ax + b$	2,683	11,23	6,956	1,592	0,827	1,210	0,917	0,973	0,964
Логарифмическая	$y = a \ln(x) + b$	4,248	17,08	10,66	6,075	19,62	12,85	0,999	0,980	0,986
Степенная	$y = a \cdot x^b$	3,927	8,206	6,285	0,947	1,451	1,278	0,917	0,913	0,921

Подставив имеющиеся значения поочередно в формулы (3) и (4) можно рассчитать значения скорости износа и оценить отклонения, полученные при применении предложенной формулы (табл. 4). Из табл. 4 видно, что полученные с использованием

предложенной методики значения скорости износа значительно отличаются от значений, полученных с помощью формулы (3).

Для дальнейших исследований примем формулу интеграла старения, имеющую следующий вид:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \left(\frac{K}{K_{\text{БАЗ}}} \right)^{2,05} \times (10,66 \ln(W_t) + 12,85) \cdot \exp\left[\ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta}\right] dt. \quad (5)$$

Таблица 4

Результаты расчета скорости износа по (3) и (4)

Результаты по (3)		Результаты по (4)		Отклонение в % при применении (4)
$W, \%$	V_W	$W, \%$	V_W	
0,3	1	0,3	0,015	98,5
1	6	1	12,85	114,16
4	47,2	4	27,62	41,48

Для оценки влияния изменений V_K , V_W , и V_θ под действием внешних воздействий на СТ в период эксплуатации формулы (1) и (5) реализованы как блок оценки износа ОИ в модели для прогнозирования процессов износа изоляции, структурная схема которой приведена на рис. 2. Кроме этого данная модель содержит вектора параметров прогноза (ПП), модели факторов эксплуатации (ФЭ), технического обслуживания (ТО), технического состояния (ТС) БИ и ТМ, а также генератор меток времени (МВ).

Модель ТС БИ построена на основе уравнения теплового баланса СТ. Она позволяет определить тренд температуры θ_h на основании трендов тока нагрузки I_d , температуры охлаждающей среды θ_a и бинарной переменной управления охлаждением "РЕЖИМ ОХЛ.". Параметрами модели ТС БИ являются напряжение нагрузки U_d , потери $P_{\text{хх}}$ холостого хода. По результатам тепловых испытаний расчетным путем определяются следующие параметры СТ: теплоемкость C , тепловое сопротивление "СТ – внешняя среда" в режимах естественного R_N и принудительного R_F охлаждения. Для расчетов применяются исходные данные, полученные из практического опыта эксплуатации: тепловое сопротивление "СТ – внешняя среда" в режиме естественного охлаждения $R_N = 0,0585$ К/Вт, в режиме принудительного охлаждения $R_F = 0,18239$ К/Вт; теплоемкость $C = 0,00039$ К/Вт.

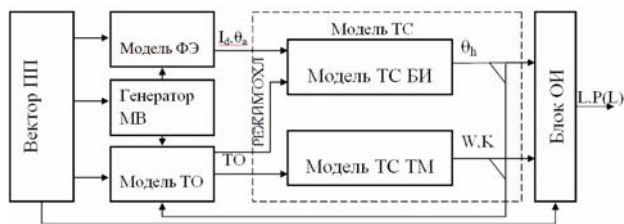


Рис. 2. Структурная схема модели

Модель ТС ТМ выполняет расчет трендов показателей W и K на основе экспертных оценок [4] по формулам:

$$W(t) = W_0 + M_W(t - T_{TO}), \quad (6)$$

$$K(t) = K_0 + M_K(t - T_{TO}), \quad (7)$$

где W_0 , K_0 – показатели W и K в момент начала эксплуатации и после завершения ТО; M_W , M_K – коэффициент приращения показателей W и K в процессе старения ТМ.

Для определения коэффициентов формул (6) и (7) используются данные, приведенные в табл. 22.1 [4]. Влажность в бумажной изоляции возрастает линейно от $W_{\text{БАЗ}} = 0,3 \%$ до $W = 4 \%$ в течение 2,5 лет. Кислотное число возрастает от $K_{\text{БАЗ}} = 0,1$ мг КОН/г до $K = 0,245$ мг КОН/г в течение такого же периода. В ходе обслуживания бумажная изоляция и трансформаторное масло подвергаются сушке и дегазации, после чего восстанавливаются исходные значения влажности и кислотности.

Модель ФЭ синтезирует прогнозируемый тренд тока I_d и температуры θ_a . В качестве модели температуры охлаждающей среды θ_a использована двойная синусоидальная функция [3], которая дополнена компонентой многолетних климатических изменений. При этом приняты следующие исходные данные для расчета температуры охлаждающей среды θ_a : амплитуда годового изменения среднесуточной $\theta_a A = 12,6$ °С; амплитуда суточного изменения $\theta_a B = 4$ °С.

Входные параметры и структура тренда I_d зависят от требований к точности прогноза расхода ресурса изоляции, наличия данных мониторинга параметров СТ в периоды предшествующие моменту прогноза, детальности данных о предполагаемых нагрузках СТ в период прогноза. В качестве модели I_d использована модель:

$$I_d = P_z \cdot I_{\text{зав}} \cdot N_z + \Delta I_{dc} \cdot P_c(N_{dc}) \cdot \Delta I_{dc} \cdot P_d(N_c), \quad (8)$$

где P_z – коэффициент изменения среднегодового тока; $I_{\text{зав}}$ – среднегодовой ток нагрузки на момент прогноза; ΔI_{dc} – среднегодовое изменение тока нагрузки; P_c – коэффициент среднесуточных изменений; ΔI_{dc} – среднесуточные изменения тока нагрузки; $P_d(N_{\text{дн}})$ – коэффициент зависимости от дня недели; $N_{\text{дн}}$ – номер дня в неделе.

Для расчета прогнозируемого тренда тока I_d используются следующие исходные данные: $P_z = 0,000415$; $I_{\text{зав}} = 244,2$ А; $\Delta I_{dc} = 20$ А; $\Delta I_{dc} = 20$ А.

Модель ТО формирует команды на включение охлаждения РЕЖИМ ОХЛ и техническое обслуживание масла ТО основываясь на входных данных уставки охлаждения θ_o и режимах ТО ТМ (плановое, по техническому состоянию), базовых показателей ТМ ($K_{\text{БАЗ}}$, $W_{\text{БАЗ}}$) а также выходных данных модели ТС (θ_h , W , K). В контуре регулирования температуры модель ТО содержит релейный регулятор. В контуре ТО ТМ модель ТО содержит блоки сравнения текущего модельного времени с временем планового ТО; текущих значений W , K с максимально допустимыми W_{max} , K_{max} .

Команда ТО представляет собой логическое ИЛИ перечисленных результатов сравнения. По этой команде текущие значения K и W в блоке ТС ТМ уменьшаются до $K_{\text{БАЗ}}$, $W_{\text{БАЗ}}$.

С использованием формул (1) и (5) проведено компьютерное моделирование расхода ресурса изоляции СТ в течение предстоящих десяти лет эксплуатации.

Результаты моделирования при определенных выше исходных данных представлены на рис. 3. По оси абсцисс откладывается срок службы СТ в часах, а по оси ординат – величина износа L , также в часах.

Проведенное моделирование по уточненной формуле интеграла старения показало снижение влияния влажности при высоких ее содержаниях ($W \geq 3\%$) на износ изоляции СТ на 50%. Однако из-за того, что в таких условиях СТ работает 10-20% процентов времени, снижение износа L составляет 26,4%. Полученные значения в большей степени отвечают практическому опыту эксплуатации СТ.

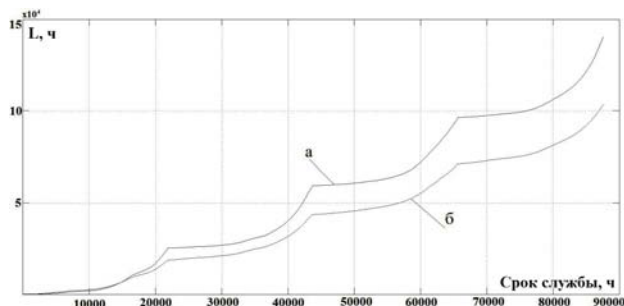


Рис. 3. Результаты моделирования:

- а – моделирование износа бумажной изоляции силового трансформатора базированное на формуле (1);
б – моделирование износа бумажной изоляции, базированное на формуле (5)

Выводы.

Проведенная работа показала, что использование дополнительных данных для моделирования скорости старения бумажной изоляции существенно изменяет полученные результаты.

Предложена уточненная формула интеграла старения. Разработана компьютерная модель износа изоляции с применением уточненной формулы, выполнено моделирование износа изоляции в течение десяти лет эксплуатации и проведен сравнительный анализ полученных результатов, который показал фактическое уменьшение износа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин В.П., Долин А.П. К задаче оценки остаточного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – №3. – С. 42-55.
2. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – №3. – С. 12-17.

3. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS. Sept. 2005.

4. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

REFERENCES

1. Vasin V.P., Dolin A.P. On the problem of residual life assessment of power oil-filled transformers insulation. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in Russian Power Industry*, 2008, no.3, pp. 42-55. (Rus).
2. Vasin V.P., Dolin A.P. Resource of power oil-filled transformers insulation. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2008, №3. pp. 12-17. (Rus).
3. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS.
4. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaja kniga* [Power transformers. Handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 2004. 616 p. (Rus).

Поступила (received) 28.10.2014

Василевский Владимир Валентинович, аспирант,
Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел/phone +38 050 8893073, e-mail: Lisses@ukr.net

V.V. Vasilevskij

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

Assessment of the resource consumption of oil-filled power transformer paper insulation based on updated aging integral.
Refinement of the aging integral formula is proposed. A computer model of insulation wearing out is developed using refined formula. Computer simulation of power transformer insulation wearing out over the next ten years of life is carried out. References 4, tables 4, figures 3.

Key words: aging integral, power transformer, insulation wearing out, prognosis, models of technical condition and operating factors.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАГНИТОПРОВОДОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Проведено дослідження й аналіз нових підходів при побудові шихтованих магнітопроводів силових трансформаторів, які полягають в одночасному використанні в магнітопроводі анізотропної та ізотропної електротехнічної сталі, що дозволяє будувати трансформатори з підвищеним коефіцієнтом корисної дії й з меншою вартістю. Бібл. 3, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: силовий трансформатор, нові шихтовані магнітопроводи, анізотропна сталь, ізотропна сталь, втрати у магнітопроводі, КПД.

Проведено исследование и анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, которые заключаются в одновременном применении в магнитопроводе анизотропной и изотропной электротехнической стали, позволяющий строить трансформаторы с повышенным коэффициентом полезного действия и с меньшей стоимостью. Библ. 3, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: силовой трансформатор, новые шихтованные магнитопроводы, анизотропная сталь, изотропная сталь, потери в магнитопроводе, КПД.

Введение. В статье [1] авторами был представлен анализ тенденций развития трехфазных шихтованных магнитопроводов трансформаторов напряжением до 1000 В. Рассмотренные подходы применимы и при построении трансформаторов среднего и высокого напряжения, а также реакторов, при наличии специальных требований. Данная статья продолжает анализ тенденций развития современных технологий и материалов, используемых в трансформаторостроении.

Анализ условий работы трансформаторов в сетях показывает, что обычно они нагружены мощностью значительно меньшей номинальной. Поэтому Североамериканские стандарты (NEMA TP 1-2002, CAN/CSA C802.2) регламентируют коэффициент полезного действия (КПД) при нагрузке на уровне 35 % для трансформаторов низкого напряжения и 50 % для трансформаторов среднего и высокого напряжения.

Одним из главных факторов, влияющих на параметры и свойства трансформатора, является материал и конструкция магнитопровода.

В статье приведен анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, который заключается в одновременном применении в магнитопроводе различных типов электротехнических сталей (ЭТС).

Целью статьи является определение подходов, позволяющих обеспечить высокие технико-экономические и технологические показатели трансформаторов, обеспечение их высоких энергетических характеристик – малых потерь холостого хода (х.х.) и высоких значений КПД. Это актуальная задача развития современного энергетического рынка.

Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов. На протяжении длительного времени одним из основных способов обеспечения низкого уровня потерь х.х. трансформаторов остается применение в магнитопроводах холоднокатаной анизотропной ЭТС, в которой домены направлены (структурированы) вдоль прокатки листов, что обеспечивает высокие магнитные свойства стали за счет уменьшения магнитного сопротивления прохождению магнитного потока в этом направлении.

Металлургия постоянно совершенствует структуру ЭТС благодаря оптимизации химического состава стали и особенностям технологического процесса ее изготовления. Также наблюдается тенденция уменьшения толщины листа ЭТС. На Североамериканском рынке трансформаторов широко применяются анизотропные ЭТС марок М6 и М4 соответственно с толщинами листов 0,35 и 0,28 мм. Также используются стали марок М3 и М2 с толщинами листов 0,23 и 0,18 мм соответственно. Здесь перечисление марок ЭТС приведено по возрастанию анизотропности свойств и стоимости стали.

Применение ЭТС высокой степени анизотропности позволяет получить отличные магнитные свойства при прохождении магнитного потока вдоль прокатки стального листа. Однако, при прохождении потока под другими углами к направлению прокатки, магнитные свойства стали резко ухудшаются, причем тем сильнее, чем больше степень анизотропности.

Сейчас наиболее распространенной конструкцией магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов является общеизвестная классическая конструкция стержневого шихтованного магнитопровода, схематично представленная на рис. 1.

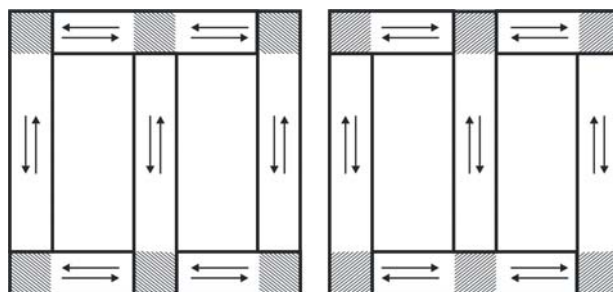


Рис. 1. Классическая конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора

На рис. 1 в незаштрихованных областях магнитопровода магнитный поток, в большей части, проходит вдоль направления прокатки листов ЭТС и анизотропность здесь позволяет значительно снизить потери х.х.

В заштрихованных областях магнитопровода магнитный поток проходит под разными углами к направлению прокатки (от 0° до 90°) при переходе из стержней в ярма, что вызывает значительное увеличение потерь х.х. Таким образом, в одних областях магнитопровода наблюдается значительное улучшение магнитных свойств, а в других – их ухудшение. В связи с этим, применение дорогостоящих высококачественных анизотропных ЭТС не приводит к экономически оправданному уменьшению потерь х.х. трансформатора. То есть, стоимость магнитопровода возрастает столь существенно, что эффект от снижения потерь х.х. и увеличения КПД становится не всегда экономически выгодным.

Уменьшение толщины листа так же уменьшает потери х.х. за счет снижения потерь от вихревых токов, но возникает проблема обеспечения жесткости конструкции магнитопровода в связи с гибкостью стержней, что требует применения специальных мер.

В последнее время усилия направлены на разработку новых изотропных (неструктурированных) сталей с высокими магнитными свойствами, например марки М12. Подобные стали позволяют избежать существенного увеличения потерь в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма.

Постоянно растущие требования к энергосбережению стимулируют поиск новых конструктивных решений с использованием существующих ЭТС. Так, разработан новаторский подход при построении трехфазных и однофазных магнитопроводов, который заключается в одновременном использовании анизотропной и менее дорогой изотропной стали. Например, в патенте [2] предложено изготавливать стержни из анизотропной, а ярма из изотропной стали одинаковой толщины (рис. 2).

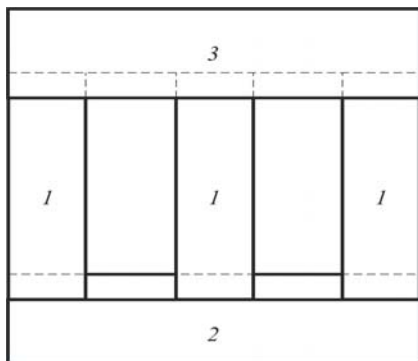


Рис. 2. Конструкция "Staggered" трехфазного стрержневого шихтованного магнитопровода трансформатора

На рис. 2 приведена конструкция трехфазного шихтованного магнитопровода "Staggered", в которой 1 – пластины анизотропной ЭТС; 2 и 3 – пластины изотропной ЭТС. Данная конструкция обеспечивает присутствие изотропной стали в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма, уменьшает количество пластин анизотропной стали стержней в этих зонах и длину пути прохождения магнитного потока в анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки в данных зонах. Удельные потери в листе изотропной стали при прохождении магнитного потока под разными углами к направлению прокатки

листа практически одинаковы, хотя и больше удельных потерь анизотропной стали при прохождении в ней магнитного потока вдоль прокатки листа. Но эти потери значительно ниже удельных потерь анизотропной стали при прохождении в ней магнитного потока поперек прокатки листа. Применение изотропной стали в ярмах магнитопровода "Staggered" позволяет снизить удельные потери на участках ярем в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма. В этих зонах снижение потерь оказывается столь существенным, что перекрывает возрастание потерь на участках ярем между стержнями магнитопровода, поскольку в трансформаторах низкого напряжения (до 1000 В) окна магнитопровода, как правило, имеют небольшую ширину. Такое использование разных типов ЭТС позволяет снизить потери х.х. трансформатора и существенно уменьшить стоимость магнитопровода из-за разницы в цене сталей.

Как видно из рис. 2, пластины ЭТС ярем 3 выполняются шире пластин 2 (на 6,4...12,7 мм [2]) для улучшения условий перехода магнитного потока из стержней в ярма, уменьшения магнитной индукции и удельных потерь в ярмах. Однако, в виду особенностей этой конструкции, имеет место необходимость удлинения стержней, так как часть стержней (6,4...12,7 мм с каждой стороны) скрадывается ярмами и не используется. Это приводит к увеличению общей стоимости магнитопровода, поскольку стержни изготавливаются из дорогой анизотропной стали.

Применение трех типоразмеров пластин с прямым резом в конструкции магнитопровода "Staggered" не существенно усложняет технологию изготовления магнитопровода, по сравнению с классической конструкцией. Благодаря прямому резу пластин ЭТС данная конструкция практически не приводит к возникновению дополнительных активных потерь в магнитопроводе, по сравнению с конструкцией MULTI-STEP LAP с косым стыком (см. работу [1]).

Основным конструкционным недостатком магнитопровода "Staggered" является малая зона шихтованного соединения стержней с ярмами, что снижает механическую прочность конструкции магнитопровода, особенно при длительной эксплуатации трансформатора из-за разупрочнения соединений в результате вибраций.

Применение различных типов сталей в магнитопроводах трансформаторов стало отправной точкой на пути создания высокоэффективных и экономичных трансформаторов.

Новые высокоэффективные и экономичные трансформаторы. М. Levin, независимо от авторов патента [3], предложил в шихтованном магнитопроводе трансформатора использовать разные типы сталей, полностью исключая анизотропную ЭТС из зон перехода магнитного потока из стержней в ярма, замещая ее изотропной ЭТС (рис. 3, 4). Такие типы шихтовки пластин ЭТС получили название "Sandwich".

На рис 3, 4 представлены некоторые варианты шихтовки типа "Sandwich", где показаны два слоя расположения пластин а и б, которые поочередно накладываются друг на друга при сборке магнитопровода.

Пластины 2 и 3 на рис. 3 и пластины 2 на рис. 4 выполнены из анизотропной стали, а пластины 1 и 4 на рис. 3 и пластины 1, 3 и 4 на рис. 4 – из изотропной стали. Для обоих вариантов шихтовки магнитопровода применяется четыре типоразмера пластин одинаковой ширины с прямым резом. При таких шихтовках зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма состоят из 100 % изотропной стали.

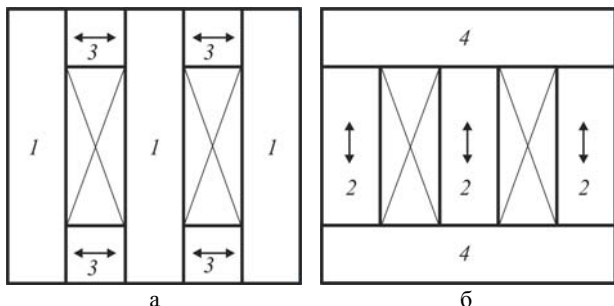


Рис. 3. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа "Sandwich" с вертикальными и горизонтальными изотропными вставками

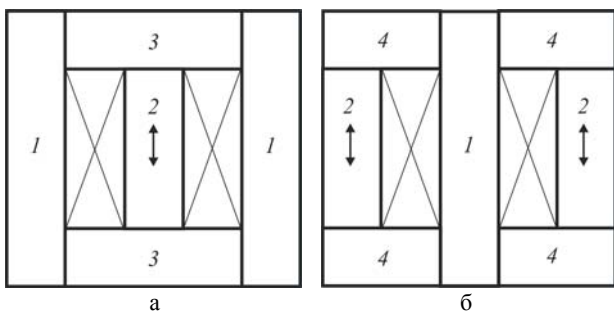


Рис. 4. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа "Sandwich" только с вертикальными изотропными вставками

Изменяя количество рядов применяемых слоев на рис. 3 и 4 можно изменять соотношение между изотропной и анизотропной сталью в стержнях магнитопровода. Подобная возможность изменения соотношения содержания анизотропной и изотропной стали в стержнях и ярмах позволяет осуществлять более глубокую технико-экономическую оптимизацию трансформатора.

В табл. 1, в качестве примера, приведены некоторые из возможных вариантов шихтовок с 80 %, 75 %, 67 % и 50 % анизотропной стали и соответственно 20 %, 25 %, 33 % и 50 % изотропной стали в стержнях и 100 % изотропной сталью в ярмах магнитопроводов.

Таблица 1

Пропорция сталей в стержне (анизотропная / изотропная)	Комбинации слоев для различных шихтовок		
	Количество слоев		
	рис. 3,б	рис. 4,а	рис. 4,б
50 % / 50 %	–	2	2
67 % / 33 %	2	2	2
75 % / 25 %	4	2	2
80 % / 20 %	3	1	1

В варианте шихтовки на рис. 3 при сборке верхнего ярма необходимо принять меры для удерживания пластин 3 и повышения требований к точности сборки.

По механическим характеристикам магнитопроводы на рис. 3 и 4 равноценны магнитопроводу на рис. 1, поскольку перекрытие пластин происходит на всю ширину ярма.

Для уменьшения потерь х.х. ярма можно выполнять пластинами большей ширины. Так как в ярмах используется изотропная сталь, которая значительно дешевле анизотропной стали, то это экономически довольно эффективный способ снижения потерь х.х. в трансформаторе.

Подобная шихтовка магнитопроводов позволяет значительно уменьшить потери х.х. трансформатора, существенно уменьшить стоимость магнитопровода и повысить КПД трансформатора. Такие магнитопроводы позволяют создавать трансформаторы с так называемым повышенным КПД. При этом данные трансформаторы получаются значительно экономичнее трансформаторов, в которых применяется только анизотропная сталь.

Следует отметить, что основным требованием к магнитопроводам типа "Staggered" и "Sandwich" является одинаковая толщина листов используемых сталей, что является ограничивающим фактором. На мировых рынках можно найти небольшое количество марок изотропной и анизотропной стали одинаковой толщины. Например, в Северной Америке это стали марок М6 и М12, в Китае – 35Q145 и 35WW270.

Анализ новых шихтовок магнитопроводов.

Сравним основные технико-экономические показатели трансформаторов (табл. 2) с шихтовкой магнитопровода "Staggered" и "Sandwich" (рис. 2 и 4). В трансформаторе с магнитопроводом "Sandwich" использовалась пропорция 50 % М6 и 50 % М12 в стержнях и 100 % М12 в ярмах, а в трансформаторе с магнитопроводом "Staggered" – 100 % М6 в стержнях и 100 % М12 в ярмах.

Таблица 2

Параметры трансформаторов

Параметры	Тип шихтовки магнитопровода	
	"Staggered"	"Sandwich"
Сопrotивление КЗ, %	2,42	2,26
Потери х.х., Вт	493	491
Масса меди, кг	86,6	98,2
Масса ЭТС, кг	323,1	305,9
Стоимость меди и ЭТС, USD	2174	2194

Трансформаторы имеют мощность 112,5 кВ·А, первичное напряжение 480 В, вторичное – 208 В, частота питающей сети 60 Гц, соединение обмоток треугольник/зигзаг. Трансформаторы соответствуют стандарту NEMA TP1-2002 (стандарт регламентирует уровень КПД при 35% нагрузке и сопротивление короткого замыкания (КЗ) обмоток при температуре 75 °С). Трансформаторы оптимизированы на минимуме стоимости.

Из табл. 2 видно, что трансформаторы имеют очень близкие параметры.

На рис. 5 приведены зависимости КПД трансформаторов с шихтовкой магнитопровода "Staggered" и "Sandwich". Более высокие значения КПД имеет трансформатор "Sandwich", особенно это проявляется

в области больших нагрузок. Учитывая современные высокие требования к трансформаторам, это является большим достоинством. При этом технология сборки магнитопроводов с шихтовкой "Sandwich" подобна технологии сборки классического шихтованного магнитопровода (рис. 1) и не требует особых дополнительных трудозатрат.

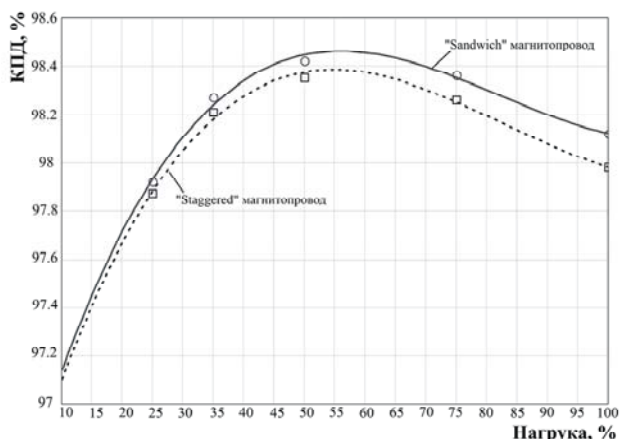


Рис. 5. Зависимости КПД трансформаторов с шихтовкой магнитопровода "Staggered" (пунктирная линия) и "Sandwich" (сплошная линия) от уровня нагрузки

Определим оптимальное соотношение анизотропной и изотропной стали в магнитопроводе с шихтовкой "Sandwich".

На первый взгляд может показаться, что чем больше содержание анизотропной стали в стержнях, тем меньше потери х.х. и выше КПД трансформатора. При этом стоимость трансформатора также снижается за счет уменьшения площади поперечного сечения стержней из-за возможности увеличения в них значения магнитной индукции и уменьшения длины витков обмотки. Но это не подтверждается практикой.

Были исследованы и проведены сравнения свойств более 30 построенных трансформаторов мощностью от 15 до 500 кВ·А, напряжением от 208 до 600 В, частотой питающей сети 60 Гц, соединением обмоток треугольник/звезда, треугольник/зигзаг, звезда/зигзаг. Магнитопроводы трансформаторов выполнены с шихтовкой "Sandwich" с содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях магнитопровода 50 % М6 и 50 % М12; 80 % М6 и 20 % М12, в ярмах — 100 % М12. Шихтовка магнитопроводов производилась согласно табл. 1 соответственно заданной пропорции сталей.

Эксперимент показал, что в результате увеличения количества анизотропной стали в стержнях магнитопровода с 50 % до 80 % не наблюдалось снижения потерь х.х., хотя, логично было бы ожидать их уменьшения.

Для выявления причины этого рассмотрим более детально участок соединения ярма и стержня на рис. 6 для шихтовки с соотношением стали в стержнях 80 % М6 и 20 % М12. На рис. 6 четыре пластины стержня стыкуются с четырьмя пластинами ярма, а одна пластина напрямую переходит из стержня в ярмо.

Здесь происходит локальное насыщение части этой одной пластины на участке, где она переходит из

стержня в ярмо и насыщение пластин, граничащих с данной пластиной. Это связано с наличием немагнитного зазора в зоне стыка четырех пластин, вынуждающего существенную часть магнитного потока проходить через эту пластину и через крайние пластины, граничащие с ней.



Рис. 6. Участок соединения ярма (вверху) и стержней (внизу)

Подобные процессы, ведущие к увеличению потерь х.х. наблюдаются в магнитопроводе с классической шихтовкой (рис. 1) при чередовании слоев с количеством рядов пластин более двух.

С целью определения зависимости потерь в магнитопроводе от количества рядов пластин в слое были построены трансформаторы с классической конструкцией стержневого шихтованного магнитопровода (рис. 1) с 1-м, 2-мя, 3-мя и 4-мя рядами пластин в слое.

На рис. 7 приведен график зависимости увеличения потерь в магнитопроводе с разным количеством рядов пластин в слое относительно потерь в магнитопроводе с 1-м рядом пластин в слое.

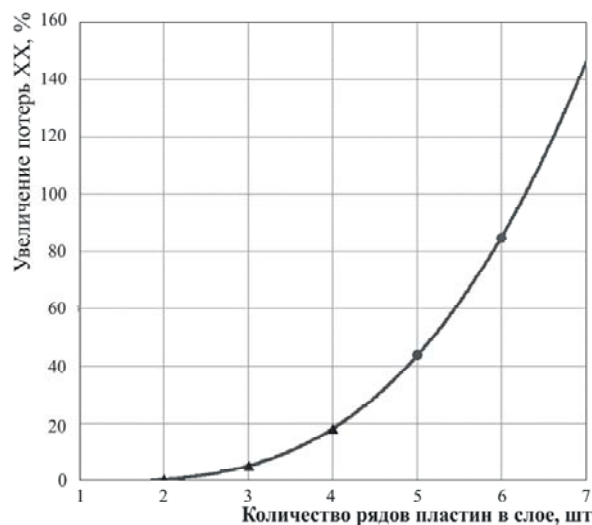


Рис. 7. Зависимость потерь х.х. трансформаторов с чередующимися слоями шихтовки магнитопровода, выполненных с разным количеством рядов пластин

На графике треугольниками обозначены экспериментальные данные 4-х трансформаторов, точками — интерполяционные данные.

Количество рядов пластин в одном слое шихтовки значительно влияет на величину потерь х.х. трансформаторов с классической шихтовкой.

Подобное увеличение потерь х.х. наблюдается и при использовании шихтовки магнитопроводов "Sandwich" с пропорцией стали 80 % М6 и 20 % М12, где имеет место соединение в стык 4-х пластин стержня с 4-мя пластинами ярма, на что указывают результаты тестов более 40 трансформаторов. Это же

подтверждается расчетами потерь х.х., которые при такой шихтовке оказываются выше приблизительно на 15 % по сравнению шихтовкой "Sandwich" 50 % М6 и 50 % М12, где имеет место соединение в стык 2-х пластин стержня с 2-мя пластинами ярем.

Поэтому, построение магнитопроводов с содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях 80 % М6 и 20 % М12, нецелесообразно, поскольку приводит к увеличению потерь х.х. трансформатора и его стоимости из-за применения большого количества анизотропной стали.

Таким образом, магнитопроводы с содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях 50 % М6 и 50 % М12 являются наиболее эффективными и имеют наиболее оптимальные технико-экономические показатели.

Результатом исследований также является разработка авторами теоретических обоснований картины распределения магнитного потока в магнитопроводе с одновременным использованием различных типов сталей, что позволило создать методику расчета потерь х.х. Расчетные потери х.х., сделанные по созданной методике, показали практически полное совпадение с тестами реальных трансформаторов (точность расчета составляет 99 %). Авторы планируют более подробно осветить вопросы расчета потерь х.х., для таких трансформаторов в последующих публикациях.

Выводы.

Проведен анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, которые заключаются в совместном использовании в магнитопроводе анизотропной и изотропной электротехнических сталей, позволяющий строить трансформаторы с повышенным коэффициентом полезного действия.

Для снижения уровня потерь холостого хода трансформатора и повышения коэффициента полезного действия необходимо исключение анизотропной стали из областей перехода магнитного потока из стержней в ярма (областей шихтованных стыков) и одновременное использование анизотропной и изотропной стали в стержнях и ярмах магнитопровода в разных пропорциях.

Определено оптимальное соотношение анизотропной и изотропной стали в магнитопроводе. Магнитопроводы с половинным содержанием анизотропной и изотропной стали в стержнях и ярмах и полностью выполненным из изотропной стали шихтованным стыком являются наиболее оптимальными по технико-экономическим показателям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levin M.I., Пентегов И.В., Рымар С.В., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – №1. – С. 40-44.
2. Pat. US 6100783 A USA, Int. Cl. H 01 F 27/24. Energy Efficient Hybrid Core / Philip J. Hopkinson (Charlotte, N.C. (US)), Wesley W. Schwarz (Oshkosh, Wis. (US)); Assignee Square D Company, Palatine, Ill (US). – № US 09/251102; Appl. Date 16.02.1999; Publ. Date 08.08.2000.

3. Pat. US 8686824 B2 USA, Int. Cl. H 01 F 27/24; H 01 F 17/04. Economical Core Design for Electromagnetic Devices / Michael Levin, Andrii V. Lavreniuk (Toronto (CA)); Mirus International Inc. (Ontario (CA)). – № US 12/883310; Appl. Date 16.09.2010; Publ. Date 01.04.2014.

REFERENCES

1. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.1, pp. 40-44. (Rus).
2. Pat. US 6100783 A USA, Int. Cl. H 01 F 27/24. Energy Efficient Hybrid Core / Philip J. Hopkinson (Charlotte, N.C. (US)), Wesley W. Schwarz (Oshkosh, Wis. (US)); Assignee Square D Company, Palatine, Ill (US). – № US 09/251102; Appl. Date 16.02.1999; Publ. Date 08.08.2000.
3. Pat. US 8686824 B2 USA, Int. Cl. H 01 F 27/24; H 01 F 17/04. Economical Core Design for Electromagnetic Devices / Michael Levin, Andrii V. Lavreniuk (Toronto (CA)); Mirus International Inc. (Ontario (CA)). – № US 12/883310; Appl. Date 16.09.2010; Publ. Date 01.04.2014.

Поступила (received) 14.10.2014

*Levin Michael I.¹, P. Engineer,
Пентегов Игорь Владимирович², д.т.н., проф., в.н.с.,
Рымар Сергей Владимирович², д.т.н., с.н.с., в.н.с.,
Lavreniuk Andrii V.³, Ph. D., R&D Engineer,
¹ 67, Sunnycrest Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4,
тел/phone +1 (416) 6677061,
e-mail: michael@mirusinternational.com*

*² Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України,
03680, Київ-150, ул. Боженко, 11,
тел/phone +38 044 2061388,
e-mail: i.v.pentegov@gmail.com, elmag@paton.kiev.ua
³ MIRUS International Inc.,
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6,
тел/phone +1 (905) 4941120,
e-mail: andrii@mirusinternational.com*

*M.I. Levin¹, I.V. Pentegov², S.V. Rymar², A.V. Lavreniuk³
¹ 67, Sunnycrest Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4.*

*² Paton Electric Welding Institute of National Academy
of Sciences of Ukraine,
11, Bozhenko Str., Kiev, 03680, Ukraine.*

*³ Mirus International Inc.,
31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6.*

New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers.

It is carried out exploration and the assaying of new approaches at construction of stacked laminated cores of mains transformers which consists in simultaneous application in a magnetic conductor of the anisotropic and isotropic electric grade sheet, allowing constructing transformers with the heightened efficiency and with smaller cost. References 3, tables 2, figures 7.

Key words: mains transformer, new laminated cores, anisotropic steel, isotropic steel, losses in a magnetic conductor, efficiency.

ПОЛЕВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ИХ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проведено порівняльний аналіз розрахунку ЕРС, зубцового і електромагнітного моментів вентильного двигуна з постійними магнітами у двомірній і тривимірній постановці задачі на платформі JMAG-Designer 12. Бібл. 4, табл. 1, рис. 13.

Ключові слова: вентильний двигун, зубцовий момент, скоп пазу, метод скінчених елементів, магнітне поле, ЕРС.

Проведен сравнительный анализ расчета ЭДС, зубцового и электромагнитного моментов вентильного двигателя с постоянными магнитами в двухмерной и трехмерной постановке задачи на платформе JMAG-Designer 12. Библ. 4, табл. 1, рис. 13.

Ключевые слова: вентильный двигатель, зубцовый момент, скоп паза, метод конечных элементов, магнитное поле, ЭДС.

Введение. В настоящее время вентильные двигатели с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВДПМ) являются объектом интенсивных исследований в связи с расширением их применения в современных системах регулируемого электропривода.

По сравнению с коллекторными и асинхронными двигателями ВДПМ имеют ряд преимуществ, таких, как повышенный момент и мощность на единицу объема, возможность длительной работы без перегрева при малой угловой скорости с высоким моментом на валу, повышенная перегрузочная способность, хорошие регулировочные свойства и динамические характеристики.

На сегодняшний день для ВДПМ разработаны двухмерные (2D) полевые [1] математические модели (ММ), позволяющие определить такие величины как электромагнитные силы и моменты, параметры, потери и т.д. без ряда упрощающих допущений о характере распределения магнитного поля и существенно повысить точность расчета электромагнитных процессов для анализа и проектного синтеза двигателей различных конструктивных исполнений.

Тем не менее, 2D моделирование не дает достаточной точности при расчетах сложной трехмерной (3D) геометрии ВДПМ, так как не учитывает магнитный поток в аксиальном направлении, что может существенно влиять на электромагнитный момент, магнитное поле в торцевой зоне, распределение которого, в свою очередь, влияет на параметры обмоток (индуктивность) особенно при относительно малой длине машины.

Характерной особенностью явнополюсных ВДПМ является специфика электромагнитных процессов, связанная с наличием высококоэрцитивных постоянных магнитов (магнитное насыщение машины по продольной и поперечной осям и его влияние на индуктивности фаз). Кроме того, явнополюсная структура магнитопровода статора приводит к возникновению пульсаций электромагнитного момента и, следовательно, к ухудшению рабочих характеристик и эксплуатационных свойств ВДПМ.

В данной статье проводится сравнительный анализ и проверка адекватности расчета ВДПМ в программном пакете JMAG-Designer в двухмерной и трехмерной постановке задачи на примере снижения пульсаций зубцового момента и расчета линейных ЭДС ВДПМ.

Объектом исследования служит тяговый двигатель для шахтного электровоза (рис. 1), разработанный в ООО "Электротехника – Новые технологии" (г. Одесса), конструкция [2] которого представлена на рис. 2. Магниты располагаются непосредственно внутри ротора. Статор такого двигателя выполняется в виде явнополюсной структуры с прямыми полюсами и открытыми пазами, в которые уложена катушечная обмотка. Такая обмотка статора имеет простую технологию изготовления и минимальные по длине лобовые части.



Рис. 1. Комплектный электропривод: двигатель с интегрированной системой управления

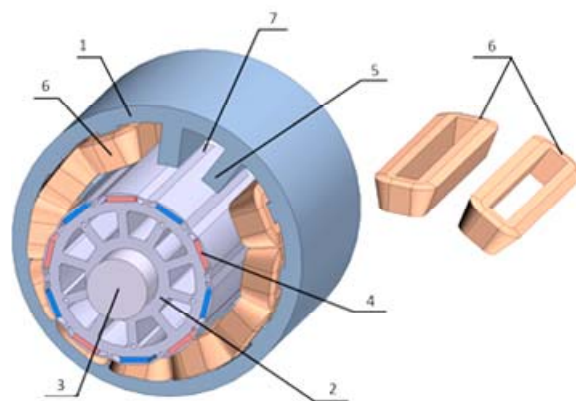


Рис. 2. Явнополюсный ВДПМ с сосредоточенной обмоткой статора

Вентильный электрический двигатель содержит статор 1, внутри которого расположен ротор 2, закреп-

ленный на валу 3. Внутри ротора 2 встроенные постоянные магниты 4. Статор 1 выполнен в виде явнополюсной структуры с прямыми полюсами 5 и открытыми пазами 7, в которые уложена катушечная обмотка 6.

Методы и этапы исследования. На рис. 3 и рис. 4 представлены полевая 3D и 2D ММ ВДПМ соответственно, разработанные в программе JMAG-Designer [3] согласно геометрическим размерам и обмоточным данным, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1
Геометрические размеры и обмоточные данные двигателя

Наименование	Значение
Внешний диаметр статора, мм	360
Внутренний диаметр статора, мм	217
Число зубцов статора	12
Длина активной части, мм	240
Число полюсов ротора	10
Число витков катушки обмотки статора	10
Размеры магнитов (NdFeB), мм	240×35,5×6,3
Воздушный зазор, мм	2,5

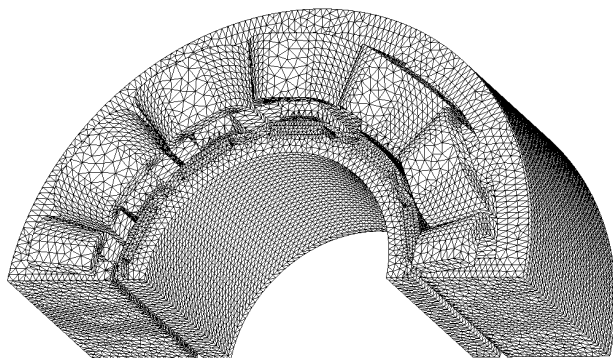


Рис. 3. Трехмерная конечно-элементная аппроксимация ВДПМ

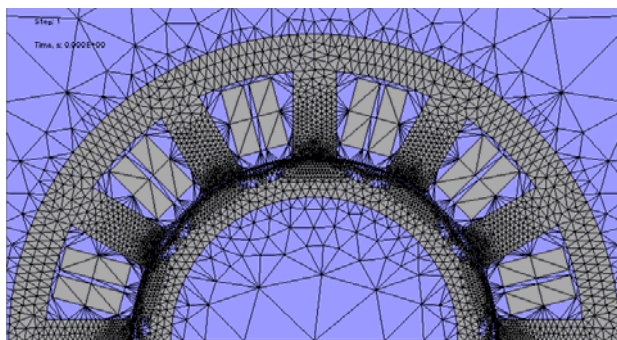


Рис. 4. Двухмерная конечно-элементная аппроксимация ВДПМ

Число элементов конечно-элементной сетки 3D модели составляет 700000, и 35000 для 2D модели. При таком числе конечных элементов достигается достаточно подробная аппроксимация геометрии ВДПМ. Для экономии ресурсов ЭВМ и уменьшения времени вычислений, была взята четверть 3D модели ВДПМ и половина 2D. Для этого при построении 2D модели были применены периодические граничные условия (рис. 5), так как магнитное поле исследуемого ВДПМ имеет периодичность 180 градусов и на-

правление магнитного поля на границе меняет знак на каждом периоде. Для построения 3D модели были применены периодические граничные условия и симметричные (магнитный поток параллелен границе) в аксиальном направлении ВДПМ граничные условия (рис. 6.). На границах расчетных областей 2D и 3D моделей ВДПМ были применены граничные условия Дирихле – векторный магнитный потенциал $A = 0$.

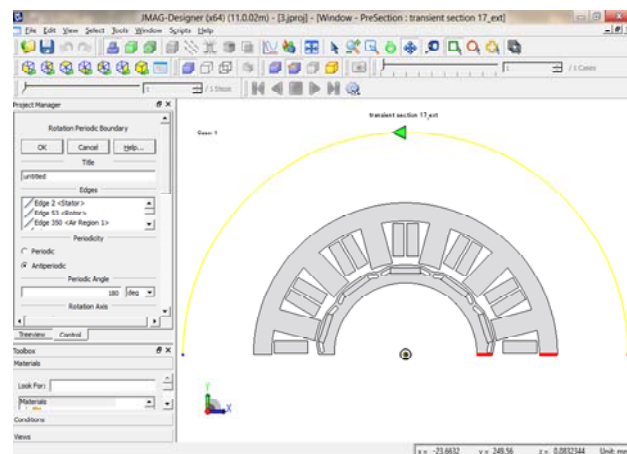


Рис. 5. Периодические граничные условия

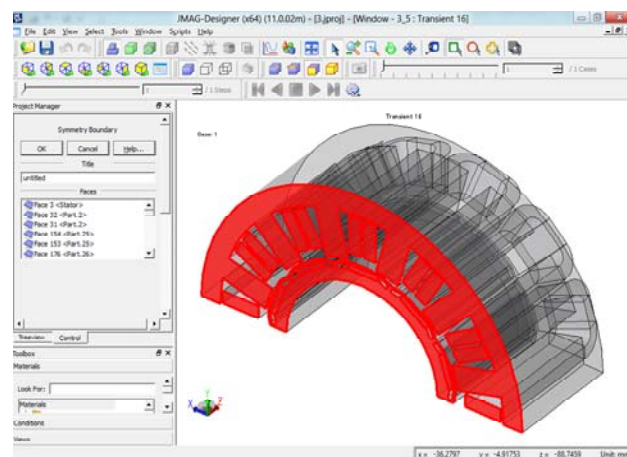


Рис. 6. Симметричные граничные условия

На рис. 7 показаны результаты расчета двухмерного магнитного поля ВДПМ в виде линий равного векторного магнитного потенциала, а на рис. 8 – трехмерного магнитного поля в виде распределения магнитной индукции.

Первым этапом исследования является проверка адекватности полевой модели ВДПМ. Расчетно определим форму линейных ЭДС ВДПМ и сопоставим с экспериментально снятыми. Для этого к катушкам полевой модели подключим электрическую цепь, реализованную в редакторе цепей JMAG-Designer (рис. 9.).

Электрическая схема состоит из шести катушек обмотки статора (так как рассматривается половина 2D модели и четверть 3D модели ВДПМ), соединенных звездами, при помощи которых воспроизводится связь полевой модели с электрической цепью, резисторов (R1, R2, R3), точки заземления, амперметров, одноконтактных вольтметров, которые измеряют напряжение относительно земли. Резисторы R1, R2, R3 (рис. 9) сопротивлением по 1 МОм моделируют

большое сопротивление отключенных фаз. Они необходимы для создания замкнутых контуров протекания тока при выполнении расчета цепно-полевой модели.

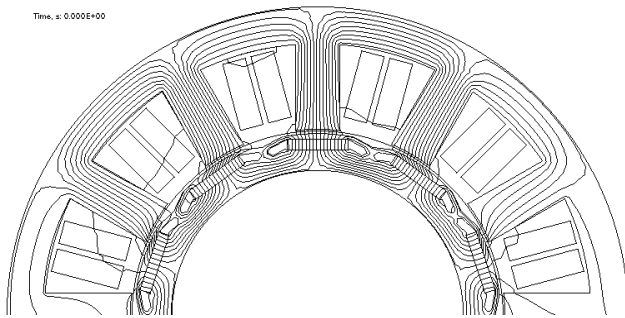


Рис. 7. Распределение двухмерного магнитного поля ВДПМ

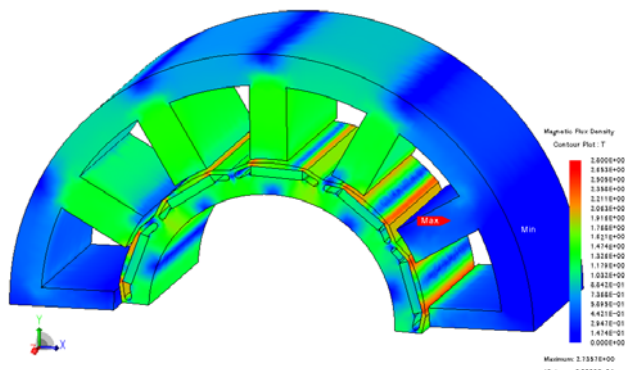


Рис. 8. Распределение трехмерного магнитного поля ВДПМ

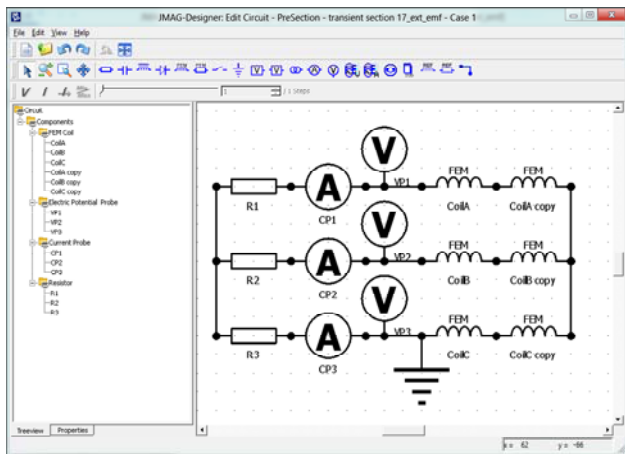


Рис. 9. Редактор цепей JMAG-Designer

Расчетная форма линейной ЭДС 2D и 3D расчетов, полученная на скорости 300 об/мин и сопоставленная с экспериментальными данными, представлена на рис. 10.

Из приведенных на рис. 10 зависимостей видно, что разница между экспериментальной и расчетной зависимостями не превышает 5-7 %, а результаты 2D и 3D расчетов практически совпадают. Следовательно, цепно-полевую модель ВДПМ можно считать адекватной.

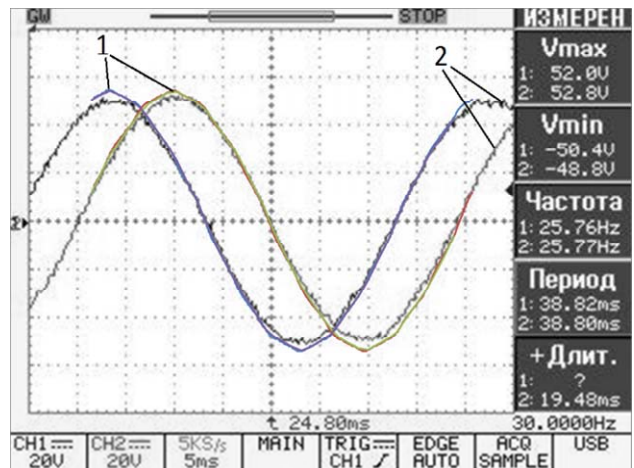


Рис. 10. Линейные ЭДС: 1 – расчет (2D, 3D); 2 – эксперимент

Следующим этапом исследования полевой ММ ВДПМ является получение зависимости результирующего электромагнитного $M = f(\theta)$ и зубцового момента $M_z = f(\theta)$ от угла поворота ротора θ .

Для получения зависимости $M = f(\theta)$ зададим ток 120 А в двух фазах ВДПМ и определим электромагнитный момент при повороте ротора от 0 до 72 механических градусов, что соответствует 360 электрическим градусам.

Для получения зависимости $M_z = f(\theta)$ зададим ток в фазах ВДПМ равным нулю и определим момент от действия постоянных магнитов при повороте ротора от 0 до 72 механических градусов.

В результате расчетов магнитного поля получены зависимости зубцового момента $M_z = f(\theta)$ и результирующего момента $M = f(\theta)$ (рис. 11), из которых видно, что амплитуда результирующего момента, полученного из 2D и 3D расчетов, приблизительно одинакова и составляет 236 Н·м, но форма результирующего момента отлична от синусоидальной из-за действия зубцового момента, который возникает из-за действия магнитного поля постоянных магнитов при отсутствии тока в обмотке статора. Амплитуда зубцового момента равна 1,9 Н·м, и составляет 0,8 % от величины результирующего момента.

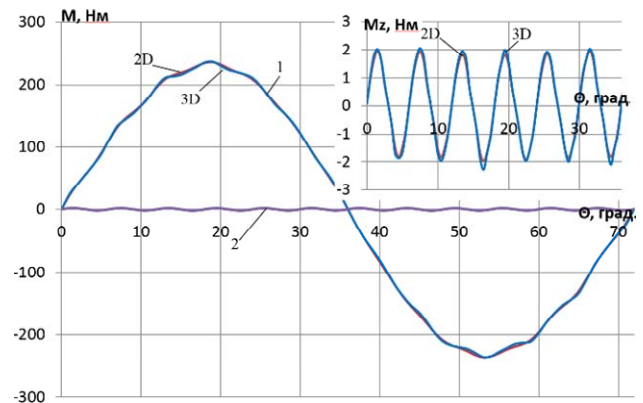


Рис. 11. Зависимости: 1 – $M = f(\theta)$; 2 – $M_z = f(\theta)$

Для уменьшения уровня пульсаций зубцового момента, статор исследуемого ВДПМ выполнен со

скосом пазов на 6 градусов. Однако смоделировать скос в двухмерной постановке задача не представляется возможным. Выполним скос пазов статора в трехмерной модели (рис. 12) и определим электромагнитный момент.

Как видно из рис. 13 путем скоса пазов на статоре удалось устранить пульсации момента при практически неизменном уровне максимального электромагнитного момента, который равен 233 Н·м.

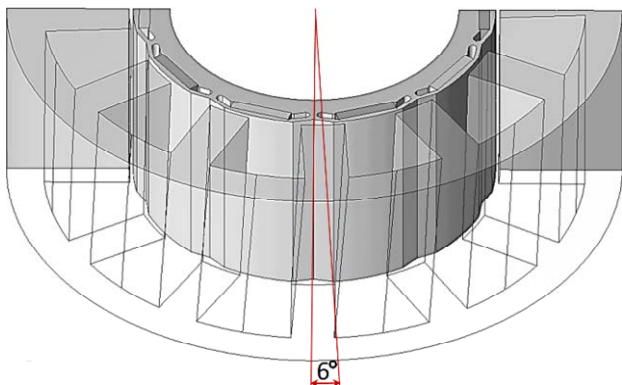


Рис. 12. Геометрия ВДПМ со скосом пазов статора

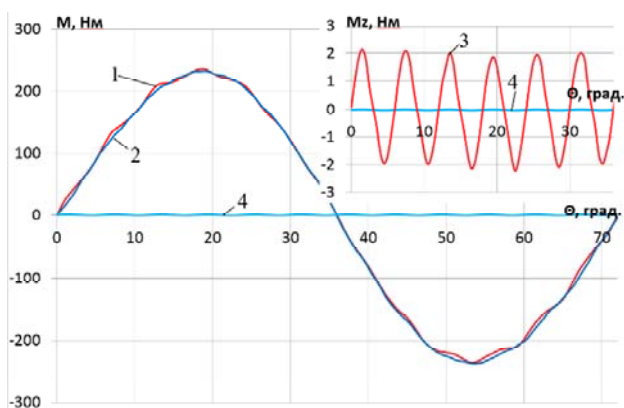


Рис. 13. Зависимости:

- 1 – $M = f(\theta)$ без скоса; 2 – $M = f(\theta)$ скос 6 град.;
3 – $M_z = f(\theta)$ без скоса; 4 – $M_z = f(\theta)$ скос 6 град.

Проанализировав зависимости моментов полученных из 2D и 3D расчетов, можно отметить, что разница между результатами не существенна и величина зубцового момента даже без скоса пазов статора достаточно мала по сравнению с результирующим моментом, что является достаточно хорошим результатом, который был достигнут благодаря тому, что при разработке исследуемого ВДПМ руководствовались рекомендациями [4].

Выводы.

Проанализировав представленные зависимости можно сделать следующие выводы:

1. Расчет магнитного поля в трехмерной постановке задачи позволяет учесть влияние скоса пазов, служащего для уменьшения пульсаций зубцового момента в ВДПМ.

2. Расчет линейных ЭДС показал, что результаты 2D и 3D расчетов практически совпадают, а значит, в случаях, когда некоторыми особенностями геометрии можно пренебречь, для экономии времени целесообразно применение 2D ММ при расчете ВДПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радимов И.Н., Рымша В.В., Чан Тхи Тху Хьонг, Процина З.П. Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами // *Электротехника і електроμηχανіка*. – 2008. – №5. – С. 26-28.
2. Мальований О.Є., Радимов І.М., Римша В.В., Матющенко О.В. Патент України на корисну модель № 77359. Вентильний електричний двигун UA МПК H02K 29/10 (2006.01). Публ. 11.02.2013, Бюл. №3.
3. Электронный ресурс: <https://www.jmag-international.com>.
4. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. CRC Press, 2010. – 611 p.

REFERENCES

1. Radimov I.N., Rimsha V.V., Chan Thi Thu Huong, Procina Z.P. Geometrical proportions in a brushless DC motor. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.5, pp. 26-28. (Rus).
2. Malyovanyj O.E., Radimov I.N., Rimsha V.V., Matyuschenko A.V. *Ventyl'nyj elektrichnyj dvygun* [Valve electric motor]. Patent UA, no.77359, 2013.
3. Available at: <https://www.jmag-international.com> (accessed 13 September 2013).
4. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives, CRC Press, 2010. 611 p. doi: 10.1201/9781420014235.

Поступила (received) 14.10.2014

Матющенко Александр Владимирович, аспирант,
Одесский национальный политехнический университет,
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +38 097 3730502, e-mail: sparkam@rambler.ru

A.V. Matyuschenko

Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko Str., Odessa, 65044, Ukraine.

Mathematical field models of brushless DC motors with permanent magnets and their comparative analysis.

By means of JMAG-Designer 12 the author performed a comparative analysis of the calculation of the EMF, cogging torque and electromagnetic torque of brushless motor with permanent magnets in two-dimensional and three-dimensional formulation of the problem. References 4, table 1, figures 13.

Key words: brushless DC motor, cogging torque, slot skew, FEM, magnetic field, electric circuit, EMF.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Удосконалено метод багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі побудови Парето-оптимального рішення, що дозволяє задовольнити різноманітним вимогам, які пред'являються до роботи систем в різних режимах та істотно скоротити час вирішення задачі. Наведені результати порівнянь динамічних характеристик електромеханічних систем з синтезованими регуляторами. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: багатомасова електромеханічна система, робастне керування, багатокритеріальний синтез, Парето-оптимальне рішення.

Усовершенствован метод многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе построения Парето-оптимального решения, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах и существенно сократит время решения задачи. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, робастное управление, многокритериальный синтез, Парето-оптимальное решение.

Введение. При создании новых поколений техники и новых технологий требуются системы автоматического управления, способные обеспечивать высокую точность при наличии интенсивных задающих и возмущающих воздействий, а также при изменении структуры и параметров систем в ходе их функционирования. К таким системам управления обычно предъявляются весьма разнообразные и часто противоречивые требования при работе системы в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических, случайных и т.д. [1].

Постановка задачи и цель работы. Одним из интенсивно развивающихся направлений современной теории систем управления являются системы робастного управления [2-4], имеющие существенно меньшую чувствительность к изменению структуры и параметров объекта управления и внешних воздействий. Синтез робастных систем затрудняется, прежде всего, формулированием такого критерия качества робастного управления, чтобы синтезированная система удовлетворяла предъявляемым техническим требованиям [5]. В работе [1] разработан метод многокритериального синтеза регуляторов, позволяющий удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. В последнее время для решения многоэкстремальных задач математического программирования широкое распространение получили бионические алгоритмы [6, 7]. В работе [8] разработан метод решения задачи многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультиагентной оптимизации. Однако при этом задача многокритериальной оптимизации сводится к однокритериальной задаче путем сворачивания локальных критериев в один глобальный критерий с помощью принятой схемы компромиссов [1]. Решение этой однокритериальной задачи во всей области изменения искомым параметров является достаточно трудоемкой процедурой, вклю-

чающей большое количество диалоговых итераций с лицом, принимающим решение.

В связи с этим **целью данной работы** является усовершенствование метода решения задачи многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе Парето-оптимального решения, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе таких систем в различных режимах, и уменьшить время решение исходной задачи многокритериального синтеза.

Алгоритм нахождения множества Парето-оптимальных решений. Стандартным подходом к решению задач многокритериальной оптимизации является свертывание локальных критериев в один глобальный критерий с помощью принятой схемы компромиссов [5]. При этом нахождение глобального оптимума такого критерия во всей области изменения искомым параметров является достаточно трудоемкой процедурой, требующей от ЛППР – лица принимающего решения – диалоговой процедуры, включающей большое количество итераций. Альтернативным подходом проведения многокритериальной оптимизации является поиск множества не улучшаемых решений – множества Парето [10, 11]. Такой подход позволяет существенно сузить множество искомым параметров, а в результате – уменьшить время решение исходной задачи многокритериального синтеза.

Рассмотрим алгоритм нахождения множества Парето-оптимальных решений многокритериальных задач нелинейного программирования на основе стохастической мультиагентной оптимизации. На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов оптимизации роем частиц – PSO алгоритмов на основе идеи коллективного интеллекта роя частиц, такие как gbest PSO и lbest PSO алгоритмы. Практически все эти алгоритмы могут быть описаны следующим выражением для изменения положения и скорости движения i -той частицы [6]

$$\begin{aligned}
v_{ij}(t+1) &= v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \\
&\quad + c_2 r_{2j}(t) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \\
x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1),
\end{aligned} \quad (1)$$

где $x_{ij}(t)$, $y_{ij}(t)$ – положение и скорость i -той частицы в j измерении; c_1 и c_2 – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной компонент скорости движения частицы; $r_{1j}(t)$ и $r_{2j}(t)$ – случайные числа из диапазона $[0, 1]$, определяющие стохастическую составляющую компонент скорости движения частицы.

Здесь $y_{ij}(t)$ и y_j^* наилучшие локальное и глобальное положения i -той частицы, найденные соответственно только одной i -той частицей и всеми частицами роя, которые являются аналогами локального оптимума p_i , определяемого i -той частицей и глобального оптимума g_i , определяемого всеми частицами роя.

Рассмотрим теперь алгоритм оптимизации роем частиц с эволюционным формированием состава популяции для различных типов целевых функций при наличии нескольких частных критериев. Одним из таких подходов является векторно-оценочный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации, при котором для вычисления скорости движения одного роя используется другой рой, причем каждый рой оптимизирует свою целевую функцию, так что скорости движения частиц определяются следующими выражениями [10]

$$S_1 v_{ij}(t+1) = w S_1 v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (S_1 y_{ij}(t) - S_1 x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (S_2 y_i^*(t) - S_1 x_{ij}(t)); \quad (2)$$

$$S_2 v_{ij}(t+1) = w S_2 v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t) (S_2 y_{ij}(t) - S_2 x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t) (S_1 y_i^*(t) - S_2 x_{ij}(t)). \quad (3)$$

Этот метод первоначально был разработан для решения задачи оптимизации только с двумя критериями, однако такой подход может быть использован и для решения задач оптимизации с большим числом критериев.

Обычно начальное положение агентов роя задается случайным образом, а затем из этого положение начинается движение роя к глобальному оптимуму, что характеризует стохастические свойства алгоритма оптимизации. Количество агентов в рое может оставаться постоянным, либо изменяться в процессе движения роя. При постоянном количестве агентов роя наиболее часто используются топологии роя типа «кольцо», «квадрат», «звезда» и «пирамида». В частности, в алгоритмах gbest PSO и lbest PSO используются топологии роя типа «звезда» и «кольцо». При изменении количества агентов в рое, начальное количество агентов роя задается случайным образом, а затем из этого количества агентов начинается случайное формирование нового количества агентов и новой топологии роя.

При своем движении частицы роя пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, за счет чего находят глобальный оптимум за меньшее количество итераций. Преимуществом этих методов перед классическими градиентными методами оптимизации

является также то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального приближения к искомому решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

Формирование нелинейной схемы компромисса при многокритериальном синтезе многомассовых систем. После того, как область искомых параметров сужена до множества неулучшаемых решений – множества Парето, возникает задача выбора единственного решения из этого множества, являющегося, по мнению ЛПР, наилучшим решением исходной задачи многокритериальной оптимизации. Эту точку можно выбрать с помощью схемы компромиссов. Рассмотрим один из подходов построения такой схемы. В технических требованиях, предъявляемых к проектируемой системе, обычно задаются максимальные значения отдельных показателей качества, являющихся частными критериями в задаче многокритериального синтеза системы, что позволяет выполнить их нормировку. При этом нормированные частные критерии y_i находятся в диапазоне $0 \leq y_i \leq 1$. Приближение нормированного значения i -го частного критерия к единице соответствует напряженной ситуации. При синтезе высокоточных систем управления таким напряженным частным критерием часто является неравномерность движения рабочего органа при наведении с минимальной скоростью. Если же величина нормированного значения частного критерия приближается к нулю, то это соответствует спокойной ситуации.

Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации используется простейшая нелинейная схема компромиссов [5], при которой исходная многокритериальная задача сводилась к однокритериальной

$$x^* = \arg \min_x f(x), \quad (4)$$

где скалярная целевая функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\bar{x})]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь α_i – весовые коэффициенты, характеризующие важность частных i -тых критериев и определяющие предпочтение отдельным критериям лицом, принимающим решение. Естественно, что такая формализация решения задачи многокритериальной оптимизации путем сведения к однокритериальной задаче позволяет обоснованно выбрать одну единственную точку из области компромиссов – области Парето. Однако эта «единственная» точка в дальнейшем может быть подвергнута испытаниям с целью дальнейшего улучшения схемы компромиссов с точки зрения лица, принимающего решение.

Заметим, что такая нелинейная схема компромиссов фактически соответствует методу штрафных функций с внутренней точкой, так как при приближении i -го критерия y_i к единице, т.е. при напряженной ситуации, скалярная оптимизация фактически выполняется только по этому напряженному частному критерию, а остальные критерии со спокойной ситуацией при

оптимизации практически не учитываются. Однако при начале оптимизации необходимо убедиться, что все частные критерии находятся в допустимых областях, т.е., что выполняются условия $0 \leq y_i \leq 1$ для всех нормализованных частных критериев. В противном случае, частные критерии, для которых эти условия не выполняются, переводятся в прямые ограничения.

Такая нелинейная схема компромиссов позволяет выбирать критерии в соответствии с напряженностью ситуации. Если какой-либо критерий близко подходит к своему предельному значению, то его нормированное значение приближается к единице. Тогда данная нелинейная схема компромисса фактически с помощью скалярного критерия проблему минимизации суммы критериев сводит к минимизации одного этого критерия, по которому имеется напряженная ситуация. Если же по другим критериям ситуация спокойная и их относительные значения далеки от единицы, то такая нелинейная схема компромиссов действует аналогично простой линейной схеме компромиссов. Таким образом, с помощью этой нелинейной схемы компромиссов фактически напряженность ситуации по отдельным критериям априорно вводится в скалярный критерий. Можно показать, что данная нелинейная схема компромисса удовлетворяет условию Парето-оптимальности, т.е. с помощью этой схемы удастся определить точку из области неулучшаемых решений.

Обычно при синтезе системы ряд технических требований предъявляются в форме ограничений g_i в виде равенств и неравенств типа больше либо равно или меньше либо равно заданных значений. Рассмотрим применение штрафных (барьерных) функций для решения задачи математического программирования при наличии ограничений. Вначале рассмотрим применение метода внутренней точки для решения задачи математического программирования, не содержащей ограничений в виде равенств. Предположим, что вблизи оптимальной точки выполнены условия локального оптимума относительно шага движения u_i в следующем виде

$$\begin{cases} g_i(x) \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m}, \\ u_i \geq 0, i = \overline{1, m}, \\ \nabla f(x) - \sum_{i=1}^m u_i \nabla g_i(x) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Откуда может быть получено следующее равенство

$$\nabla f(x(r)) - \sum_{i=1}^m \frac{r}{g_i(x(r))} \nabla g_i(x(r)) = 0. \quad (7)$$

Это равенство можно интерпретировать как необходимое условие локального оптимума в виде равенства нулю градиента, при котором исходная целевая функция задачи нелинейного программирования (7) примет следующий вид

$$L(x, r) = f(x) - r \sum_{i=1}^m \ln g_i(x). \quad (8)$$

Аналогично может быть получена другая целевая функция при условии, что $\lambda_i g_i(x) = r > 0, i = \overline{1, m}$ из выражения для градиента

$$\nabla f[x(r)] - \sum_{i=1}^m \frac{r^2}{g_i^2[x(r)]} \nabla g_i[x(r)] = 0, \quad (9)$$

целевая функция $L_1(x, r)$ примет следующий вид

$$L_1(x, r) = f(x) + r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(x)}. \quad (10)$$

Эти целевые функции (8), (10) позволяют сводить исходную задачу нелинейного программирования при наличии ограничений к решению задачи безусловной оптимизации таким образом, что при приближении к границе ограничений изнутри, величина штрафа за нарушение ограничений стремится к бесконечности, что соответствует методу внутренней точки в алгоритме штрафных функций.

Рассмотренная нелинейная схема компромиссов (7) – (9) соответствует методу штрафных функций с внутренней точкой. При этом предполагается, что исходная точка является допустимой. При синтезе динамических систем обычно бывает ситуация, когда исходная точка является недопустимой. В частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности обработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других показателей качества, предъявляемых к системе. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза могут вообще не быть выполнены.

Однако при этом ряд критериев, таких как величины управляющих воздействий и переменных состояния являются допустимыми. Поэтому, в схеме компромиссов динамических систем целесообразно использовать комбинацию метода штрафных функций с внутренней точкой для одних локальных критериев, и с внешней точкой для других локальных критериев.

Рассмотрим более подробно применение метода внешней точки при решении задачи математического программирования при наличии ограничений. Этот метод необходимо применять в тех случаях, когда движение начинается из недопустимой области. Запишем исходное ограничение в следующем виде

$$g_i(x) \geq -r, i = \overline{1, m}, r > 0, \quad (11)$$

так, что исходные ограничения могут нарушаться на величину r .

Выберем направление движения из следующего условия

$$u_i(r) = -\min[0, g_i(x)]. \quad (12)$$

Тогда последовательно решая задачи оптимизации и уменьшая величину r , получим следующее предельное выражение

$$\lim_{r \rightarrow 0} [-\min(0, g[x(r)])] = 0, \quad (13)$$

$$u_i \geq 0, i = \overline{1, m}. \quad (14)$$

При этом выполняется условие локального оптимума

$$\nabla f[x(r)] - \sum_{i=1}^m u_i(r) \nabla g_i[x(r)] = 0, \quad (15)$$

а, следовательно, с учетом положительного направления движения, выполняется следующее неравенство

$$y^T \left\{ \nabla^2 f[x(r)] - \sum_{i \in D^*} u_i(r) \nabla^2 g_i[x(r)] \right\} y > 0. \quad (16)$$

Тогда может быть получено условие локального оптимума в следующем виде

$$\nabla f[x(r)] + \sum_{i=1}^m \frac{1}{r} \min\{0, g_i[x(r)]\} \nabla g_i[x(r)] = 0, \quad (17)$$

а, следовательно, исходная целевая функция задачи нелинейного программирования может быть записана в следующем виде

$$T(x) = f(x) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2r} \{\min[0, g_i(x(r))]\}^2. \quad (18)$$

Таким образом, метод внешней точки позволяет сводить исходную задачу нелинейного программирования (5) с ограничениями (6) к последовательности решения задач безусловной оптимизации, причем начальная точка может находиться в недопустимой области, так что ограничения исходной задачи нелинейного программирования не выполняются.

Заметим, что для ограничений в форме неравенств, компоненты штрафных функций имеют следующий вид

$$(\min\{0, g_i[x(r)]\})^2 = \left[\frac{g_i - |g_i|}{2} \right]^2. \quad (19)$$

Запишем ограничения в форме неравенств в следующем виде

$$g_{j1}(x) = h_j(x) \geq 0, \quad (20)$$

$$g_{j2}(x) = -h_j(x) \geq 0, \quad (21)$$

откуда $g_{j1} = -g_{j2}$, или

$$\frac{1}{r} \left\{ \left[\frac{g_{j1} - |g_{j1}|}{2} \right]^2 + \left[\frac{-g_{j1} - |-g_{j1}|}{2} \right]^2 \right\} = \frac{g_{j1}^2}{r} = \frac{\{h_j[x(r)]\}^2}{r}.$$

Если в исходной задаче нелинейного программирования (7) начальная точка выбрана так, что часть неравенств выполняется, а другая часть неравенств не выполняется, то необходимо использовать штрафные функции в виде комбинации методов внутренней и внешней точки, например в следующем виде

$$V(x, r, t) = f(x) + s(r)L(x) + p(t)T(x), \quad (22)$$

где $s(r)$ и $p(t)$ – весовые функции, учитывающие влияние функции штрафа $L(x)$ для метода внутренней точки и функции штрафа $T(x)$ для метода внешней точки, причем для получения оптимального решения и выполнения ограничений необходимо, чтобы $r \rightarrow 0$, а $t \rightarrow \infty$.

Результаты моделирования на ЭВМ. Рассмотрим исследование динамических характеристик и чувствительности к изменению параметров объекта управления двухмассовой электромеханической системы [12] с синтезированными робастными регуляторами. Фактически в системе управления имеются

нелинейные элементы. Это, в первую очередь, касается наличия сухого трения как в исполнительном двигателе, так и в объекте управления. Кроме того, в системе имеются нелинейные характеристики элементов упругости между исполнительными двигателями и приводными механизмами за счет люфтовыбирающих пружин. Рассмотрим влияние этих элементов на динамические характеристики системы. При этом будем рассматривать динамические характеристики системы для трех значений моментов инерции рабочего механизма – номинального и отличающихся от номинального значения в два раза в большую и меньшую стороны. Одним из напряженных критериев при синтезе системы является время переходного процесса в режиме отработки малых углов. В качестве примера на рис. 1 показаны переходные процессы: а) угла объекта управления; б) момента упругости; в) скорости объекта управления; г) скорости двигателя, д) тока двигателя в режиме отработки малых углов. Как видно из этих графиков, переходные процессы незначительно изменяются при изменении момента инерции рабочего механизма и удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе.

Другим напряженным критерием при синтезе системы является неравномерность движения объекта управления при наведении на малых скоростях. Заметим, что этот локальный критерий в значительной степени определяет потенциальную точность работы системы в одном из самых ответственных режимах работы системы. На рис. 2 показаны переходные процессы переменных состояния системы при движении объекта управления на малых скоростях с учетом всех нелинейностей. Как видно из этих графиков, несмотря на то, что робастный регулятор имеет астатизм второго порядка, однако синтезированная система при наведении на малых скоростях с учетом всех нелинейностей при разных значениях момента инерции объекта управления имеет установившуюся ошибку по углу поворота объекта управления, а сам объект управления движется неравномерно с участками остановки и трогания.

Напряженным критерием при синтезе системы является также режим движения объекта управления на больших – перебросочных скоростях. При этом особенно остро проявляются энергетические ограничения приводного двигателя. На рис. 3 показаны переходные процессы переменных состояния синтезированной системы при движении объекта управления на перебросочной скорости при разных значениях момента инерции объекта управления и с учетом всех нелинейностей. По аналогии с движением объекта управления на малых скоростях, несмотря на то, что робастный регулятор имеет астатизм второго порядка, однако синтезированная система при движении на перебросочных скоростях с учетом всех нелинейностей и при разных значениях момента инерции объекта управления также имеет установившуюся ошибку по углу поворота объекта управления, однако объект управления движется плавно и без остановок.

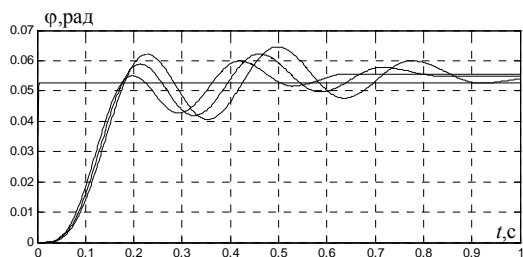
Одним из напряженных критериев при синтезе системы является точность отработки гармонических

воздействий заданных частот. Этот критерий связан с работой системы управления, установленной на подвижном основании объекта, движущегося по неровной дороге с заданной скоростью и заданными параметрами неровностей дороги. На рис. 4. показаны переходные процессы переменных состояния синтезированной системы при отработке гармонических воздействий частотой 1 Гц с учетом всех нелинейностей и при разных значениях момента инерции объекта управления.

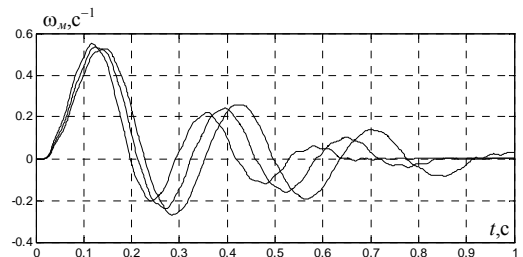
Таким образом, синтезированная система удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к системе.

Выводы.

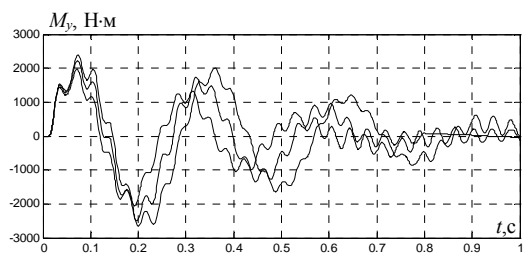
Усовершенствован метод многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе построения Парето-оптимального решения, а затем выбора одной – единственной точки. Нахождение множества Парето проводится на основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах и существенно сократить время решения задачи. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Показано, что применение синтезированных робастных регуляторов позволило сократить время регулирования, повысить плавность движения рабочего органа, уменьшить ошибку компенсации гармонического внешнего возмущения и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.



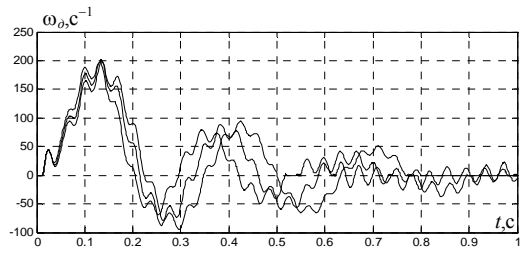
а



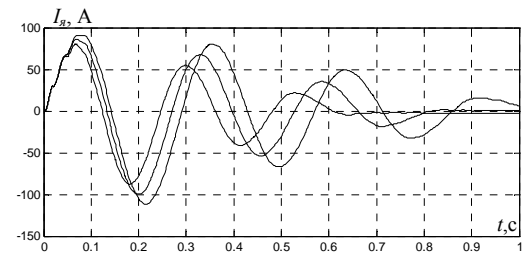
б



в

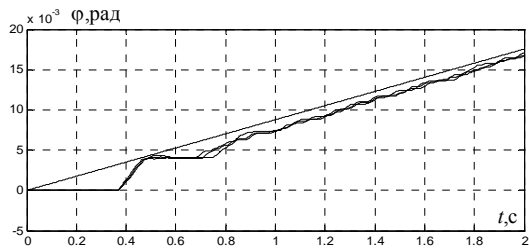


г

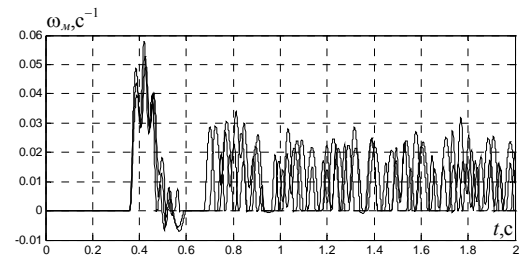


д

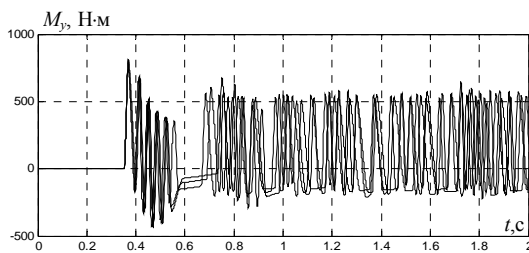
Рис. 1. Переходные процессы при отработке малых углов: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_M(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_0(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$



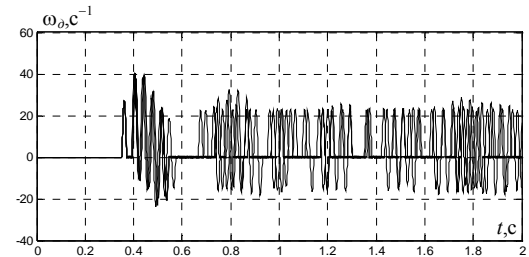
а



б



в



г

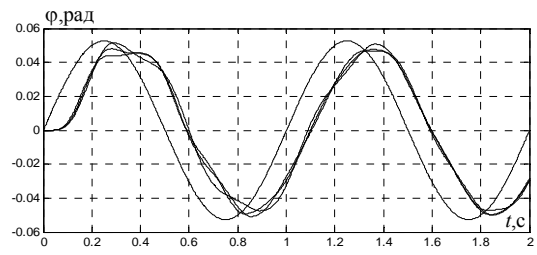
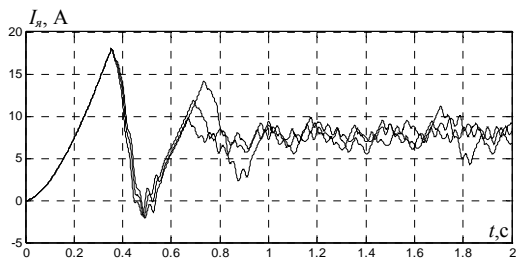


Рис. 2. Переходные процессы при наведении на малых скоростях: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$

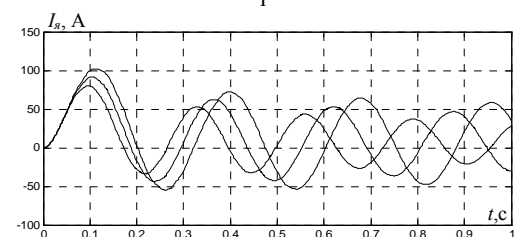
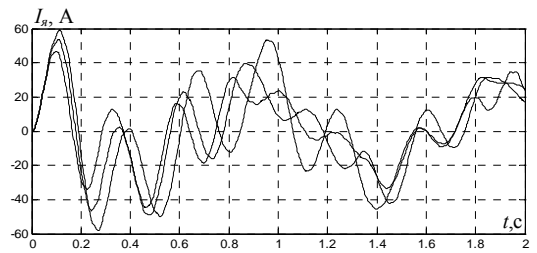
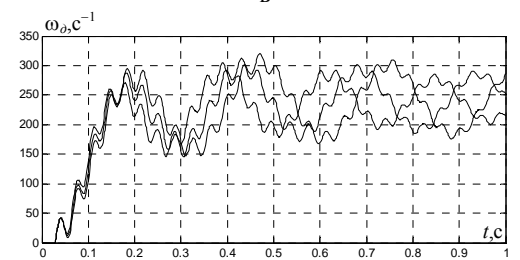
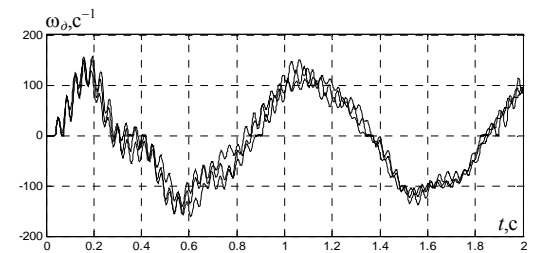
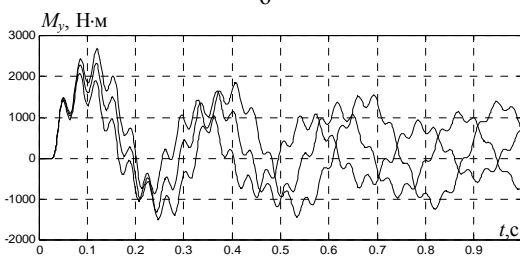
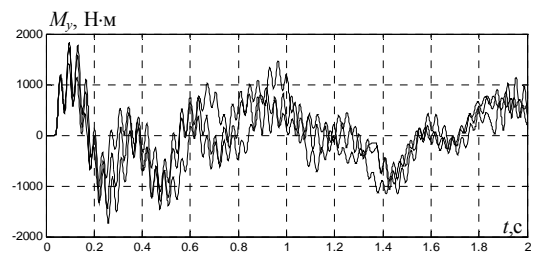
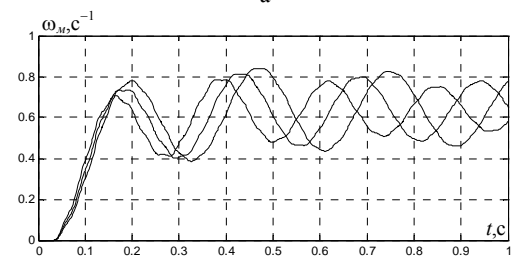
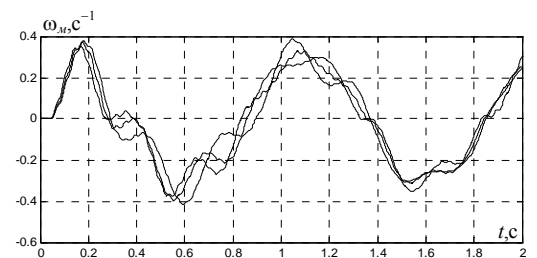
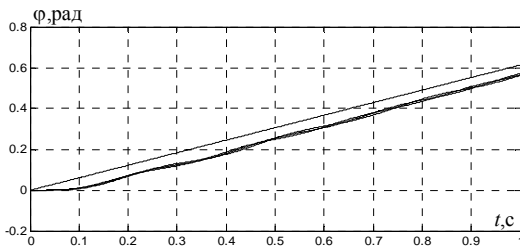


Рис. 3. Переходные процессы при наведении на перебросочных скоростях: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$

а

б

в

г

д

Рис. 4. Переходные процессы при отработке гармонических воздействий частотой 1 Гц: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_d(t)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. – Харьков: ХНАДУ, 2013. – 432 с.
2. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. Stochastic approach to H_∞ -optimization // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. Florida (USA). – 1994. – pp 2249-2250.
3. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy-based performance analysis of linear discrete time invariant control systems // International Journal of Control. – 2001. – vol. 74. – iss. 1. – pp. 28-42.

4. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R., Semyonov A.V. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ -optimization problem // Proc. 13th IFAC World Congress. San-Francisco (USA). – 1996. – pp. 427-432.

5. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.

6. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.

7. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.

8. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В. Многокритериальный синтез динамических систем на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации рою частиц // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №62(1104). – С. 77-86.

9. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.

10. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения [Под. ред. А.В. Лотова]. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.

11. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.

12. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с.

REFERENCES

1. Nikitina T.B. *Mnogokriterial'nyj sintez robustnogo upravlenija mnogomassovymi sistemami* [Multicriterion synthesis of robust control by multimass systems]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University Publ., 2013. 432 p. (Rus).

2. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. *Stochastic approach to H_∞ -optimization*. Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. Florida (USA), 1994, pp. 2249-2250. doi: 10.1109/cdc.1994.411485.

3. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy-based performance analysis of linear discrete time invariant control systems. *International Journal of Control*, 2001, vol.74, iss.1, pp. 28-42. doi: 10.1080/00207170150202661.

4. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R., Semyonov A.V. *State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ -optimization problem*. Proc. 13th IFAC World Congress. San-Francisco (USA), 1996, pp. 427-432.

5. Voronin A.N. *Mnogokriterial'nyj sintez dinamiceskikh sistem* [Multicriteria synthesis of dynamic systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 160 p. (Rus).

6. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.

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

8. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Khomenko V.V. Multiobjective synthesis of stochastic by multimass electromechanical systems based on stochastic multi-agent optimization. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, no.62(1104), pp. 77-86.

9. Nugin V.D. *Prinjatie reshenij v mnogokriterial'noj srede: kolichestvennyj podhod* [Multicriteria decision making environment: a quantitative approach]. Moscow, Fyzmatydzat Publ., 2004. 176 p. (Rus).

10. Shtouer R. *Mnogokriterial'naja optimizacija. Teorija, vychislenija i prilozhenija* [Multicriterion optimization. Theory, computation and application]. Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1992. 504 p. (Rus).

11. Batischev D.I., Shaposhnikov D.E. *Mnogokriterial'nyj vybor s uchetom individual'nyh predpochtenij* [Multicriteria selection to suit individual preferences]. Nizhny Novgorod, IPF RAN Publ., 1994. 92 p. (Rus).

12. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V. *Sintez elektromehaniceskikh sistem so slozhnymi kinematiceskimi cepjami* [Synthesis of electromechanical systems with complex kinematic chains]. Kharkiv, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy Publ., 2005. 512 p. (Rus).

Поступила (received) 20.11.2014

Никитина Татьяна Борисовна, д.т.н., проф.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 050 5766900, e-mail: tatjana55555@gmail.com

T.B. Nikitina
Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.
Multiobjective synthesis of robust control by multimass electromechanical systems based on Pareto-optimal solution.
A multiobjective method of synthesis of robust control of multimass electromechanical systems based on the construction of the Pareto-optimal solution is improved. A Pareto-optimal solution based on a stochastic multi-agent particles swarm optimization, which can significantly reduce the time for solving the problem and meet the diverse requirements that apply to the work of multimass electromechanical servo systems in different modes is founded. The results of comparisons of the dynamic characteristics of the electromechanical servo system with synthesized robust regulators are presented. References 12, figures 4.
Key words: multimass electromechanical system, robust control, multiobjective synthesis, Pareto-optimal solution.

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПОЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Наведені результати теоретичних досліджень, показано формування класової структури електромеханічних перетворювачів енергії, розглянута генерація польових моделей на підставі принципів об'єктно-орієнтованого аналізу. Бібл. 5, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: об'єктно-орієнтований аналіз, клас, структура, рівняння Максвелла, електрична машина, математичне моделювання.

Приведены результаты теоретических исследований, показано формирование классовой структуры электромеханических преобразователей энергии, рассмотрена генерация полевых моделей на основании принципов объектно-ориентированного анализа. Библ. 5, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: объектно-ориентированный анализ, класс, структура, уравнения Максвелла, электрическая машина, математическое моделирование.

Введение. Одним из современных методов исследования электромагнитных процессов электрических машин является математическое моделирование. Этот метод позволяет предсказать характер протекания электромагнитных процессов на стадии проектирования электрических машин (ЭМ) без выполнения опытных образцов.

Наиболее совершенными являются современные методы математического моделирования, основанные на решении уравнений электромагнитного поля [1].

Уравнения Максвелла, положенные в основу описания процессов, протекающих в ЭМ, могут быть составлены для любых видов ЭМ с произвольной геометрической конструкцией [2].

Решение таких уравнений становится возможным благодаря современным полевым методам в программных комплексах Femm Lab, Comsol Multiphysics, ANSOFT Maxwell и др.

Основная часть. Постановка проблемы. Поставим проблему поиска общих принципов синтеза полевых моделей основных видов ЭМ. Основной задачей будет создание полевых моделей ЭМ путем наследования признаков от исходных уравнений Максвелла.

Рассматривая теорию объектно-ориентированного проектирования (ООП), мы выходим из положения, предполагающего наличие базового класса обобщенной ЭМ, потомками которого являются известные виды ЭМ [3]. Путем наследования, использующего принципы ООП, добавляются или отсекаются те признаки, которые приводят к синтезу конкретной модели ЭМ.

Тем самым будет доказана состоятельность применимости теории ООП в области моделирования ЭМПЭ и ее неразрывная связь с базовыми принципами, положенными в теорию электромагнитного поля. Будет также решаться и обратная задача – синтез уравнений поля методами ООП. В настоящей работе рассматриваются следующие виды ЭМ, охватывающие наиболее распространенные представители класса машин цилиндрических вращающихся:

- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- асинхронный двигатель с фазным ротором;
- конденсаторный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- асинхронный двигатель с массивным ротором;

- двигатель постоянного тока;
- синхронный генератор.

Математическое описание магнитного поля производится в цилиндрической системе координат (R, φ, Z) . Для упрощения математического описания принят ряд допущений, большинство из которых будет уточнено или снято при последующем рассмотрении [3].

1. Не учитывается изменение магнитного поля вдоль аксиальной оси, т.е. решается плоскопараллельная задача;

2. Магнитная проницаемость материала сердечника не зависит от пространственной координаты φ ;

3. Не учитывается насыщение материала магнитопровода, т.е. его магнитная проницаемость считается постоянной величиной;

4. Сердечники магнитопроводов не имеют пазов, а их влияние учитывается эквивалентным увеличением воздушного зазора;

5. Токи обмотки статора вследствие отсутствия пазов вынесены в зазор машины и равномерно распределены по его высоте.

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

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \operatorname{div} \bar{D} = \rho, \operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \operatorname{div} \bar{B} = 0. \quad (1)$$

В (1) векторы напряженности электрического \bar{E} и магнитного \bar{H} полей связаны посредством материальных соотношений

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

с векторами электрической \bar{D} и магнитной \bar{B} индукций, вектором плотности электрического тока \bar{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.

Принципиальная особенность релятивистски-инвариантных уравнений (1) – (2) состоит в том, что в их структуре заложена отражающая обобщение опытных данных основная аксиома классической электро-

динамики – неразрывное единство переменных во времени электрической и магнитной компонент электромагнитного поля.

Для плоскопараллельного приближения векторный потенциал магнитного поля, плотность тока и напряженность магнитного поля имеют по единственной составляющей [1]

$$\bar{A} = \bar{e}_z A_z; \bar{J} = \bar{e}_z J_z; \bar{E} = \bar{e}_z E_z. \quad (3)$$

В этом случае индукция и напряженность магнитного поля имеют по две составляющие, направленные по радиальной и тангенциальной координатным осям:

$$\bar{B} = \bar{e}_R B_R + \bar{e}_\varphi B_\varphi; \bar{H} = \bar{e}_R H_R + \bar{e}_\varphi H_\varphi. \quad (4)$$

Используя первое уравнение Максвелла в виде

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{J}, \quad (5)$$

выражая напряженность магнитного поля через магнитную индукцию

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu}, \quad (6)$$

вводя векторный потенциал,

$$\bar{B} = \text{rot} \bar{A}, \quad (7)$$

выполняя математические преобразования и проектируя полученное выражение на координатную ось Z , получим уравнение магнитного поля для режима идеального холостого хода (обмотка ротора разомкнута или не обтекается током)

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial \varphi} \right) = -J_{cm} \quad (8)$$

в исследуемой области $R_{\text{вн}} \leq R \leq R_{\text{н}}; 0 \leq \varphi \leq 2\pi, R_{\text{вн}}, R_{\text{н}}$ – внутренний радиус ротора и наружный радиус статора асинхронной машины.

Уравнение векторного потенциала в зазоре машины записывается как

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \bar{A} \right) = \bar{J}_{cm} + \bar{J}_p. \quad (9)$$

Выполняя операции rot , преобразуя полученное выражение подобно (8) и проектируя уравнения на координатную ось Z , получим

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} \right) = -J_{cm} - J_p. \quad (10)$$

Первый член этого выражения показывает распределение тангенциальной составляющей магнитной индукции B_φ по радиальной координате. Тангенциальная составляющая B_φ имеет место в ярме статора и ротора, а также в пазах статора и ротора, определяя в них потоки рассеяния. Представим эту составляющую в виде суммы:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial R} \right) = \\ = \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial R} \right) \right]_a + \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial R} \right) \right]_\sigma, \end{aligned} \quad (11)$$

первый член которой представляет распределение магнитной индукции в ярме машины, а второй – потоки рассеяния ротора. Здесь и в дальнейшем индексы единственных составляющих плотности тока и векторного потенциала будут опущены.

Первую составляющую после преобразований представим в виде

$$\left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial R} \right) \right]_a = -qA. \quad (12)$$

Потоки рассеяния в пазах ротора пропорциональны току ротора. Поэтому вторую составляющую (11) можно записать в виде

$$\left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial R} \right) \right]_\sigma = K_{\sigma 2} J_p. \quad (13)$$

Коэффициент $K_{\sigma 2}$ в этом выражении можно рассматривать как отношение индуктивного сопротивления ротора к сопротивлению намагничивающего контура $X_{\sigma 2}/X_\mu$. Подставляя выражения (12) и (13) в (10), получим

$$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA = -\mu_0 J_{cm} - \mu_0 (1 + K_{\sigma 2}) J_p. \quad (14)$$

Таким образом, получено простейшее уравнение для векторного магнитного потенциала, учитывающее влияние магнитных сопротивлений ярма статора и ротора, а также рассеяния статора. Решение этого уравнения совместно с краевыми условиями периодического типа позволяет определить значения векторного потенциала в зазоре асинхронной машины, радиальной и тангенциальной компонент магнитной индукции.

Выражение (14) с учетом замены (12) будем использовать для сравнения с уравнениями, записанными для других рассматриваемых типов машин.

Выполним исследование математических моделей распределения электромагнитного поля для рассмотренных ЭМ.

В табл. 1 представлены уравнения электромагнитного поля, записанные для цилиндрических машин группы ЦЛ 0.2у, а также для таких видовых потомков обобщенной машины, как асинхронные с короткозамкнутым, фазным и массивным роторами, синхронных машин и машин постоянного тока. При сравнении будем рассматривать модели, записанные в одномерном приближении для воздушного зазора с магнитной проницаемостью μ_0 .

По табл. 1 можно сделать следующие выводы:

1. первичная (статорная) цепь видов ЭМ общая и определяется топологией группы ЦЛ 0.2у;
2. система питания (правая часть уравнений) не влияет на матрицу расчетной модели;
3. вторичная (роторная) цепь определяется видовыми признаками ЭМ.

Применим принципы ООП к полученным уравнениям электромагнитного поля для различных типов электрических машин.

Базовый класс будет представлять система уравнений Максвелла (1), обобщающие представления распределения электромагнитного поля в электромагнитной системе.

Этот класс будет абстрактным, поскольку невозможно существование такого изделия как обобщенная электрическая машина [4].

Таблица 1

Уравнения Максвелла для цилиндрических ЭМ

Машина	Левая часть уравнения	Правая часть уравнения
АД с КЗР	$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA$	$-\mu_0 J_{cm} - \mu_0(1 + K_{\sigma 2})J_p$
АД с ФР	$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA$	$-\mu_0 J_{cm} - \mu_0(1 + K_{\sigma 2})J_p$
КАД	$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA$	$-\mu_0 J_{p.o} - \mu_0 J_{k.o} - \mu_0 J_p$
АД с МР	$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA$	$-\mu_0(J_{cm} + J_p)$
МПТ	$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA$	$-\mu_0(J_e + J_a + J_k + J_{\partial n})$
СГ	$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - qA$	$-\mu_0(J_e + J_a)$

Потомком базового класса является конкретный класс электрической машины, получаемый путем наследования определенных признаков от базового класса. Или же наоборот, не наследующий какие-либо признаки, не характерные для данного типа машин. Решением того, какие именно признаки следует наследовать в зависимости от поставленных условий (в блоке условий) решает подкласс модификаторов электромеханического объекта. Результатом такого наследования, учитывающего как условия, так и модификаторы, будет конкретное воплощение электромеханического преобразователя энергии, готового к созданию объекта – физической модели, наделенной параметрами, конкретными источниками энергии, геометрической конструкцией.

На рис. 1 показана иерархическая структура уравнений электромагнитного поля для электромеханических преобразователей энергии.

На рис. 1 блок атрибутов представляет собой систему уравнения Максвелла для обобщенного ЭМПЭ. Класс является абстрактным, т.к. не существует в реальном исполнении машины "в общем". Классическая система уравнений поля, характерная для любых типов машин, уточняется посредством блоков, расположенных ниже. Блок дополнительных атрибутов представляет собой набор модификаторов граничных условий и среды, для которой рассчитывается электромагнитное поле. Для рассмотренной в настоящем разделе двухмерной модели этот будут приведенные выше допущения, радиус расчетной окружности и магнитная проницаемость среды, через которую проходит контур расчетной окружности. Блок плотностей тока отвечает за источники питания первичной и вторичной цепей машины. Связанные блоки функции и событий являются модификаторами вращения вторичного элемента и системы питания. Наконец, набор атрибутов с подмножеством ассоциаций формирует требования ко вторичному элементу машины.

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

Как видно из рис. 2, фактически отсутствует разбиение машин на виды и подвиды. Существующая иерархическая диаграмма является своеобразным шаблоном, позволяющим создавать так называемый "оттиск" – воплощение конкретной электрической машины после применения операторов модификации. Такая структура инвариантна к типам электрических машин. Более того, представляется возможным, применяя различные модификаторы, синтезировать ранее не созданные разновидности электромеханических объектов.

Покажем, как на основе иерархической диаграммы рис. 2 выполняется синтез математической полевой модели электромеханического преобразователя энергии с массивным ротором, открытым именно благодаря принципам наследования.

Модификатор геометрии является адаптивным и позволяет наложить сетку на произвольную расчетную область, описываемую уравнениями, инвариантными к типу машин.

Модификатор параметров необходим для учета физических свойств исследуемого объекта, а также для выбора области моделирования в случае использования одномерных моделей.

Модификатор тока задает набор плотностей токов статора и ротора, являющийся источником электромагнитного поля.

На выходе генератора классов мы получаем математическую модель машины, прошедшую отбор по модификаторам. Различные комбинации источников тока и законы их изменения позволяют получать модели разнообразных типов машин.

Представленная идеология иллюстрируется диаграммой событий UML (рис. 3) и отвечает рассмотренным принципам ООП [5].

Модель состояний описывает последовательности операций, происходящих в системе в ответ на внешние воздействия (в противоположность содержанию, предмету и реализации операций, описываемых моделью классов).

Диаграммы на рис. 2, 3 являются непосредственным воплощением асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в виде абстрактной модели.

Аналогичным образом, можно порождать объектные модели как известных видов ЭМПЭ, так и еще не созданных, наделяя их новыми признаками.

Более того, наличие объектно-ориентированной модели исключает необходимость выполнения подготовительных операций при переходе от теоретических исследований к практической реализации модели в численном виде на ЭВМ.

Разработанные принципы эволюционного синтеза ЭМПЭ служат основой для объектно-ориентированного проектирования и моделирования как внешней классовой структуры машин, связывающую их видовые признаки, так и внутреннюю классовую организацию отдельно взятого ЭМПЭ.

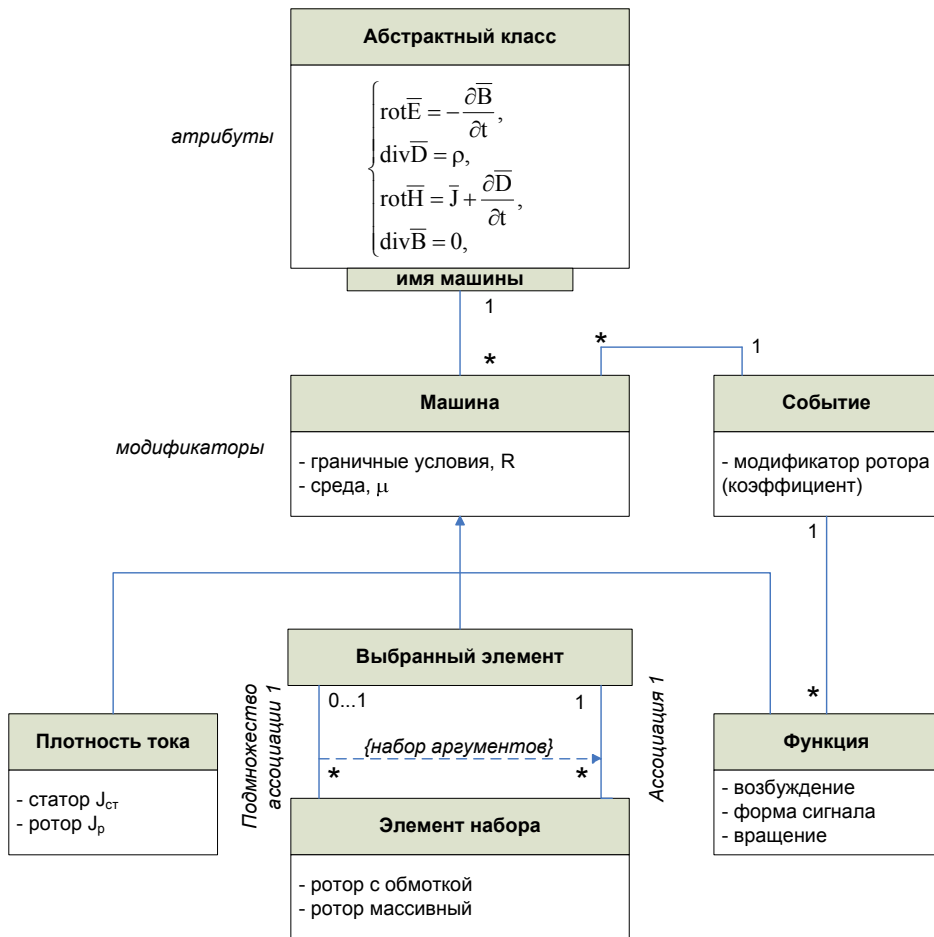


Рис. 1. Классовая структура математической модели ЭМПЭ на основе уравнений поля

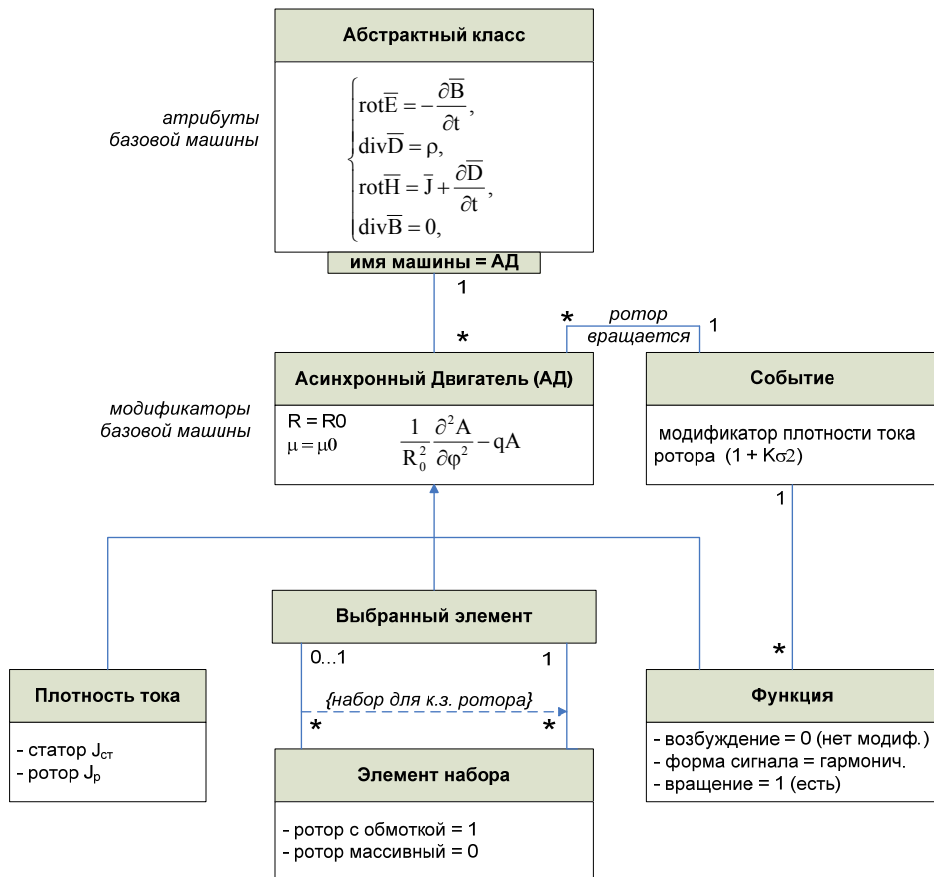


Рис. 2. Иерархическая полевая модель асинхронного двигателя с к.з. ротором

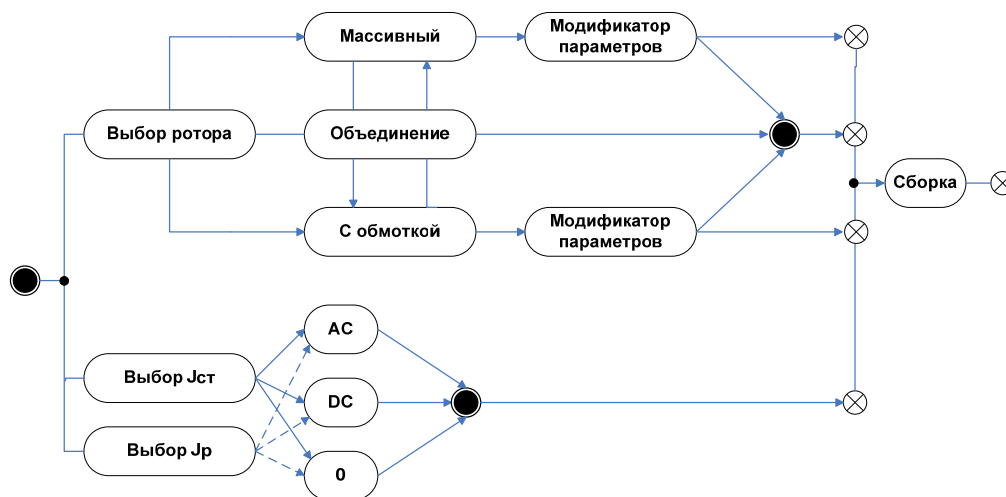


Рис. 3. Диаграмма состояний формирования модели асинхронного двигателя с к.з. ротором

Выводы.

1. Предложен метод структурной и системной организации проектирования и математического моделирования ЭМПЭ, основанный на наследовании конструктивных характеристик производных классов ЭМПЭ.

2. Установлены принципы подобия уравнений распределения электромагнитного поля различных видов ЭМПЭ и на базе этих уравнений построена иерархическая диаграмма классов с использованием разработанных принципов ООП.

3. Предложено использовать единый классовый шаблон для структурной и системной организации ЭМПЭ, инвариантный к их видовому многообразию. Тем самым становится возможным отказаться от классификации ЭМПЭ известными способами по каким-либо признакам.

4. Разработана диаграмма состояний, описывающая последовательность операций для эволюционного синтеза ЭМПЭ.

5. Разработаны теоретические основы структурной и системной организации ЭМПЭ, базирующиеся на передовых достижениях в области разработки программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Е.Ф., Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 457 с.
2. Шинкаренко В.Ф., Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Моделирование и инновационный синтез полифункциональных электромеханических преобразователей энергии. – Алчевськ, ДонДТУ: ВПЦ "Ладос", 2012. – 267 с.
3. Плюгин В.Е. Теоретические основы объектно-ориентированного расчета и проектирования электромеханических устройств: Монография. – Алчевськ: ДонГТУ: ИПЦ "Ладос", 2014. – 200 с.
4. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Особенности реализации и преимущества объектно-ориентированного проектирования // Збірник наукових праць ДонДТУ. – 2011. – №34. – С. 285-290.
5. Плюгин В.Е. Классовая структура моделей электромеханического преобразователя энергии с использованием UML-диаграмм // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №2. – С. 44-47.

REFERENCES

1. Beljaev E.F., Shulakov N.V. *Diskretno-polevyje modeli elektricheskikh mashin* [Discrete-field models of electrical machines]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2009. 457 p. (Rus).
2. Shinkarenko V.F., Zablodskij N.N., Pliugin V.E. *Modelirovanie i innovacionnyj sintez polifunkcional'nyh elektromehaničeskikh preobrazovatelej energii* [Modeling and innovative synthesis of multifunctional electromechanical energy transformers]. Alchevsk, Lado Publ., 2012. 267 p. (Rus).
3. Pliugin V.E. *Teoreticheskie osnovy objektno-orientirovannogo rascheta i proektirovanija elektromehaničeskikh ustrojstv* [Theoretical foundations of object-oriented calculation and design of electromechanical devices]. Alchevsk, Lado Publ., 2014. 200 p. (Rus).
4. Zablodskij N.N., Pliugin V.E. Features and benefits of the implementation of object-oriented design. *Zbirnyk naukovykh prats Donbaskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – The collection of scientific works of Donbass State Technical University*, 2011. no.34, pp. 285-290. (Rus).
5. Plyugin V.E. Class structure of electromechanical energy converter models with UML-diagrams application. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.2, pp. 44-47. (Rus).

Поступила (received) 23.10.2014

Плюгин Владислав Евгеньевич, к.т.н., доц.,
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 099 2130748, e-mail: vlad.plyugin@gmail.com

V.E. Pliugin
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

An object-oriented field model of electromechanical transformers of energy.

Results of theoretical investigations are presented, forming of class structure of electromechanics transformers of energy is shown, the generation of the field models on the basis of principles of the object-oriented analysis is considered. References 5, table 1, figures 3.

Key words: **object-oriented analysis, class, structure, Maxwell equations, electric machine, mathematical simulation.**

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВНУТРЕННИМИ И ВНЕШНИМИ РОТОРАМИ

На основі методу відносних показників технічного рівня з відносними керованими змінними отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень структурних варіантів електромагнітної системи асинхронного короткозамкнутого двигуна з внутрішнім та зовнішнім роторами за критерієм мінімуму основних утрат та виконано порівняльний аналіз показників втрат таких варіантів. Бібл. 12, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: показник втрат, оптимальні геометричні співвідношення, внутрішній і зовнішній ротори.

На основе метода относительных показателей технического уровня с относительными управляемыми переменными получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений структурных вариантов электромагнитной системы асинхронного короткозамкнутого двигателя с внутренним и внешним роторами по критерию минимума основных потерь и выполнен сравнительный анализ показателей потерь таких вариантов. Библ. 12, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: показатель потерь, оптимальные геометрические соотношения, внутренний и внешний роторы.

Главная задача развития электромашиностроения в XXI веке заключается в комплексном энергоресурсосбережении на основе максимального повышения коэффициента полезного действия (КПД) и $\cos\varphi$, а также увеличения мощности единичного электромеханического агрегата [1]. Согласно приведенному в [2] фрагменту норматива Европейского союза, принятого к введению с 2010 года, КПД стандартных (общего назначения) асинхронных двигателей (АД) в диапазоне мощности от 1,5 до 250 кВт должен возрасти соответственно с 0,75 до 0,9 и с 0,94 до 0,975. Тенденцией последних десятилетий разработок АД "классической" (традиционной) конструкции (АДК) представляется повышение КПД снижением электромагнитных нагрузок (ЭМН) и увеличением активной длины [2-4]. Следствием такого энергосбережения является повышение массы и материалоемкости электромагнитных систем (ЭМС) АД, что значительно увеличивает капитальные затраты и нормативные сроки окупаемости нового производства [5]. Также имеется возможность повышения энергоэффективности и мощности в заданных габаритах АД на основе их конструктивно-структурных преобразований и применения нетрадиционных исполнений [6] не только в объектах и системах специального назначения, например [7], но и в промышленных механизмах. Согласно [8, 9] энергоресурсосбережение исключением самовентиляции и совмещением с функциональными элементами ряда механизмов возможно расширением производства и эксплуатации АД с внешним ротором (АДВР).

Обращенное исполнение АД со схемой магнитопровода (рис. 1,а) отличается от электромагнитно-эквивалентного АДК схемы (рис. 1,б) меньшими средней длиной замыкания силовых линий поля, объемом и тепловыделением в электротехнической стали (ЭТС) ярма, а также объемом и тепловыделениями в меди лобовых частей статора, что создает предпосылки повышения КПД.

Целью работы является определение, в дополнение к [9], оптимальных геометрических соотношений и сравнение энергетической эффективности ЭМС АДК и АДВР с различным числом полюсов $2p$ исходя из критерия минимума потерь активной мощности.

Решение задачи сравнительного анализа ЭМС выполняется методом [9] и в соответствии с [10] и принципом электромагнитной эквивалентности [9, 11] рассматриваемых вариантов АД. Используются целевые функции (ЦФ) показателей технического уровня ЭМС, в том числе ЦФ $F_{ПК(В)}$ потерь активной мощности с относительным коэффициентом-показателем потерь в ЭМС $\Pi_{ПК(В)}^*$ АДК (АДВР), являющимся функцией двух относительных управляемых переменных (УП) $\lambda_{\delta K(В)}$ и $a_{MK(В)}$:

$$F_{ПК(В)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 K_{\Pi} K_{\Delta MK(В)} \Pi_{ПК(В)}^* \quad (1)$$

$$\Pi_{ПК(В)}^* = f(\lambda_{\delta K(В)}, a_{MK(В)}), \quad (2)$$

где $\Pi_{ИД}$ – показатель исходных данных и ЭМН, идентичный, в соответствии с названным принципом, для сравниваемых АДК и АДВР; K_{Π} – составляющая удельных характеристик электротехнических материалов; $K_{\Delta MK(В)}$ – коэффициент повышения потерь.

Используемые УП являются относительной активной длиной $\lambda_{\delta K(В)}$ [12] и относительным параметром $a_{MK(В)}$ [9] ЭМС АДК (АДВР), которые определяются соотношениями величин соответственно идентичной геометрической размерности:

$$\lambda_{\delta K(В)} = l_{\delta K(В)} / D_{K(В)}, \quad [M/M]; \quad (3)$$

$$a_{MK(В)} = D_{K(В)}^4 / \Pi_{ИД}, \quad [M^4/M^4], \quad (4)$$

где $l_{\delta K(В)}$ и $D_{K(В)}$ – активная длина и диаметр активной поверхности статора АДК (АДВР).

В показатель [2], в дополнение к УП (3), (4), также входят соотношения ЭМН, геометрических и расчетных параметров АДК (АДВР) [9], которые соответствуют используемым при проектировании АД известным расчетным диапазонам и величинам [12]:

$$K_{Bz} = B_{z1(2)} / B_{\delta} = 2,0 \dots 3,0; K_{Ba} = B_{a1(2)} / B_{\delta} = 1,0 \dots 2,0;$$

$$K_{рш} = h_{p1(2)K} / h_{z1(2)K} = h_{p1(2)B} / h_{z1(2)B} = 0,04 \dots 0,12;$$

$$K_D = D_{RK} / D_K = D_B / D_{RB} = 0,985 \dots 0,995;$$

$$\gamma_1 = K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos\varphi) J_1 / (K_{ck} J_2) = 1,338 \dots 2,785;$$

$$\gamma_2 = J_{3K} / J_2 = 0,8 \dots 0,85; \beta = y_{п1} 2p / z_1 = 0,8 \dots 1,0,$$

где K_{Bz} и K_{Ba} – коэффициенты отношений амплитуды индукции зазора B_{δ} к амплитудам индукций зубца $B_{z1(2)}$ и ярма $B_{a1(2)}$ статора (ротора); $K_{рш}$ – коэффициент отношения высоты зубца статора (ротора) $h_{z1(2)K(В)}$

к высоте расчетной шлицевой зоны $h_{p1(2)K(B)}$ паза статора (ротора) АДК (АДВР) [9]; K_D – коэффициент отношения соответственно внешнего диаметра ротора D_{RK} к внутреннему диаметру статора АДК D_K и отношения внешнего диаметра статора D_B к внутреннему диаметру ротора АДВР D_{RB} (рис. 1); γ_1 , K_p и K_y , $K_{ск}$ – соответственно коэффициенты трансформации ротора относительно статора, распределения и укорочения обмотки статора, а также скоса пазов ротора [12]; γ_2 – коэффициент уменьшения плотности тока короткозамыкающего кольца $J_{зк}$ относительно плотности тока стержня J_2 ротора; β , $u_{п1}$, z_1 – соответственно относительное укорочение шага, диаметральный шаг обмотки и число пазов статора.

Коэффициент $K_{дмк(B)}$ приближенно учитывает повышение основных потерь ЭМС до суммарных потерь АДК (АДВР)

$$K_{дмк(B)} = K_{дхк(B)} K_{мк(B)} K_{дпк(B)}, \quad (5)$$

где $K_{дхк(B)}$ – коэффициент поверхностно-пульсационных потерь холостого хода; $K_{мк(B)}$ – коэффициент механических потерь; $K_{дпк(B)}$ – коэффициент добавочных нагрузочных потерь АДК (АДВР).

Учитываемое $K_{дхк(B)}$ повышение потерь в ЭТС поверхностными и пульсационными составляющими определяется индукцией в зазоре, соотношением чисел пазов и геометрическими соотношениями шлицевых зон зубцов статора и ротора, которые у электромагнитно-эквивалентных АДК и АДВР соответственно равны и близки.

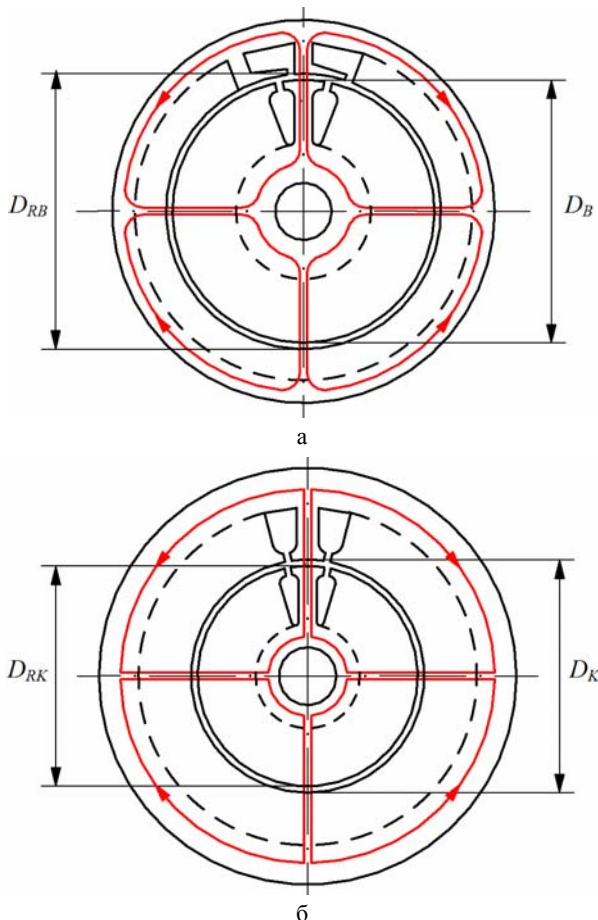


Рис. 1. Схемы поперечной структуры магнитопроводов вариантов асинхронного двигателя с внутренним (а) и внешним (б) роторами

Учитываемые $K_{мк(B)}$ механические и вентиляционные потери определяются зависимостями вида [12]

$$P_{мехK(B)} = K_{тK(B)} (f_1/p)^2 D_{K(B)}^3, \quad (6)$$

где $K_{тK(B)}$ – эмпирический коэффициент, значение которого неизвестно для АДВР; f_1 – частота сети.

Входящие в (6) механические потери в подшипниках и трения вращающихся поверхностей зависят от объема и массы ротора и поэтому в АДВР завышены относительно АДК. Однако, как правило, в АДВР отсутствуют элементы самовентилиации, входящие в конструктивную часть АДК закрытого и защищенного исполнений, а вращение внешних поверхностей ротора АДВР приводит к их охлаждению. Также функциональные элементы приводных механизмов со встроенными АДВР, например электровентиляторов и роликов транспортеров, являются своеобразными радиаторами охлаждения. Поэтому вентиляционные потери АДВР представляются существенно меньшими, чем у эквивалентных АДК.

На основании изложенного и незначительной составляющей учитываемых $K_{дпк(B)}$ добавочных нагрузочных потерь, принимается допущение о равенстве $K_{дмк} \approx K_{дмв} = K_{дм}$. При таком допущении полные активные потери электромеханической системы АДК (АДВР) приближенно отображаются произведением $K_{дмк(B)} \Pi_{пк(B)}^*$.

Для определения потерь в обмотках статора и ротора используются известные выражения расчета и рекомендации выбора [12] чисел витков фазы и зубцов статора w_1 и z_1 , активных сопротивлений обмоток $r_{1K(B)}$ и $r_{2K(B)}$, типа и длины лобовых частей обмотки статора $l_{л1K(B)}$, а также коэффициента приведения тока кольца к току стержня $K_{пр}$:

$$w_1 = U_{п} p q_1 / a_1; \quad (7)$$

$$z_1 = 2 p m_1 q_1; \quad (8)$$

$$r_{1K(B)} = 2 w_1 (l_{\delta K(B)} + l_{л1K(B)}) / (\sigma_{м20} a_1 S_{\phi}); \quad (9)$$

$$r_{2K(B)} = l_{\delta K(B)} / (\sigma_{a20} S_{ст}) + 2\pi (D_{2K(B)} \mp 1, 2 h_{z2K(B)}) \div (\sigma_{a20} m_2 S_{кл} K_{пр}^2); \quad (10)$$

$$l_{л1K(B)} = \beta \pi (1, 16 + 0, 14 p) (D_{1K(B)} \pm h_{z1K(B)}) / (2 p); \quad (11)$$

$$K_{пр} = 2 \sin(\pi p / m_2), \quad (12)$$

где $U_{п}$ – число эффективных проводников паза статора; a_1 – число параллельных ветвей; q_1 – число пазов на полюс и фазу; $m_{1(2)}$ – число фаз статора (ротора); $\sigma_{м20}$ и σ_{a20} – удельные электрические проводимости меди и алюминия при 20 °С; S_{ϕ} , $S_{ст}$ и $S_{кл}$ – соответственно площади сечений эффективного проводника обмотки статора, стержня и клетки обмотки ротора.

При составлении математической модели анализа потерь активной мощности АДК (АДВР) также учитывались соотношения геометрических параметров зубцово-пазовых структур [9]:

$$S_{1\Sigma K(B)} = \Pi_{ИД} / (K_{зп} \lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2) = \quad (13)$$

$$= 1 / (\sqrt{a_{МК(B)}} \Pi_{ИД} K_{зп} \lambda_{\delta K(B)});$$

$$S_{2\Sigma K(B)} = \gamma_1 \Pi_{ИД} / (\lambda_{\delta K(B)} D_{K(B)}^2) = \quad (14)$$

$$= \gamma_1 / (\sqrt{a_{МК(B)}} \Pi_{ИД} \lambda_{\delta K(B)});$$

$$h_{z1K(B)} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{МК(B)} f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)})}; \quad (15)$$

$$h_{z2K(B)} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД} a_{МК(B)} f_{K(B)2}(\lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)})}, \quad (16)$$

где $K_{зп}$ – полный коэффициент заполнения паза статора; $S_{1\Sigma K(B)}$ и $S_{2\Sigma K(B)}$ – суммарные площади пазов в каждом из поперечных сечений сердечников статора и ротора; $f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)})$ и $f_{K(B)2}(\lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)})$ – функциональные сомножители упрощения записи уравнения потерь АДК (АДВР), содержание, в том числе коэффициент заполнения магнитопровода ЭТС $K_{зс}$:

$$\begin{aligned} f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)}) &= \pm 0,5([1/(K_{зс} K_{Bz}) - 1] \div \\ &\div (1 + K_{рш})) \pm \sqrt{0,25([1/(K_{зс} K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш}))^2 \pm \\ &\pm (1/[\pi(1 - K_{рш}^2)]) / (K_{зп} \lambda_{\delta K(B)} a_{МК(B)})}; \\ f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК}) &= -0,5K_D([1/(K_{зс} K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})) - \\ &- \sqrt{0,25K_D^2([1/(K_{зс} K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш}))^2 - \\ &- (1/[\pi(1 - K_{рш}^2)]) \gamma_1 / (\lambda_{\delta K} a_{МК})}; \\ f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB}) &= (0,5([1/(K_{зс} K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})) / K_D) + \\ &+ \sqrt{0,25([1/(K_{зс} K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш}))^2 / K_D^2} + \\ &+ (1/[\pi(1 - K_{рш}^2)]) \gamma_1 / (\lambda_{\delta B} a_{MB}). \end{aligned}$$

Потери в обмотке статора определяются с использованием (3), (4), (7) – (15)

$$P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_{1K(B)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right) (J_1^2 / \sigma_{m20}) \Pi_{w1K(B)}^*, \quad (17)$$

где $\Pi_{w1K(B)}^*$ – относительный показатель основных потерь обмотки статора АДК (АДВР),

$$\begin{aligned} \Pi_{w1K(B)}^* &= \{\lambda_{\delta K} + \beta \pi(1,16 + 0,14p)[1 \pm \\ &\pm f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K}, a_{МК(B)})] / (2p)\} / (\lambda_{\delta K(B)} \sqrt[4]{a_{МК(B)}}). \end{aligned} \quad (18)$$

Основные потери в обмотке ротора АДК (АДВР) определяются на основе (10, 14, 16)

$$P_{эл2} = m_2 I_2^2 r_{2K(B)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{w2K(B)}^*, \quad (19)$$

где $\Pi_{w2K(B)}^*$ – относительный показатель основных потерь обмотки ротора:

$$\begin{aligned} \Pi_{w2K}^* &= (\gamma_1 + (\gamma_1 \gamma_2 / (p \lambda_{\delta K})) \times \\ &\times [K_D - 1,2 f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК})] / (\sqrt[4]{a_{МК}})); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{w2B}^* &= (\gamma_1 + (\gamma_1 \gamma_2 / (p \lambda_{\delta B})) \times \\ &\times [1,2 f_{B2}(\lambda_{\delta B}, a_{MB}) + 1 / K_D] / (\sqrt[4]{a_{MB}}). \end{aligned} \quad (21)$$

Потери в ЭТС магнитопровода АДК (АДВР) определяются из (13), (15) и с учетом известных коэффициентов увеличения потерь зубцов $K_{дз}$ и ярма $K_{да}$ [12], значений плотности ЭТС ρ_c , удельных потерь ЭТС P_c при частоте сети 50 Гц и индукции 1 Тл, а также выражений масс зубцов и ярма статора $m_{z1K(B)}$ и $m_{a1K(B)}$ [9]

$$\begin{aligned} P_{МПK(B)} &= P_c (K_{дз} B_{z1}^2 m_{z1K(B)} + K_{да} B_{a1}^2 m_{a1K(B)}) = \\ &= \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 P_c B_{\delta}^2 \rho_c (K_{дз} K_{Bz}^2 \Pi_{z1K(B)}^* + K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{a1K(B)}^*), \end{aligned} \quad (22)$$

где $\Pi_{z1K(B)}^*$ и $\Pi_{a1K(B)}^*$ – относительные показатели масс зубцов и ярма статора АДК (АДВР):

$$\begin{aligned} \Pi_{z1K(B)}^* &= K_{зс} \left(\sqrt[4]{a_{МК(B)}}\right)^3 \times \\ &\times \{\pi \lambda_{\delta K(B)} [f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)})] \times \\ &\times [1 \pm f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)})] - 1 / (K_{зп} a_{МК(B)})\}; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{a1K(B)}^* &= K_{зс} \left(\sqrt[4]{a_{МК(B)}}\right)^3 \{\pi \lambda_{\delta K(B)} [(1/(2p K_{зс} K_{Ba}))] \times \\ &\times [1 \pm 2 f_{K(B)1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(B)}, a_{МК(B)}) \pm (1/(2p K_{зс} K_{Ba}))]\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Потери в ЭМС АДК (АДВР) определяются на основе (17) – (24) уравнением вида (1)

$$\begin{aligned} P_{ПК(B)} &= P_{эл1K(B)} + P_{эл2K(B)} + P_{МПK(B)} = \\ &= \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 K_{дМК(B)} (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{ПК(B)}^*, \end{aligned}$$

где $\Pi_{ПК(B)}^*$ – соответствующий (2) показатель потерь, позволяющий определять оптимальные геометрические соотношения ЭМС АДК (АДВР) по критерию соответствующему максимуму КПД с использованием экстремальных значений геометрических относительных УП $a_{МК(B)Э}$ и $\lambda_{МК(B)Э}$,

$$\begin{aligned} \Pi_{ПК(B)}^* &= \frac{P_c B_{\delta}^2 \rho_c \sigma_{a20}}{J_2^2} (K_{дз} K_{Bz}^2 \Pi_{z1K(B)}^* + \\ &+ K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{a1K(B)}^*) + \frac{J_1^2 \sigma_{a20}}{J_2^2 \sigma_{m20}} \Pi_{w1K(B)}^* + \Pi_{w2K(B)}^*. \end{aligned} \quad (25)$$

Примеры результатов расчетов экстремумов $\Pi_{ПК(B)Э}^*$ по уравнению (25) для двух и четырехполюсных АДК (АДВР), полученных при $K_{зп} = 0,3$; $K_{зс} = 0,97$, а также трех (минимальном 1,338, среднем 1,903 и максимальном 2,785) значениях γ_1 , выполненных для марок ЭТС 2013 и 2412, представлены в табл. 1, 2. Экстремальные значения $\Pi_{ПК(B)Э}^*$ при каждом указанном γ_1 , которые определены с использованием группы соответственно минимальных Σ_{min} , средних Σ_{cp} и максимальных Σ_{max} значений J_1 (5; 5,5; 6) А/мм²; J_2 (2; 2,5; 3) А/мм² и коэффициентов γ_2 (0,8; 0,825; 0,85), K_{Bz} (2; 2,5; 3), K_{Ba} (1,6; 1,8; 2), $K_{рш}$ (0,04; 0,08; 0,12) и K_D (0,985; 0,99; 0,995), приведены в табл. 1, 2. Графики зависимостей (25), соответствующих средним значениям расчетных коэффициентов и материалу магнитопровода ЭТС 2013 АДК (АДВР) указанной полюсности, представлены на рис. 2.

Из табл. 1 следует, что с увеличением коэффициента γ_1 возрастает показатель $\Pi_{ПК(B)Э}^*$, что связано с относительным увеличением J_1 по сравнению с J_2 . Также из анализа составляющих уравнения (25) следует, что максимальные потери выделяются в обмотке статора и составляют 35...45 % от $\Pi_{ПК(B)Э}^*$, что в 1,4...2,6 раза больше потерь обмотки ротора. Это объясняется соотношениями значений материалоемкости, проводимостей и плотностей токов обмоток статора и ротора.

Выводы.

1. Зависимости основных потерь ЭМС АДК и АДВР при $2p \geq 4$ от УП $a_{МК(B)}$ и $\lambda_{\delta K(B)}$ являются универсальными функциями и характеризуются конкретными экстремальными значениями $a_{МК(B)Э}$ и $\lambda_{\delta K(B)Э}$.

2. Аналогично зависимостям массостоймых показателей от геометрических соотношений ЭМС АДК и АДВР, не содержащих явно выраженных экстремумов по $a_{МК(B)}$ [9], значения относительных

показателей основных потерь при $2p = 2$ снижаются при уменьшении $a_{МК(В)}$.

3. Во всех диапазонах изменения γ_1 с увеличением p уменьшается различие показателей потерь сравниваемых АД.

4. Установлено, что снижение потерь АДВР относительно электромагнитно-эквивалентного АДК при $p = 1, p = 2, p = 3$ и $p = 4$ составляет соответственно 22...29 %, 12...16 %, 9,6...12 % и 7,6...9,6 %.

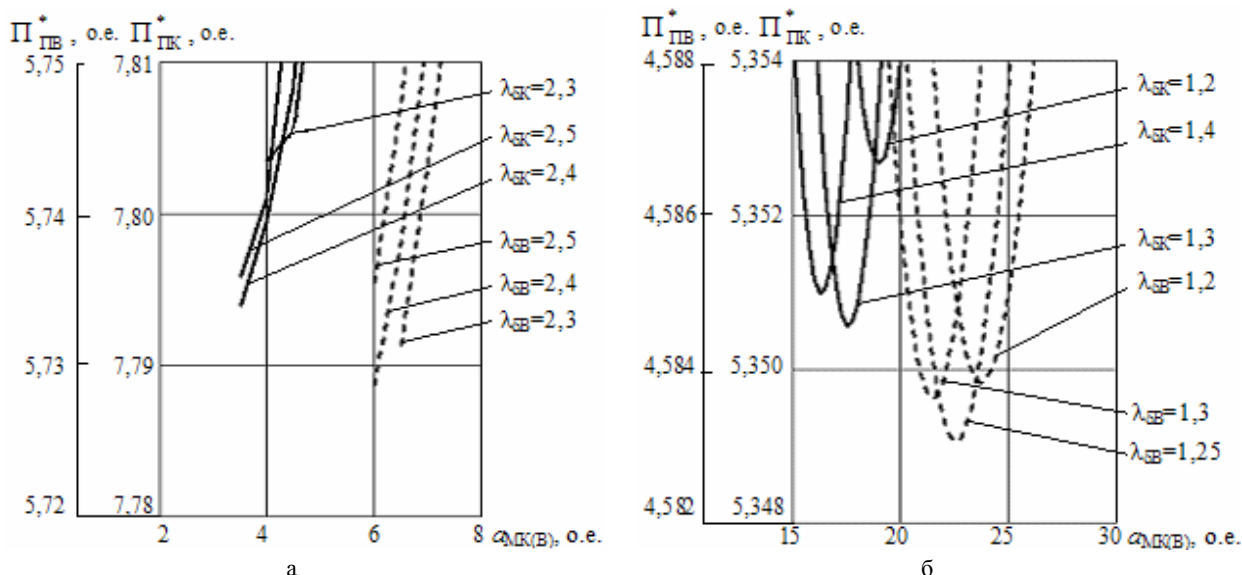


Рис. 2. Зависимости показателей потерь двухполюсной (а) и четырехполюсной (б) эквивалентных электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренним (—) и внешним (---) роторами

Таблица 1

Показатели потерь эквивалентных электромагнитных систем асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренним и внешним роторами (электротехническая сталь 2013)

γ_1 , о.е.	Σ	$p = 1$					$p = 2$						
		$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta К}$, о.е.	$\Pi_{ПКЭ}^*$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta В}$, о.е.	$\Pi_{ПВЭ}^*$, о.е.	$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta К}$, о.е.	$\Pi_{ПКЭ}^*$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta В}$, о.е.	$\Pi_{ПВЭ}^*$, о.е.
1,338	min	3,0	2,7	7,032	7,5	2,65	4,907	16,0	1,4	4,792	21,75	1,3	4,016
	ср.	3,5	2,6	7,331	7,5	2,6	5,218	14,75	1,4	5,006	20,5	1,25	4,213
	max	3,5	2,55	7,668	6,0	2,15	5,567	13,75	1,4	5,254	19,5	1,2	4,433
1,903	min	5,0	2,3	7,481	8,0	2,45	5,354	18,0	1,35	5,133	24,25	1,3	4,367
	ср.	3,5	2,4	7,794	6,0	2,4	5,729	17,75	1,3	5,351	22,75	1,25	4,583
	max	4,0	2,35	8,142	6,0	2,3	6,118	16,25	1,3	5,599	22,0	1,2	4,821
2,785	min	7,5	2,25	8,252	8,0	2,45	6,092	22,25	1,25	5,641	29,5	1,25	4,898
	ср.	5,5	2,25	8,474	7,0	2,4	6,540	21,75	1,2	5,865	26,0	1,25	5,144
	max	4,5	2,3	8,789	7,0	2,35	6,952	20,5	1,2	6,110	25,75	1,2	5,409

Таблица 2

Показатели потерь эквивалентных электромагнитных систем асинхронных короткозамкнутых двигателей с внутренним и внешним роторами (электротехническая сталь 2412)

γ_1 , о.е.	Σ	$p = 1$					$p = 2$						
		$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta К}$, о.е.	$\Pi_{ПКЭ}^*$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta В}$, о.е.	$\Pi_{ПВЭ}^*$, о.е.	$a_{МК}$, о.е.	$\lambda_{\delta К}$, о.е.	$\Pi_{ПКЭ}^*$, о.е.	$a_{МВ}$, о.е.	$\lambda_{\delta В}$, о.е.	$\Pi_{ПВЭ}^*$, о.е.
1,338	min	6,0	2,9	5,583	7,0	2,8	4,117	25,0	1,55	3,822	31,75	1,5	3,293
	ср.	6,0	2,8	5,781	7,5	2,85	4,377	23,0	1,55	3,971	29,25	1,45	3,430
	max	5,5	2,8	6,003	7,5	2,65	4,592	21,5	1,55	4,138	27,75	1,4	3,571
1,903	min	7,5	2,6	6,008	10,5	2,8	4,576	30,0	1,45	4,123	38,0	1,45	3,598
	ср.	7,0	2,6	6,212	9,5	2,75	4,829	27,75	1,45	4,276	35,0	1,4	3,751
	max	6,5	2,6	6,436	9,0	2,65	5,067	25,5	1,45	4,443	31,75	1,4	3,908
2,785	min	8,5	2,45	6,634	14,0	2,65	5,212	39,5	1,3	4,573	50,25	1,35	4,055
	ср.	8,5	2,4	6,850	12,5	2,65	5,501	36,5	1,3	4,732	44,0	1,35	4,234
	max	8,0	2,4	7,077	11,5	2,55	5,776	34,0	1,3	4,902	39,5	1,35	4,414

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В., Копылов И.П., Лопухина Е.М. Перспективы развития электромеханики в XXI веке // Электропанорама. – 2001. – №1. – С. 14-15.

2. Гловацкий А.В., Кубарев Л.П., Макаров Л.Н. Основные направления развития электрических машин и электромеханических систем на их основе // Электротехника. – 2008. – №4. – С. 2-8.

3. Муравлева О.О. Концепция и пути создания энергоэффективных асинхронных двигателей // *Электричество*. – 2007. – №6. – С. 50-52.
4. Конохов Н.Н. Выбор главных размеров и геометрии активных частей электрических машин при разных концепциях развития их конструкции // *Электротехника і електро механіка*. – 2010. – №1. – С. 20-23.
5. Петрушин В.С. Проектирование энергосберегающих асинхронных двигателей с использованием модифицированного критерия приведенных затрат // *Электротехника і електро механіка*. – 2014. – №1. – С. 31-33.
6. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // *Электротехника і електро механіка*. – 2004. – №1. – С. 57-61.
7. Ставинский А.А., Шевченко В.В., Чекунов В.К. Возможности усовершенствования судовых электромеханических комплексов на основе нетрадиционных технических решений электрических машин // *Вісник Національного університету кораблебудування*. – 2010. – №2. – С. 287-293.
8. Вербовий А.П., Вербовий П.Ф., Кравченко А.М. Високоефективні енергозберігаючі асинхронні двигуни // *Електропанорама*. – 2001. – №1. – С. 32-35.
9. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей // *Электротехника і електро механіка*. – 2014. – №5. – С. 37-44.
10. Руководящий документ РД 16538–89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. – М.: ВНИИстандартэлектро, 1989. – 23 с.
11. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
12. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 368 с.

REFERENCES

1. Ivanov-Smolenskii A.V., Kopylov I.P., Lopukhina E.M. Prospects of the electromechanics development in the XXI century. *Elektropanorama – Electropanorama*, 2001, no.1, pp. 14-15. (Rus).
2. Glovatskii A.V., Kubarev L.P., Makarov L.N. Main directions of the development of electrical machines and electromechanical systems based on them. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2008, no.4, pp. 2-8. (Rus).
3. Muravleva O.O. Conception and ways of designing energy efficient induction motors. *Elektrichestvo – Electricity*, 2007, no.6, pp. 50-52. (Rus).
4. Konokhov N.N. Choice of the main dimensions and geometry of active parts of electric machines under different conceptions of their design development. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.1, pp.20-23. (Rus).
5. Petrushin V.S. Energy-efficient induction motors designing with application of a modified criterion of reduced costs. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.1, pp. 31-33. (Rus).

6. Stavinskii A.A. Problem and the directions of electromechanical devices further evolution. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2004, no.1, pp. 57-61. (Rus).
7. Stavinskii A.A., Shevchenko V.V., Chekunov V.K. Ways of improvement of the ship's electro-mechanical systems on the basis of innovative technical solutions for electric machines. *Visnik Natsional'nogo universitetu korablebuduvannia – Proceedings of the National University of Shipbuilding*, 2010, no.2, pp. 287-293. (Rus).
8. Verbovii A.P., Verbovii P.F., Kravchenko A.M. Highly efficient energy saving induction motors. *Elektropanorama – Electropanorama*, 2001, no.1, pp. 32-35. (Ukr).
9. Stavinskii A.A., Palchykov O.O. Application of a relative technical level index method to induction motor optimization problems. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.5, pp. 37-44. (Rus).
10. Rukovodiashchii dokument RD 16538-89. *Mashiny elektricheskies maloi moshchnosti. Otsenka urovnia kachestva* [Guidance Document RD 16538-89. Electrical machines of small capacity. Estimation of quality level]. Moscow, VNIISTandartelekto Publ., 1989. 23 p. (Rus).
11. Palastin L.M. *Elektricheskies mashiny avtonomnykh istochnikov* [Electrical machines of autonomous sources]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 464 p. (Rus).
12. Dombrovskii V.V., Zaichik V.M. *Asinkhronnye mashiny: teoriia, raschet, elementy proektirovaniia* [Asynchronous machines: theory, calculation, design elements]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 368 p. (Rus).

Поступила (received) 06.11.2014

Ставинский Андрей Андреевич¹, д.т.н., проф.,
Пальчиков Олег Олегович¹, аспирант,

¹Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9,
тел/phone +38 0512 399453, e-mail: ole2013hulk@yandex.ua

A.A. Stavinskii¹, O.O. Palchykov¹

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

Objective functions of the comparative analysis of the energy efficiency of electromagnetic systems of induction motors with inner and outer rotors.

The analytical expressions of determining the optimum geometric dimensions by criteria of the basic losses minimum of the structural variants of the electromagnetic system of the induction squirrel-cage motor with inner and outer rotors based on the method of the relative indications of the technical level with relative controlled variables are obtained and the comparative analysis of the losses indications is carried out. References 12, tables 2, figures 2.

Key words: losses indication, optimum geometric dimensions, inner and outer rotors.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ

Розглядається задача стабілізації параметрів системи векторного керування асинхронного електропривода. Зазвичай такі системи містять два канали керування. Для кожного каналу системи проводиться синтез стабілізуючих регуляторів. Оцінка змінних стану системи здійснюється спостерігачем. Задача синтезу стабілізуючих регуляторів та спостерігача полягає в обчисленні коефіцієнтів підсилення зворотних зв'язків за станом. Її розв'язок базується на відомих підходах з теорій векторного керування, матричних нерівностей і стійкості О.М. Ляпунова. Запропоновані методики синтезу стабілізуючих регуляторів та спостерігача. Побудовано структурну схему системи векторного керування. Моделювання перехідних процесів у системі проведено в середовищі пакета MATLAB. Найважливішою властивістю отриманого рішення є стійкість за О.М. Ляпуновим замкнених за векторами станів контурів регулювання. На конкретному прикладі досліджені перехідні процеси. Побудовані графіки, що підтверджують стійкість таких процесів, що протікають в системі векторного керування. Бібл. 11, рис. 2.

Ключові слова: електропривод, векторне керування, стабілізуючий регулятор.

Рассматривается задача стабилизации параметров системы векторного управления асинхронного электропривода. Обычно такие системы содержат два канала управления. Для каждого канала системы проводится синтез стабилизирующих регуляторов. Оценка переменных состояния системы производится наблюдателем. Задача синтеза стабилизирующих регуляторов и наблюдателя заключается в вычислении коэффициентов усиления обратных связей по состоянию. Ее решение базируется на известных подходах из теорий векторного управления, матричных неравенств и устойчивости А.М. Ляпунова. Предложены методики синтеза стабилизирующих регуляторов и наблюдателя. Построена структурная схема системы векторного управления. Моделирование переходных процессов в системе проведено в среде пакета MATLAB. Важнейшим свойством полученного решения является устойчивость по А.М. Ляпунову замкнутых по векторам состояний контуров регулирования. На конкретном примере исследованы переходные процессы. Построены графики, подтверждающие устойчивость таких процессов, протекающих в системе векторного управления. Библ. 11, рис. 2.

Ключевые слова: электропривод, векторное управление, стабилизирующий регулятор.

Введение. Современные системы векторного управления асинхронных электроприводов имеют два канала управления с перекрестными связями и, как правило, содержат наблюдатель для косвенного определения управляемых параметров. Каналы, как правило, выполнены по принципу подчиненного регулирования с компенсацией перекрестных связей по току статора.

Однако возможно построение каналов регулирования и с обратными связями по состоянию, т.е. по принципу модального управления. При таком подходе в каналах управления применяются модальные регуляторы, для которых входными сигналами служат оцененные наблюдателем значения параметров управления. Обычно синтез таких регуляторов и наблюдателей выполняют известным из классической теории управления подходом [1]. Применительно к асинхронному двигателю такой подход для синтеза модальных регуляторов излагается в работе [2]. Вместе с тем возможен другой подход синтеза стабилизирующих регуляторов и наблюдателей состояния системы, основанный на применении теории линейных матричных неравенств и эффективных алгоритмов их решения [3]. Основоположителем этого подхода является А.М. Ляпунов [4]. Сам термин "матричное неравенство" был введен в обиход В.А. Якубовичем в 1962 г. Впоследствии этот аппарат был развит им в ряде работ. Роль В.А. Якубовича в создании теории линейных матричных неравенств общепризнана.

Большое значение для развития теории линейных матричных неравенств имела работа Е.С. Пятницкого и В.И. Скородинского [5]. В ней было показано, что такие неравенства сводятся к задачам выпуклой оптимизации.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия появились работы Ю.Е. Нестерова и А.С. Немировского [6].

В них были предложены эффективные процедуры выпуклой оптимизации. Эти процедуры и их модификации стали использоваться для решения различных задач линейных матричных неравенств. Первые результаты применения таких неравенств для синтеза законов управления излагаются в работе [7]. Со временем линейные матричные неравенства оказались весьма плодотворным аппаратом исследования многих задач по теории управления и теории систем. Этот аппарат до сих пор является мощным средством для решения новых задач управления. Синтез таким подходом стабилизирующих регуляторов и наблюдателей состояния для стабилизации переходных процессов в системах векторного управления является предпочтительным. В такой постановке данная задача принадлежит к классу задач выпуклого программирования, так как ее решение сводится к разрешимости системы линейных матричных неравенств. Современное программное обеспечение позволяет решать такого рода задачи [8, 9].

Цель работы – построение методик синтеза стабилизирующих регуляторов и наблюдателя состояния для системы векторного управления асинхронного электропривода.

Теоретической основой для построения таких методик служили теории векторного управления трехфазного асинхронного электропривода [10, 11], линейных матричных неравенств [3] и устойчивости А.М. Ляпунова [4]. Вычислительные алгоритмы реализованы в среде пакетов MATLAB и MathCAD. На конкретном примере показано, что предложенные методики позволяют стабилизировать переходные процессы в системе векторного управления асинхронного электропривода.

Методы и результаты исследований. Исходными уравнениями для синтеза стабилизирующих регуляторов служили уравнения электромагнитного равновесия и основное уравнение динамики асинхронного электропривода с симметричной трехфазной машиной с короткозамкнутым ротором.

В ортогональной системе координат $u-v$, вращающейся с произвольной угловой скоростью ω_k , их можно представить в виде [10, 11]:

$$\frac{di_{su}}{dt} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} u_{su} - \frac{1}{\sigma T_s} \left(1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s} \right) i_{su} +$$

$$+ \frac{k_r}{\sigma T_r R_s T_s} \psi_{ru} + \frac{k_r z_p}{\sigma R_s T_s} \omega \psi_{rv} + \omega_k i_{sv};$$

$$\frac{di_{sv}}{dt} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} u_{sv} - \frac{1}{\sigma T_s} \left(1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s} \right) i_{sv} +$$

$$+ \frac{k_r}{\sigma T_r R_s T_s} \psi_{rv} - \frac{k_r z_p}{\sigma R_s T_s} \omega \psi_{ru} - \omega_k i_{su};$$

$$\frac{d\psi_{ru}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_{ru} + k_r R_r i_{su} + (\omega_k - z_p \omega) \psi_{rv};$$

$$\frac{d\psi_{rv}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_{rv} + k_r R_r i_{sv} - (\omega_k - z_p \omega) \psi_{ru};$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c,$$

где i_{su} , i_{sv} и u_{su} , u_{sv} – соответственно проекции токов и напряжений статора на оси $u-v$; R_s , R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; ω – угловая скорость двигателя; J – момент инерции электропривода; z_p – число пар полюсов двигателя; T_s , T_r – постоянные времени статора и ротора; k_s , k_r – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора; ψ_{ru} , ψ_{rv} – проекции вектора потокосцепления ротора на оси координат $u-v$; M – электромагнитный вращающий момент двигателя; M_c – момент статического сопротивления; σ – коэффициент рассеяния двигателя; t – время.

Электромагнитный момент двигателя определяется по формуле

$$M = \frac{3}{2} z_p k_r \psi_{ru} i_{sv}. \quad (6)$$

Согласно известному принципу векторного управления Ф. Блашке совместим ось u системы координат $u-v$ с вектором потокосцепления ротора, вращающимся с угловой скоростью $\omega_k = \omega_0$. Тогда

$$\psi_{rv} = 0, \quad \psi_{ru} = \psi_r.$$

Используя эти условия, систему уравнений (1) – (5) с учетом выражения (6) для электромагнитного момента двигателя приведем к нормальному виду Коши:

$$\frac{di_{su}}{dt} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} u_{su} - \frac{1}{\sigma T_s} \left(1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s} \right) i_{su} +$$

$$+ \frac{k_r}{\sigma T_r R_s T_s} \psi_r + \omega_0 i_{sv};$$

$$\frac{di_{sv}}{dt} = \frac{1}{\sigma R_s T_s} u_{sv} - \frac{1}{\sigma T_s} \left(1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s} \right) i_{sv} -$$

$$- \frac{k_r z_p}{\sigma R_s T_s} \omega \psi_r - \omega_0 i_{su};$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_r + k_r R_r i_{su}; \quad (9)$$

$$k_r R_r i_{sv} - (\omega_0 - z_p \omega) \psi_r = 0; \quad (10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3 z_p k_r \psi_r}{2 J} i_{sv} - \frac{1}{J} M_c. \quad (11)$$

Уравнения (7) и (8) содержат перекрестные связи по току статора. Ими будем пренебрегать, как и в работе [2]. В этом случае из системы уравнений (7) – (11) выпадает уравнение (10).

Будем рассматривать поведение машины на холостом ходу. Тогда правая часть уравнения (11) не будет содержать момента статического сопротивления M_c . Однако в структурной схеме и при моделировании его влияние на поведение системы будет учитываться.

Перейдем к матричной форме записи уравнений состояния (7) – (9) и (11) для каждого канала в отдельности. Тогда для канала стабилизации потокосцепления ротора ψ_r получим

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u, \quad (12)$$

где

$$x_1 = \begin{pmatrix} i_{su} \\ \psi_r \end{pmatrix}; \quad u = \begin{pmatrix} u_{su} \\ u_{sv} \end{pmatrix}; \quad A_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; \quad B_1 = \begin{pmatrix} b & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$a_{11} = -\frac{1}{\sigma T_s} \left(1 + k_r^2 \frac{R_r}{R_s} \right); \quad a_{12} = \frac{k_r}{\sigma T_r R_s T_s}; \quad a_{21} = k_r R_r;$$

$$a_{22} = -\frac{1}{T_r}; \quad b = \frac{1}{\sigma R_s T_s},$$

а для канала управления частотой вращения ω ротора

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u, \quad (13)$$

где

$$x_2 = \begin{pmatrix} i_{sv} \\ \omega \end{pmatrix}; \quad u = \begin{pmatrix} u_{su} \\ u_{sv} \end{pmatrix}; \quad A_2 = \begin{pmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{pmatrix}; \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 & b \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$a'_{11} = a_{11}; \quad a'_{12} = -\frac{k_r z_p}{\sigma R_s T_s} \psi_r; \quad a'_{21} = \frac{3 z_p k_r}{2 J} \psi_r; \quad a'_{22} = 0.$$

Точка над буквой обозначает производную по времени.

Известно, что для стабилизируемости линейных систем достаточно их управляемости. Однако управлять можно как устойчивыми, так и неустойчивыми системами. Управляемость, как критерий стабилизируемости систем [1], необходима для установления возможности построения стабилизирующих регуляторов. Она выражается согласно известной теореме Р. Калмана через ранг матрицы управляемости.

Составим матрицы управляемости для уравнений (12) и (13):

$$P_1 = (B_1 \quad A_1 B_1) = \begin{pmatrix} b & 0 & a_{11} b & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} b & 0 \end{pmatrix};$$

$$P_2 = (B_2 \quad A_2 B_2) = \begin{pmatrix} 0 & b & 0 & a'_{11} b \\ 0 & 0 & 0 & a'_{21} b \end{pmatrix}.$$

Ранги этих матриц

$$\text{rank } P_1 = 2; \quad \text{rank } P_2 = 2.$$

Они совпадают с порядками систем (7), (9) и (8), (11) соответственно. Поэтому каналы, описываемые

матричными уравнениями состояния (12) и (13), полностью управляемы.

Перейдем к построению устойчивых стабилизирующих регуляторов для каналов управления (12) и (13). Введем обратные связи по состоянию

$$u = K_i x_i \quad (i = \overline{1,2}), \quad (14)$$

где $K_1 = (k_1 \ k_2)$, $K_2 = (k_1' \ k_2')$ – матрицы коэффициентов усиления регуляторов.

Подставим выражения (14) в (12) и (13). Тогда получим для каждого канала, замкнутого по вектору состояния, следующие уравнения

$$\dot{x}_i = A_{ci} x_i \quad (i = \overline{1,2}), \quad (15)$$

где $A_{c1} = A_1 + B_1 K_1$; $A_{c2} = A_2 + B_2 K_2$.

Введем квадратичные функции А.М. Ляпунова

$$v_i(x_i) = x_i^T V_i x_i \quad (i = \overline{1,2}),$$

где V_i – положительно определенная симметричная матрица квадратичной формы i -го канала.

Определим производные

$$\dot{v}_i(x_i) = \dot{x}_i^T V_i x_i + x_i^T V_i \dot{x}_i = x_i^T (A_{ci}^T V_i + V_i A_{ci}) x_i \quad (i = \overline{1,2}).$$

Согласно А.М. Ляпунову система будет устойчивой, если выполняются условия $\dot{v}_i(x_i) < 0$ ($i = \overline{1,2}$) для всех $x_i \neq 0$.

Эти условия с учетом (15) дают следующие матричные неравенства [3]:

$$\Psi_i + P_i^T K_i^T Q_i + Q_i^T K_i P_i < 0 \quad (i = \overline{1,2}), \quad (16)$$

где $\Psi_i = Y_i A_i^T + A_i Y_i$; $P_i = Y_i = V_i^{-1}$; $Q_i = B_i^T$.

Каждое из этих неравенств разрешимо относительно матрицы K_i тогда и только тогда, когда разрешимы неравенства

$$W_{B_i^T}^T \Psi_i W_{B_i^T} < 0, \quad Y_i > 0, \quad (17)$$

где $W_{B_i^T}$ – матрица, столбцы которой составляют базис ядра матрицы B_i^T .

Подставляя решение Y_i каждого неравенства (17) в (16), получим матричные неравенства с неизвестными матрицами K_1 , K_2 . Их численные решения итерационным методом в среде пакета MATLAB позволяют определить коэффициенты усиления k_1 , k_2 и k_1' , k_2' стабилизирующих регуляторов.

Построим методику синтеза наблюдателя состояния, производящего оценку сигналов управления i_{su} , i_{sv} , ψ_r обратных связей по результатам измерений входных u_{su} , u_{sv} и выходного ω сигналов. Для измерения входных сигналов u_{su} и u_{sv} используются преобразователи координат. Это позволяет снимать фазные напряжения непосредственно с клемм трехфазной асинхронной машины.

Для построения методики синтеза наблюдателя представим уравнения состояния машины (7)-(9) и (11) без момента статического сопротивления и перекрестных связей по току статора в матричной форме:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad (18)$$

$$x = \begin{pmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ \psi_r \\ \omega \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & a'_{11} & a_{\omega} & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & a'_{21} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\text{где } a_{\omega} = -\frac{k_r z_p}{\sigma R_s T_s} \omega.$$

Сформируем матричное уравнение выхода.

Выходным сигналом машины является угловая скорость ротора. Поэтому матричное уравнение выхода имеет вид

$$y = Cx, \quad (19)$$

где $C = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$.

Нетрудно установить по [1], что пара (A, C) полностью наблюдаема. Поэтому можно построить наблюдатель полного порядка для управляемой системы (18) и (19). Его математическая модель имеет вид [1]:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + G(\hat{y} - y); \quad (20)$$

$$\hat{y} = C\hat{x},$$

где $G = (g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4)^T$ – матрица коэффициентов усиления наблюдателя; \hat{x} , \hat{y} – оцененные значения фазового вектора x и вектора выхода y .

Найдем уравнение ошибки $e = \hat{x} - x$ наблюдателя. Для этого вычтем из уравнения наблюдателя (20) уравнение объекта (18). Тогда получим

$$\frac{de}{dt} = A_c e, \quad (21)$$

где $A_c = A + GC$.

Из этого уравнения следует, что при устойчивом наблюдателе ошибка стремится к нулю на установившемся режиме работы двигателя.

Определим матрицу G коэффициентов усиления наблюдателя, при которых замкнутая система (21) устойчива по А.М. Ляпунову.

Введем квадратичную функцию А.М. Ляпунова

$$v(e) = e^T V e,$$

где V – положительно определенная симметричная матрица.

Определим производную

$$\dot{v}(e) = \dot{e}^T V e + e^T V \dot{e} = e^T (A_c^T V + V A_c) e.$$

Для устойчивой системы должно выполняться условие А.М. Ляпунова $\dot{v}(e) < 0$ для всех $e \neq 0$.

Этому условию соответствует неравенство

$$A_c^T V + V A_c < 0.$$

Перепишем это неравенство в виде

$$A^T V + C^T G^T V + V A + V G C < 0.$$

Умножая справа и слева обе части полученного неравенства на V^{-1} и введя обозначение $Y = V^{-1}$, будем иметь

$$Y A^T + A Y + Y C^T G^T + G C Y < 0. \quad (22)$$

Введем новые величины $\Psi = Y A^T + A Y$, $\Theta = G C$, $P = Y$, $Q = I$ (I – единичная матрица). Тогда неравенство (22) приведем к виду [3]:

$$\Psi + P^T \Theta^T Q + Q^T \Theta P < 0, \quad Y > 0.$$

В этом неравенстве ранги матриц Q и P равны порядку объекта (18). Поэтому оно всегда разрешимо. Согласно [3] его решение проводится в два этапа. На первом этапе решается неравенство

$$Y A^T + A Y + 2S < 0 \quad (23)$$

относительно положительно определенной симметричной матрицы Y при произвольно заданной матрице S соответствующего порядка. На втором этапе решение Y используется для определения матрицы G из неравенства (22). При этом оба неравенства (22) и (23) решаются численно итерационным методом в среде пакета MathCAD [9].

Другой способ решения неравенства (22) обычно проводится в среде пакета MATLAB с применением функции *feasp* [8]. Как показывают расчеты, он приводит к тем же результатам, которые получаются в среде пакета MathCAD [9].

На рис. 1 представлена структурная схема системы векторного управления асинхронного электропривода со стабилизирующими регуляторами и наблюдателем состояния полного порядка.

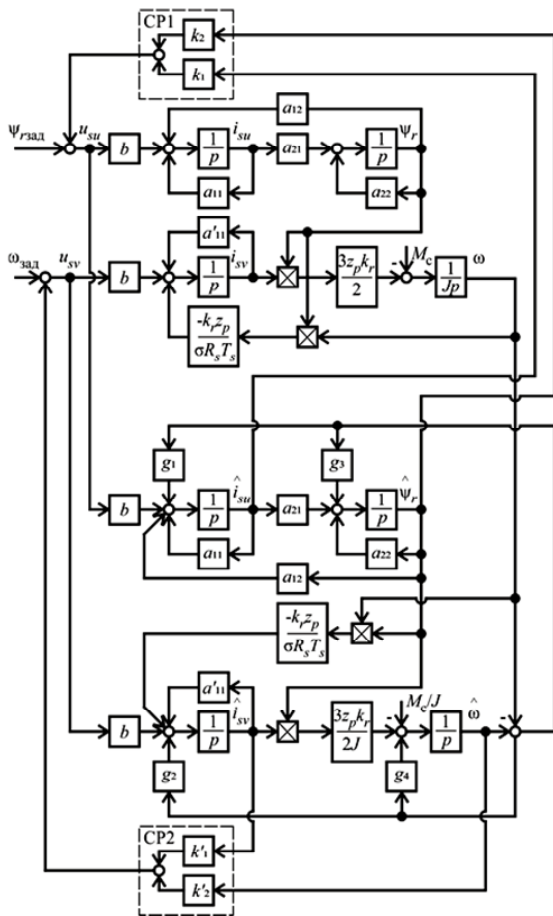


Рис. 1

Система содержит каналы регулирования потокосцепления ротора и частоты вращения двигателя, наблюдатель состояния и стабилизирующие регуляторы CP1 и CP2 с коэффициентами усиления k_1, k_2 и k'_1, k'_2 . Наблюдатель включает в себя математическую модель электропривода и обратные связи с коэффициентами усиления g_1, g_2, g_3, g_4 . При этом коэффициенты усиления k_1, k_2, k'_1, k'_2 и g_1, g_2, g_3, g_4 рассчитываются при номинальных значениях потокосцепления ψ_r и угловой скорости ω ротора.

Двигатель нагружен постоянным моментом M_c на установившемся режиме. Управляющие задающие воздействия по потокосцеплению и угловой скорости ротора обозначены $\psi_{r\text{зад}}$ и $\omega_{\text{зад}}$.

В качестве примера приведем результаты синтеза стабилизирующих регуляторов и наблюдателя состояния для трехфазной асинхронной машины 4A100S4Y3 мощностью 3 кВт и номинальной частотой вращения 1435 об/мин.

На рис. 2 показаны кривые, полученные при моделировании переходных процессов в пакете MATLAB, протекающих в системе векторного управления электропривода со стабилизирующими регуляторами и наблюдателем состояния. Они приведены в относительных единицах и обозначены теми же буквами, что и размерные величины. Характер этих кривых существенно отличается от тех, которые приведены в работе [2].

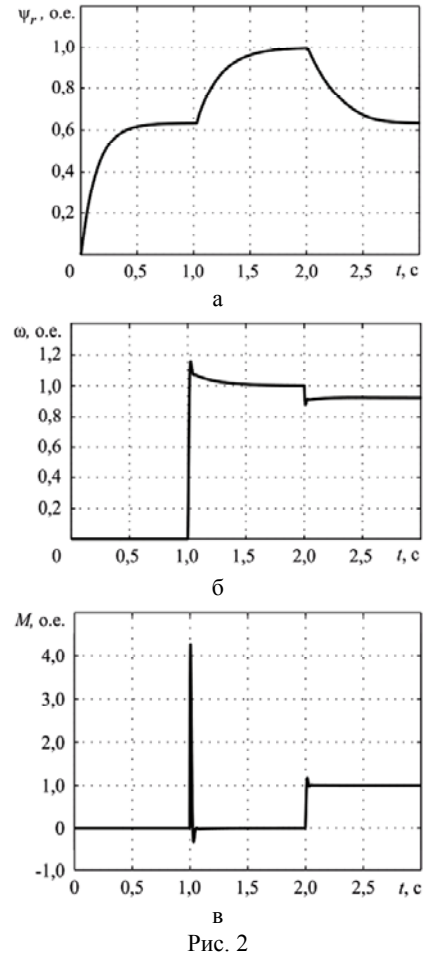


Рис. 2

На начальном участке пусковая характеристика потокосцепления ротора имеет излом (рис. 2,а). Этот излом обусловлен включением в работу обратной связи по скорости ω стабилизирующего регулятора CP2 при подаче с запаздыванием на одну секунду ступенчатого сигнала $\omega_{\text{зад}}$ (рис. 2,б). Такое время запаздывания соответствует установившемуся значению потокосцепления ротора на начальном участке пусковой характеристики до точки излома. После точки излома рост потокосцепления ротора продолжается до установившегося значения, соответствующего моменту времени 2 с. Это значение времени принято за начало приложения ступенчатой нагрузки $M_c = 20$ Н·м (скачок на рис. 2,в безразмерного электромагнитного момента M). После приложения нагрузки M_c потокосцепление ротора плавно снижается до установившегося

значения, соответствующего точке излома пусковой характеристики на начальном участке работы машины.

Угловая скорость ротора в момент приложения нагрузки M_c снижается незначительно и по истечении сравнительно малого промежутка времени в дальнейшем не изменяется (см. рис. 2,б).

Таким образом, стабилизирующие регуляторы с наблюдателем состояния обеспечивают устойчивость протекания переходных процессов в системе векторного управления электропривода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

Выводы. На базе теории линейных матричных неравенств разработаны методики синтеза стабилизирующих регуляторов и наблюдателя состояния системы векторного управления трехфазного асинхронного электродвигателя. Эти методики не учитывают ограничений на параметры управления и фазовые координаты. Поэтому они могут быть трудно реализуемыми при учете таких ограничений. Вместе с тем, как показали проведенные в данной работе исследования, предложенные методики гарантируют устойчивость протекающих процессов в системе векторного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлопенко М.Я., Білюк І.С., Шевченко В.В. Оптималне керування об'єктами: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Миколаїв: НУК, 2013. – 172 с.
2. Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Модальное управление асинхронным электроприводом // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т.324. – №4. – С. 69-75.
3. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. – М.: Физматлит, 2007. – 280 с.
4. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 472 с.
5. Pyatnitskii E.S., Skorodinskii V.I. Numerical methods of Lyapunov function construction and their application to the absolute stability problem // *Systems & Control Letters*. – 1982. – vol.2. – no.2. – pp. 130-135.
6. Nesterov Y.E., Nemirovski A.S. *Interior-Point Polynomial Algorithms in Convex Programming*. – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, United States, 1994. – P. 405.
7. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, United States, 1994. – P. 185.
8. Чурилов А.Н., Гессен А.В. Исследование линейных матричных неравенств. Путьодитель по программным пакетам. – СПб.: Изд-во С.-Петербурга. ун-та, 2004. – 148 с.
9. Maxfield B. *Essential PTC Mathcad Prime 3.0: A Guide for New and Existing Users*. – Amsterdam: Academic Press, 2013.
10. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 304 с.
11. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: Академия. – 2006. – 272 с.

REFERENCES

1. Khlopenko N.J., Biljuk I.S., Shevchenko V.V. *Optymal'ne keruvannja ob'ektamy: Navchalnyi posibnyk dlja studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv* [Optimal control of objects: University students textbook]. Mykolayiv, National University of Shipbuilding Publ., 2013. 172 p. (Ukr).
2. Korotkov M.F., Pahomov A.N., Fedorenko A.A. Modal control of asynchronous electric drive. *Izvestia Tomskogo*

politekhneskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2014, vol.324, no.4, pp. 69-75. (Rus).

3. Balandyn D.V., Kogan, M.M. *Sintez zakonov upravlenija na osnove linejnyh matrichnyh neravenstv* [Synthesis of control rules based on linear matrix inequalities]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 280 p. (Rus).
4. Lyapunov A.M. *Obshhaja zadacha ob ustojchivosti dvizhenija* [General problem of motion stability]. Moscow-Leningrad, GITTL Publ., 1950. 472 p. (Rus).
5. Pyatnitskiy Ye.S., Skorodinskiy V.I. Numerical methods of Lyapunov function construction and their application to the absolute stability problem. *Systems & Control Letters*, 1982, vol.2, no.2, pp. 130-135. doi: 10.1016/s0167-6911(82)80023-6.
6. Nesterov Y.E., Nemirovski A.S. *Interior-Point Polynomial Algorithms in Convex Programming*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA, 1994. 405 p. doi: 10.1137/1.9781611970791.
7. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA, 1994. 185 p. doi: 10.1137/1.9781611970777.
8. Churilov A.N., Gessen A.V. *Issledovanie linejnyh matrichnyh neravenstv. Putevoditel' po programmnyh paketam* [The study of linear matrix inequalities. Guide to software packages]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University Publ., 2004. 148 p. (Rus).
9. Maxfield B. *Essential PTC Mathcad Prime 3.0: A Guide for New and Existing Users*. Amsterdam: Academic Press, 2013.
10. Terehov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravlenija elektroprivodov: uchebnik dlja studentov vysshih uchebnyh zavedenij* [Control system of electric drives: high school textbook]. Moscow, Publishing Center "Akademija", 2006. 304 p. (Rus).
11. Sokolovskij G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem* [AC drives with frequency control]. Moscow, Publishing Center "Akademija", 2006. 272 p. (Rus).

Поступила (received) 09.10.2014.

Хлопенко Николай Яковлевич¹, д.т.н., проф.,
Гаврилов Сергей Алексеевич¹, к.т.н.,
Хлопенко Иван Николаевич¹, студент,
¹Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова,
54021, Николаев, просп. Ленина, 3,
тел/phone +38 0512 709100,
e-mail: iv_n@mksat.net, sergey.gavrilov81@gmail.com

N.J. Khlopenko¹, S.A. Gavrilov¹, I.N. Khlopenko¹
¹ Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
3, Lenina Ave., Nikolaev, 54021, Ukraine.

Stabilization of parameters of asynchronous electric drive with vector control.

A problem of stabilization of parameters of the asynchronous electric drive vector control system is considered. Usually such systems have two control channels. The synthesis of stabilizing controllers is made for every control channel. The evaluation of variables of system status is made by observer. The problem of stabilizing controllers and observer synthesis consists in calculation of state feedback intensification. Its solution is based on existing approaches from vector control theories, matrix inequalities and Lyapunov stability. Several synthesis methods of stabilizing controllers have been proposed. Structural scheme of vector control system and observer has been built. The simulation of transient processes in the vector control system is carried out with MATLAB computing environment. The most important property of obtained solution is Lyapunov stability of control loops closed-looped by state vectors. Transient processes have been investigated on the particular example. Graphs confirming stability of such processes that flow in the vector control system in minimal period of time have been plotted down. References 11, figures 2.

Key words: electric drive, vector control, stabilizing controller.

М.И. Баранов, Г.М. Колишко, В.И. Кравченко, С.В. Рудаков

МОЩНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ С НОРМИРОВАННЫМИ ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ СТАНДАРТУ IEC 62305-1-2010 АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Представлений і описаний створений відповідно до вимог міжнародного стандарту IEC 62305-1-2010 потужний високовольтний генератор, що формує на низькоомному активно-індуктивному навантаженні аперіодичні імпульси струму штучної блискавки нормованої тимчасової форми 10 мкс/350 мкс і амплітуди $\pm(100-200)$ кА із заданими вищезгаданим стандартом допусками. Приведені результати практичної апробації у лабораторних умовах даного генератора при використуваному електричному навантаженні з активним опором 0,1 Ом і індуктивністю 1,5 мкГн. Бібл. 14, рис. 8.

Ключові слова: генератор аперіодичних імпульсів струму штучної блискавки, потужне джерело енергії, низькоомне електричне навантаження.

Представлен и описан созданный в соответствии с требованиями международного стандарта IEC 62305-1-2010 мощный высоковольтный генератор, формирующий на низкоомной активно-индуктивной нагрузке аперіодические импульсы тока искусственной молнии нормированной временной формы 10 мкс/350 мкс и амплитуды $\pm(100-200)$ кА с заданными вышеуказанным стандартом допусками. Приведены результаты практической апробации в лабораторных условиях данного генератора при используемой электрической нагрузке с активным сопротивлением 0,1 Ом и индуктивностью 1,5 мкГн. Библ. 14, рис. 8.

Ключевые слова: генератор аперіодических импульсов тока искусственной молнии, мощный источник энергии, низкоомная электрическая нагрузка.

Введение. При испытаниях на молниестойкость и пожаровзрывобезопасность зданий (сооружений) с находящимися внутри них различными инженерными сетями и системами к воздействию короткого удара грозового разряда в соответствии с требованиями ряда действующих международных и национальных стандартов [1-5] используются аперіодические импульсы тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП). Согласно [1-5] временная форма таких испытательных импульсов тока должна соответствовать $\tau_f/\tau_p=10$ мкс/350 мкс, где τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта (с допуском $\pm 20\%$) и длительность импульса (с допуском $\pm 10\%$) тока, а их амплитуда принимать численные значения $I_m=\pm(100-200)$ кА (с допуском $\pm 10\%$). При этом регламентирующие документы [1-5] устанавливают четыре уровня защиты от линейной молнии и соответственно четыре степени жесткости испытаний технических объектов на молниестойкость и пожаровзрывобезопасность. Кроме того, для каждого уровня защиты от молнии указанные стандарты определяют следующие АВП испытательного импульса тока [1-5]: *I уровень* – $I_m=\pm 200$ кА (с допуском $\pm 10\%$); удельная энергия (интеграл действия тока молнии) $J_a=10 \cdot 10^6$ А²·с (с допуском $\pm 35\%$); протекший заряд $q_I=\pm 100$ Кл (с допуском $\pm 20\%$); *II уровень* – $I_m=\pm 150$ кА (с допуском $\pm 10\%$); удельная энергия (интеграл действия тока молнии) $J_a=5,6 \cdot 10^6$ А²·с (с допуском $\pm 35\%$); протекший заряд $q_I=\pm 75$ Кл (с допуском $\pm 20\%$); *III-IV уровни* – $I_m=\pm 100$ кА (с допуском $\pm 10\%$); удельная энергия (интеграл действия тока молнии) $J_a=2,5 \cdot 10^6$ А²·с (с допуском $\pm 35\%$); протекший заряд $q_I=\pm 50$ Кл (с допуском $\pm 20\%$). Отметим, что интеграл действия импульса тока молнии $i_L(t)$ определяется выражением $J_a = \int_0^{\tau_p} i_L^2(t) dt$, а протекший

заряд – $q_I = \int_0^{\tau_p} i_L(t) dt$. При моделировании в условиях

высоковольтной лаборатории указанного испытательного импульса тока искусственной молнии его временной параметр τ_f носит согласно [1-5] второстепенный характер, что допускает использование для него диапазона $10 \text{ мкс} \leq \tau_f \leq 15 \text{ мкс}$ и существенно упрощает на практике его получение.

Из существующих на сегодня в ведущих научно-технических центрах мира высоковольтных сильно-точных электрофизических установок, воспроизводящих в лабораторных условиях требуемый по [1-5] аперіодический импульс тока искусственной молнии временной формы 10 мкс/350 мкс, следует указать российский имитатор импульсного тока молнии, приведенный в [6]. Данный имитатор тока линейной молнии формирует на электрической низкоомной малоиндуктивной нагрузке испытываемого технического объекта соответствующие импульсы тока амплитудой I_m лишь до ± 100 кА. В [7] нами был описан созданный в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в 2007 г. в соответствии с требованиями международных нормативных документов [8-11] украинский генератор тока искусственной молнии, формирующий на бортовых устройствах авиационной и ракетно-космической техники необходимые АВП импульсной (А), повторной импульсной (D), промежуточной (B) и длительной (C) компонент импульсного тока грозового разряда. Поэтому актуальной прикладной задачей в области высоковольтной сильноточной импульсной техники является та, которая связана с созданием генератора аперіодических импульсов тока искусственной молнии временной формы 10 мкс/350 мкс с нормированной амплитудой I_m формируемого на нагрузке испытываемого объекта импульса тока от ± 100 до ± 200 кА.

© М.И. Баранов, Г.М. Колишко, В.И. Кравченко, С.В. Рудаков

Причем, такого генератора, который в своей разрядной цепи не содержит сложного по конструкции, дорогостоящего по цене и ненадежного в работе шунтирующего коммутатора, замыкающего нагрузку в момент достижения на ней тока амплитуды I_m [1, 5].

Основные технические характеристики мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350.

Разработанный и созданный в 2014 г. в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" мощный генератор импульсов тока молнии (ГИТМ) временной формы 10 мкс/350 мкс (далее – генератор ГИТМ-10/350) в своем составе содержит четыре высоковольтных генератора импульсных токов (ГИТ), обеспечивающих при своей параллельной работе на общую активно-индуктивную нагрузку испытываемого на молниестойкость (пожаровзрывобезопасность) электротехнического устройства получение требуемых по международному стандарту IEC 62305-1-2010 [1] АВП аperiodических импульсов тока короткого удара имитированной линейной молнии. Общий вид мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 приведен ниже на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид мощного высоковольтного генератора тока имитированной линейной молнии ГИТМ-10/350

На рис. 2 показана электрическая схема замещения сильноточных разрядных цепей как отдельных генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4, так и генератора ГИТМ-10/350 в целом.

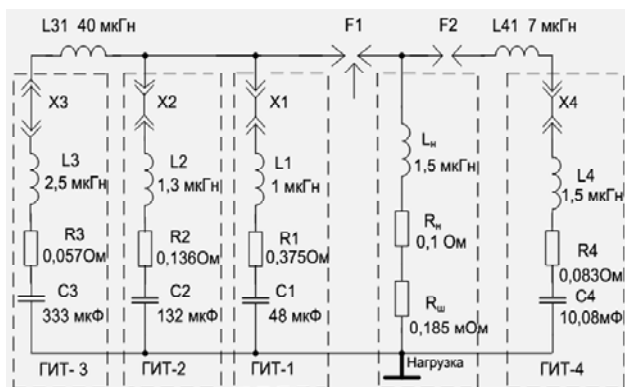


Рис. 2. Электрическая схема замещения сильноточных разрядных цепей четырех отдельных высоковольтных генераторов ГИТ-1–ГИТ-4 и полная электрическая схема мощного генератора тока имитированной молнии ГИТМ-10/350

Все эти высоковольтные генераторы собраны на основе емкостных накопителей энергии. Причем,

генераторы ГИТ-1–ГИТ-3 укомплектованы высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИК-50-3 (номинальное напряжение ± 50 кВ; номинальная емкость 3 мкФ), а генератор ГИТ-4 – высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИМ2-5-140 (номинальное напряжение ± 5 кВ; номинальная емкость 140 мкФ) [12].

Отметим, что конденсаторы генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3 в зарядно-разрядных цепях включены параллельно, а конденсаторы генератора ГИТ-4 – последовательно-параллельно. Все высоковольтные конденсаторы генератора ГИТМ-10/350, имеющие металлические корпуса, были размещены на двух этажах изолированных у своего основания от земли с помощью опорных фарфоровых изоляторов типа КО-400С его несущих металлических (НМК) и изоляционных (НИК) конструкций [7]. Металлические корпуса конденсаторов типа ИК-50-3 установлены как на металлический пол НМК генераторов ГИТ-1 и ГИТ-2, так и на изоляционный пол НИК генератора ГИТ-3. Металлические корпуса конденсаторов типа ИМ2-5-140 изолированы от металлоконструкций пола этажей НМК генератора ГИТ-4 при помощи уложенных на пол прямоугольных изоляционных балок из древесно-слоистого пластика типа ДСПБ-Э поперечным сечением 70×70 мм. При этом генератор ГИТ-1 содержит 16 параллельно соединенных конденсаторов на номинальное зарядное напряжение ± 50 кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 60 кДж (рис. 3), генератор ГИТ-2 – 44 параллельно соединенных конденсаторов на номинальное зарядное напряжение ± 50 кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 165 кДж (рис. 3), генератор ГИТ-3 – 111 параллельно соединенных конденсаторов на номинальное зарядное напряжение ± 50 кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 416 кДж (рис. 4), а генератор ГИТ-4 – 288 последовательно-параллельно соединенных в 144 параллельные секции конденсаторов (по два емкостных накопителя энергии в каждой) на номинальное зарядное напряжение ± 10 кВ с суммарной номинальной запасаемой энергией 504 кДж (рис. 5).



Рис. 3. Общий вид генераторов ГИТ-1 (16 параллельно соединенных конденсаторов типа ИК-50-3 на 1 и 2 этажах НМК) и ГИТ-2 (44 параллельно соединенных конденсаторов типа ИК-50-3 на 1 и 2 этажах НМК) на номинальное зарядное напряжение ± 50 кВ, входящих в состав мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350

На рис. 2 приняты следующие обозначения: $X1 - X4$ – массивные токопроводящие переключатели высоковольтных зарядно-разрядных цепей отдельных высоковольтных генераторов ГИТ-1 – ГИТ-4; $L31, L41$ – формирующие (развязывающие) индуктивности разрядных цепей генераторов ГИТ-3 и ГИТ-4 соответственно; $F1, F2$ – высоковольтные силовоточные воздушные коммутаторы разрядных цепей соответственно генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3 и генератора ГИТ-4.



Рис. 4. Общий вид генератора ГИТ-3 (111 параллельно соединенных конденсаторов типа ИК-50-3 на 1 и 2 этажах НИК) на номинальное напряжение ± 50 кВ, входящего в состав мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350



Рис. 5. Общий вид генератора ГИТ-4 (288 последовательно-параллельно включенных конденсаторов типа ИМ2-5-140 на 1 и 2 этажах НМК) на номинальное напряжение ± 10 кВ, входящего в состав мощного генератора ГИТМ-10/350

Формирующие электрические элементы зарядно-разрядных цепей генераторов ГИТ-3 (семивитковая индуктивность $L31 \approx 40$ мкГн) и ГИТ-4 (одновитковая индуктивность $L41 \approx 7$ мкГн) выполнены в виде катушек, намотанных из крупногабаритного радиочастотного кабеля марки РК 75-44-17 [13] со снятой защитной полиэтиленовой оболочкой и медной оплеткой.

Данные высоковольтные катушки, содержащие круглую сплошную медную жилу этого высоковольтного кабеля диаметром 6,6 мм, практически не влияют на собственные активные сопротивления $R3$ и $R4$ низкочастотных разрядных цепей генераторов ГИТ-3 и ГИТ-4.

Во избежание разрушительных последствий в созданном мощном генераторе ГИТМ-10/350 при аварийном режиме его работы, вызванном внутренним электрическим пробоем на стадии заряда (разряда) одного из его высоковольтных конденсаторов, в каждом из используемых в нем генераторах ГИТ-1–ГИТ-4 на всех высоковольтных выводах их конденсаторов установлены защитные резисторы, набранные в виде компактных конструкций из параллельно соединенных высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-24 Ом [7].

Коммутация в силовоточных разрядных цепях генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3 осуществляется высоковольтным трехэлектродным воздушным управляемым коммутатором с графитовыми электродами (КВГУ) $F1$ на номинальное напряжение ± 50 кВ и номинальный импульсный ток имитированной молнии амплитудой до $I_m \approx \pm 300$ кА (рис. 6). Коммутатор КВГУ-50 управляется за счет подачи на его средний графитовый электрод высоковольтного микросекундного импульса напряжения амплитудой до ± 100 кВ от специального высоковольтного пускового генератора типа ГВПИ-100 [7]. Конструкция коммутатора КВГУ-50 позволяет осуществлять регулировку его двух рабочих воздушных зазоров в пределах от 1 до 20 мм.

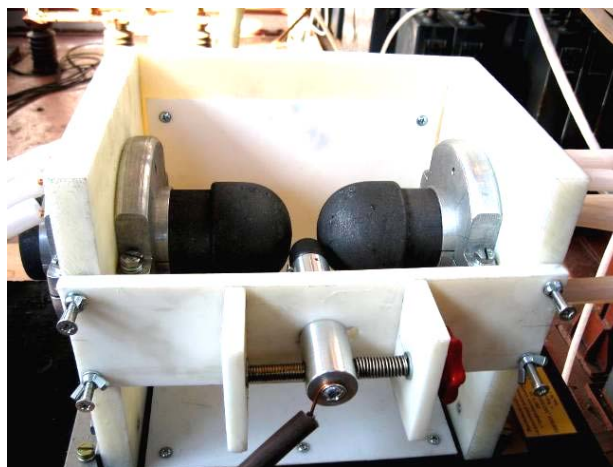


Рис. 6. Общий вид трехэлектродного воздушного управляемого коммутатора с графитовыми электродами КВГУ-50 (F_1) на номинальное напряжение ± 50 кВ и номинальный ток имитированной молнии амплитудой I_m до ± 300 кА

Высоковольтный двухэлектродный воздушный неуправляемый коммутатор с графитовыми электродами (КВГН) $F2$ на номинальное напряжение ± 10 кВ и номинальный импульсный ток молнии амплитудой I_m до ± 100 кА (рис. 7), предназначенный для коммутации силовоточной разрядной цепи генератора ГИТ-4, состоит из двух графитовых эрозиянностойких электродов от мощной электрической машины с плоскими рабочими поверхностями, зазор между которыми регулируется в пределах от 1 до 10 мм. Запускается двухэлектродный коммутатор КВГН-10 ($F2$) высоким импульсным напряжением, возникающим на

элементах электрической нагрузки R_H , L_H при срабатывании трехэлектродного коммутатора КВГУ-50 (F_1) и начале протекания по этой нагрузке импульсного разрядного тока от генераторов ГИТ-1–ГИТ-3.

В случае проверки отдельной работы генератора ГИТ-4 на указанную электронагрузку и выключения с помощью токопроводящих перемычек Х1–Х3 из разрядной схемы генераторов ГИТ-1–ГИТ-3 коммутатор КВГН-10 срабатывает от пускового импульса напряжения генератора ГВПИ-100 при специальной настройке воздушных зазоров коммутатора КВГУ-50.

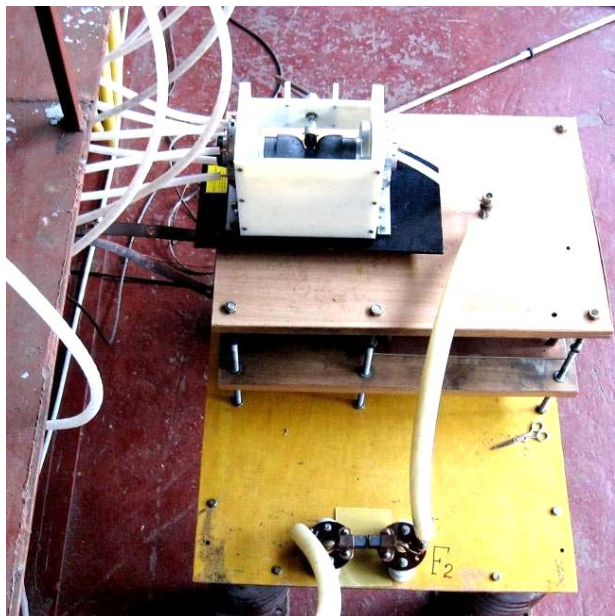


Рис. 7. Общий вид сверху рабочего стола генератора ГИТМ-10/350 с размещенными на нем трехэлектродным воздушным управляемым коммутатором с графитовыми электродами КВГУ-50 (F_1) на напряжение ± 50 кВ и импульсный ток молнии амплитудой I_m до ± 300 кА и двухэлектродным воздушным неуправляемым коммутатором с графитовыми электродами КВГН-10 (F_2) на напряжение ± 10 кВ и импульсный ток молнии амплитудой I_m до ± 100 кА

В генераторе ГИТМ-10/350 в непотенциальную ("заземленную") электрическую цепь его высоковольтного разрядного контура последовательно с электрической нагрузкой включён прошедший государственную метрологическую поверку измерительный коаксиальный малоиндуктивный шунт типа ШК-300, имеющий собственное активное сопротивление $R_{ш} \approx 0,185$ мОм (рис. 2) [7]. Данный измерительный шунт в высоковольтной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 используется с коаксиальным выходом, имеющим коэффициент преобразования $11,26 \cdot 10^3$ А/В. Установлено, что шунт типа ШК-300 по своим электродинамическим и энергетическим характеристикам способен пропускать импульсные токи микросекундного временного диапазона амплитудой до ± 250 кА и электрический заряд до ± 250 Кл при рассеиваемой на себе тепловой энергии до 650 Дж [7].

Практическая реализация требуемых согласно [1–5] максимальных нормированных АВП аperiodических импульсов тока временной формы 10 мкс/350 мкс искусственной молнии амплитудой $I_m = \pm 200$ кА в генераторе ГИТМ-10/350 с низкоомной активно-

индуктивной нагрузкой ($R_H \approx 0,1$ Ом; $L_H \approx 1,5$ мкГн) осуществляется при суммарном зарядном напряжении высоковольтных конденсаторов для генераторов ГИТ-1–ГИТ-3 в диапазоне $\pm(30–31)$ кВ, а для генератора ГИТ-4 – $\pm(9,0–9,2)$ кВ. В последнем случае зарядное напряжение U_{C4} в генераторе ГИТ-4 для его отдельных высоковольтных конденсаторов типа ИМ2-5-140 не будет превышать $\pm 4,6$ кВ. Для получения минимальных нормированных по [1–5] АВП рассматриваемых аperiodических импульсов тока имитируемой молнии амплитудой $I_m = \pm 100$ кА в генераторе ГИТМ-10/350 с указанной электрической нагрузкой зарядное напряжение U_{C1-3} отдельных высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3 для генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3 изменяется в диапазоне $\pm(15–15,5)$ кВ, а зарядное напряжение U_{C4} отдельных конденсаторов типа ИМ2-5-140 для генератора ГИТ-4 – $\pm(2,25–2,3)$ кВ.

На рис. 8 приведена осциллограмма полученного в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 с низкоомной активно-индуктивной нагрузкой ($R_H \approx 0,1$ Ом; $L_H \approx 1,5$ мкГн) аperiodического импульса тока искусственной молнии с нормированными АВП в соответствии с требованиями международного стандарта ИЕС 62305-1-2010 [1]. При рабочем зарядном напряжении отдельных конденсаторов типа ИК-50-3 генераторов ГИТ-1–ГИТ-3 уровнем $U_{C1-3} = -15$ кВ и рабочем зарядном напряжении отдельных конденсаторов типа ИМ2-5-140 уровнем $U_{C4} = -2,25$ кВ амплитуда протекающего через указанную электронагрузку импульса тока отрицательной полярности короткого удара имитированной молнии по модулю составила $I_m \approx 106$ кА.

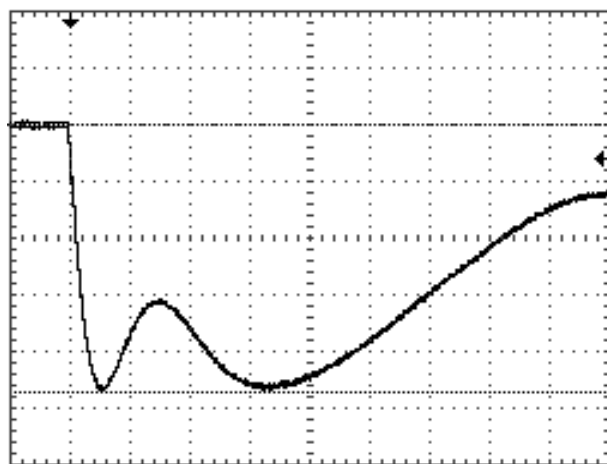


Рис. 8. Осциллограмма аperiodического импульса разрядного тока высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 в цепи низкоомной активно-индуктивной нагрузки ($R_H \approx 0,1$ Ом; $L_H \approx 1,5$ мкГн; $U_{C1-3} = -15$ кВ; $U_{C4} = -2,25$ кВ; $I_m \approx 106$ кА; $t_m \approx 24$ мкс; $\tau \approx 15$ мкс; $\tau_p \approx 340$ мкс; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

При этом время, соответствующее амплитуде I_m тока искусственной молнии, составило $t_m \approx 24$ мкс. Длительность фронта полученного нормированного импульса тока грозового разряда между уровнями $(0,1–0,9)I_m$ составила $\tau \approx 15$ мкс, а длительность сформированного на выбранной активно-индуктивной нагрузке аperiodического импульса тока линейной молнии на уровне $0,5 \cdot I_m$ оказалась равной $\tau_p \approx 340$ мкс. Интеграл действия полученного в этом случае

апериодического импульса тока имитированной молнии с модулем нормированной амплитуды $I_m \approx 106$ кА составил $J_a \approx 3,03 \cdot 10^6$ А²·с, а модуль протекшего через используемую в экспериментах RL -нагрузку электрического заряда – $q \approx 52,2$ Кл. Численная оценка для представленной на рис. 8 осциллограммы разрядного тока в использованной RL -нагрузке интеграла действия J_a и заряда q_l была проведена нами по следующим приближенным расчетным соотношениям [14]:

$$J_a \approx k_L^2 I_m^2 [0,14t_m + 0,66\tau_p + t_m\tau_p(1,52t_m + 7,4\tau_p)^{-1}]; \quad (1)$$

$$q_l \approx k_L I_m (1,32\tau_p + 0,27t_m), \quad (2)$$

где

$$k_L = [(0,21 \cdot t_m \tau_p^{-1})^{(3,7\tau_p - 0,76t_m)} - (0,21 \cdot t_m \tau_p^{-1})^{(3,7\tau_p - 0,76t_m)}]^{-1}$$

– нормирующий коэффициент для апериодического импульса тока искусственной линейной молнии (в нашем расчетном случае $k_L \approx 1,082$).

Приведенные согласно данным токовой осциллограммы на рис. 8 с учетом (1) и (2) результаты физического моделирования в лабораторных условиях при рабочих зарядных напряжениях $U_{C1-3} = -15$ кВ и $U_{C4} = -2,25$ кВ отдельных высоковольтных импульсных конденсаторов четырех указанных выше высоковольтных ГИТ созданного нами мощного генератора ГИТМ-10/350 апериодического импульса тока искусственной линейной молнии нормированной временной формы 10 мкс/350 мкс и амплитуды I_m указывают на то, что они полностью соответствуют III–IV уровням защиты от молнии технических объектов, удовлетворяющих требованиям действующих на сегодня международных и национальных стандартов [1-5].

Выводы.

1. Описан разработанный и созданный в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" на основе емкостных накопителей энергии мощный высоковольтный генератор, формирующий на низкоомной активно-индуктивной нагрузке апериодические импульсы тока искусственной молнии временной формы 10 мкс/350 мкс и амплитуды $\pm(100-200)$ кА с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 допусками.

2. Проведенная практическая апробация в октябре 2014 г. генератора ГИТМ-10/350 показала, что данный мощный генератор при рабочем зарядном напряжении 171 конденсатора типа ИК-50-3 трех отдельных генераторов ГИТ-1–ГИТ-3 уровнем $U_{C1-3} = -15$ кВ и рабочем зарядном напряжении 288 конденсаторов типа ИМ2-5-140 четвертого генератора ГИТ-4 уровнем $U_{C4} = -2,25$ кВ позволяет в полевых условиях высоковольтной лаборатории обеспечить получение на электрической нагрузке с активным сопротивлением 0,1 Ом и индуктивностью 1,5 мкГн апериодических импульсов тока положительной (отрицательной) полярности имитированной молнии со временем достижения модуля их амплитуды I_m до 106 кА в $t_m \approx 24$ мкс, длительностью их фронта $\tau_f \approx 15$ мкс и длительностью на уровне $0,5 \cdot I_m$, составляющей $\tau_p \approx 340$ мкс. При этом в первом приближении интеграл действия экспериментально полученного согласно международного стандарта IEC 62305-1-2010 импульса тока искусственной молнии амплитудой $I_m \approx 106$ кА численно

составил $J_a \approx 3,03 \cdot 10^6$ А²·с, а протекший через вышеуказанную нагрузку электрический заряд – $q \approx 52,2$ Кл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. – Part 1: General principles".
2. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. – Part 2: Risk management".
3. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. – Part 3: Physical damage to structures and life hazard".
4. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. – Part 4: Electrical and electronic systems within structures".
5. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. "Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы". – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
6. Сухоруков С.А. Помехозащитные устройства ЗАО "ЭМСОТЕХ". – Калуга: 2014. – 72 с.
7. Баранов М.И., Колюшко Г.М., Кравченко В.И. Недельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85.
8. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ США "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока", 1985. – С. 1-56.
9. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ США "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов", 2005. – С. 1-145.
10. MIL-STD-464A. Военный стандарт США "Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем". – Изд-во Минобороны, 2002. – С. 1-162.
11. КТ-ВВФ/DO-160D. Квалификационные требования РФ "Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний". – М.: Госстандарт РФ, 2004. – С. 1-273.
12. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
13. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
14. 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.

REFERENCES

1. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. Part 1: General principles".
2. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. Part 2: Risk management".
3. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard".
4. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures".
5. *Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii GOST R MEK 62305-1-2010. "Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy"* [National Standard of the Russian Federation GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).
6. Suhorukov S.A. *Pomehozashhitnye ustrojstva ZAO "EMSOTEH"* [Hindrance protective devices of CCA "EMSOTEH"]. Kaluga, 2014. 72 p. (Rus).

7. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskyi O.S., Dnyschenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of technical objects. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*, 2008, no.3, pp. 81-85. (Rus).
8. SAE ARP 5412/ED-84. *Normativnyj dokument SShA "Rekomenduemaja praktika aviacionno-kosmicheskikh rabot. Idealizirovannye sostavljajushhie vneshnego toka"* [SAE ARP 5412/ED-84. USA regulatory document "Recommended practice aerospace work. Idealized components of the external current"]. 1985, pp. 1-56. (Rus).
9. SAE ARP 5416/ED-84. *Normativnyj dokument SShA "Rekomenduemaja praktika aviacionno-kosmicheskikh rabot. Uslovija vozdejstvija molnii na letatel'nye apparaty i sootvetstvujushhie formy ispytatel'nyh signalov"* [USA regulatory document "Recommended practice aerospace work. Terms of action of lightning on aircraft and corresponding-shaped test signals"]. 2005, pp. 1-145. (Rus).
10. MIL-STD-464A. *Voennyj standart SShA. "Elektromagnitnye i ekologicheskie efekty vozdejstvija molnii. Trebovanija interfejsa i kriterii proverki sistem"* [USA military standard. Electromagnetic and ecological effects of lightning. Requirements interface and testing criteria systems]. Ministry of Defense Publ., 2002, pp. 1-162. (Rus).
11. KT-VVF/DO-160D. *Kvalifikacionnye trebovanija RF "Uslovija ekspluatcii i okruzhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. Trebovanija, normy i metody ispytaniij"* [Qualification requirements of the Russian Federation. "Terms of exploitations and environments for a side aviation equipment. Requirements, standards and test methods"]. Moscow, Gosstandart RF Publ., 2004, pp. 1-273. (Rus).
12. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskij M.N. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Spravochnik* [The electrical capacitors and condenser options. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 656 p. (Rus).
13. 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).
14. 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).

Поступила (received) 21.11.2014

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., с.н.с.,
Колушко Георгий Михайлович¹, к.т.н., с.н.с.,
Кравченко Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,
¹НИПКИ "Молния",

Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua
²Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, G.M. Koliushko¹, V.I. Kravchenko¹, S.V. Rudakov²
¹Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya",
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

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

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.

Created in accordance with the requirements of international standard of IEC 62305-1-2010 powerful high-voltage generator, forming on the low-resistance actively-inductive loading the aperiodic impulses of current of artificial lightning of the rationed temporal form 10 μs/350 μs and amplitudes of ±(100–200) kA with a foregoing standard by admittances set is presented and described. The results of practical approbation in the laboratory terms of this generator at the in-use electric loading with active resistance of 0.1 Ohm and inductance of 1,5 μH are presented. References 14, figures 8.

Key words: generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning, powerful capacity store of energy, low-resistance electric loading.

РАСЧЁТ ПОЛЕЙ И ТОКОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВИТКОМ КАК ИНСТРУМЕНТА РИХТОВКИ

В идеалізації "гранично низьких" частот діючих полів отримані розрахункові залежності для щільності індуктованих струмів і розподіленої сили тяжіння в індукторній системі з притягуючим екраном і зовнішнім додатковим витком, що дозволяють провести оцінки характеристик протікаючих електродинамічних процесів і дати рекомендації з проектування реальних інструментів для магнітно-імпульсного притягування немагнітних тонкостінних листових металів. Бібл. 16, рис. 1.

Ключові слова: індукторна система, електромагнітний процес, індуктор, притягуючий екран, додатковий виток.

В идеализации "предельно низких" частот действующих полей получены расчётные зависимости для плотности индуцированных токов и распределенной силы притяжения в индукторной системе с притягивающим экраном и внешним дополнительным витком, позволяющие провести оценки характеристик протекающих электродинамических процессов и дать рекомендации по проектированию реальных инструментов для магнитно-импульсного притяжения немагнитных тонкостенных листовых металлов. Библ. 16, рис. 1.

Ключевые слова: индукторная система, электромагнитный процесс, индуктор, притягивающий экран, дополнительный виток.

Постановка проблеми. Магнітно-імпульсна обробка металів (МІОМ) відноситься до числа інтенсивно розвиваючихся прогресивних технологій промислового виробництва изделий різної номенклатури. Більшість інструментів (так називаються індукторні системи в аббревіатурі – ІС), використовуються в сучасній техніці МІОМ, доволно прості конструктивно [1-3]. Простота конструкцій влечет за собою неіснєвние недолатки, зв'язані, як правило, з неоднорідним розподілом поля і, відповідно, возбуждаемого силового впливу на обробляемий об'єкт [4-6]. Таким образом, возникает необходимость создания ИС с высокой однородностью возбуждаемого поля и сил в рабочей зоне инструмента МІОМ.

Аналіз основних досягнень і публікацій. Одним из решений по повышению эффективности инструментов магнитно-импульсной технологии является введение в конструкцию индукторной системы вспомогательного притягивающего экрана, в связи с чем, инструменты такого типа получили название "индукторные системы с притягивающими экранами" (в аббревіатурі – ІСПЭ). Принцип действия таких систем основан на законе Ампера, а именно, притяжении объекта обработки к экрану за счет силового взаимодействия однонаправленных индуцированных токов [7]. Расчетам распределения токов, возбуждаемых в металле заготовки и притягивающего экрана, а также сил притяжения между ними, посвящены работы [8-10]. Их результаты инициировали введение дополнительного витка в конструкцию ІСПЭ, что, исходя из априорных физических соображений, должно повысить эффективность инструмента магнитно-импульсного силового воздействия в целом.

Цель работы – получение расчётных аналитических зависимостей для токов, индуцированных в металле листовой заготовки и притягивающего экрана, а также формул для распределенной силы притяжения в индукторной системе с притягивающим экраном и внешним дополнительным витком.

Расчётная модель исследуемой ІСПЭ в цилиндрической системе координат приведена на рис. 1.

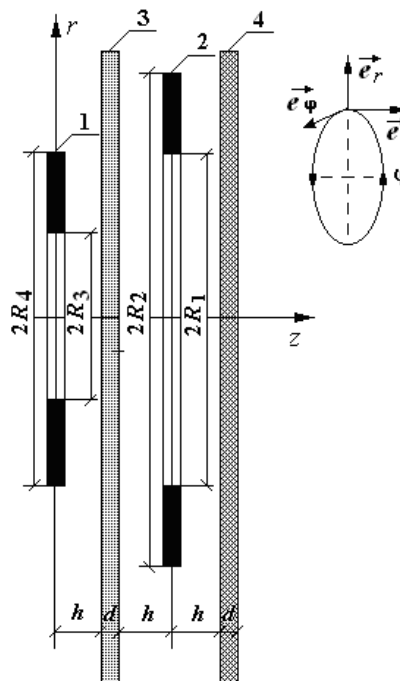


Рис. 1. Расчётная модель в цилиндрической системе координат: 1 – дополнительный виток индуктора; 2 – основной виток индуктора; 3 – экран; 4 – заготовка; R_1, R_3 и R_2, R_4 – внутренние и внешние радиусы соответственно; d и h – расстояние от основного витка индуктора до экрана и заготовки и от дополнительного витка до экрана; $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – направляющие орты

При решении примем следующие допущения.

- Плоские витки индуктора имеют цилиндрическую форму, их толщина пренебрежимо мала, так что они не оказывают никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы.
- Экран и заготовка есть одинаковые листовые металлы с довольно большими поперечными размерами,

достаточно малой толщиной – d , электропроводностью – γ и абсолютной магнитной проницаемостью – $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ (μ_r – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума), они расположены на одинаковом расстоянии от основного витка индуктора – h , расстояние от дополнительного витка до вспомогательного экрана также равно h .

• Аксиальная симметрия ($\partial/\partial\varphi=0$, φ – азимутальный угол) имеет место.

• Амплитудно-временные параметры тока в витках индуктора таковы, что справедливо квазистационарное приближение по Ландау [11]: $\omega/lc \ll 1$, где ω – циклическая частота, c – скорость света в вакууме, l – характерный размер системы.

Интегрирование уравнений Максвелла, общие решения. Уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ($E_\varphi \neq 0$, $H_{r,z} \neq 0$), преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [2, 4, 12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p,r,z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p,r,z)}{\partial r} = j_\varphi(p,r,z); & (1) \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p,r,z)) = -\mu_c \cdot p \cdot H_z(p,r,z); & (2) \\ \frac{\partial E_\varphi(p,r,z)}{\partial z} = \mu_c \cdot p \cdot H_r(p,r,z); & (3) \end{cases}$$

где p – параметр интегрального преобразования Лапласа, μ_c – абсолютная магнитная проницаемость среды, $E_\varphi(p,r,z) = L\{E_\varphi(t,r,z)\}$, $H_{r,z}(p,r,z) = L\{H_{r,z}(t,r,z)\}$, $j_\varphi(p,r,z) = L\{j_\varphi(t,r,z)\}$.

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде:

$$j_\varphi(p,r,z) = (p \cdot \varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p,r,z) + j_{\varphi 1,2}^{(i)}(p,r,z), \quad (4)$$

где $j_{\varphi 1,2}^{(i)}(p,r,z)$ – плотности сторонних токов в витках индуктора,

$$j_{\varphi 1}^{(i)}(p,r,z) = j_1(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z),$$

$$j_{\varphi 2}^{(i)}(p,r,z) = j_2(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z - (2h + d)),$$

$f(r)$ и $j_{1,2}(p)$ – функция радиального распределения и L – изображения плотностей тока в витках индуктора 1 и 2, соответственно, $\delta(z)$ – дельта-функция Дирака, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

При решении поставленной задачи в принятой модели следует выделить области с однородными электрофизическими характеристиками:

а) свободное полупространство с внешней стороны вспомогательного экрана, $z \in (-\infty; h]$;

б) область металла экрана, $z \in [h; (h+d)]$;

в) пространство между экраном и заготовкой, $z \in [(h+d); (3h+d)]$;

г) область металла заготовки, $z \in [(3h+d); (3h+2d)]$;

д) свободное полупространство с внешней стороны заготовки, $z \in [(3h+2d); \infty]$.

Из дифференциальных уравнений (1–3) с учётом выражения (4) в рамках принятых допущений

(пренебрегая токами смещения) получим уравнения для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля $E_\varphi(p,r,z)$ в выделенных областях.

В свободном полупространстве с внешней стороны вспомогательного экрана, $z \in (-\infty; h]$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_\varphi^{(1)}(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi^{(1)}(p,r,z)) \right) = & (5) \\ = \mu_0 \cdot p \cdot j_{\varphi 1}^{(i)}(p,r,z). \end{aligned}$$

В металле вспомогательного экрана $z \in [h; (h+d)]$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_\varphi^{(2)}(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi^{(2)}(p,r,z)) \right) - & (6) \\ - (p \cdot \gamma \cdot \mu) \cdot E_\varphi^{(2)}(p,r,z) = 0 \end{aligned}$$

В пространстве между металлическими листами $z \in [(h+d); (3h+d)]$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_\varphi^{(3)}(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi^{(3)}(p,r,z)) \right) = & (7) \\ = \mu_0 \cdot p \cdot j_{\varphi 1}^{(i)}(p,r,z) \end{aligned}$$

В металле листовой заготовки $z \in [(3h+d); (3h+2d)]$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_\varphi^{(4)}(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi^{(4)}(p,r,z)) \right) - & (8) \\ - (p \cdot \gamma \cdot \mu) \cdot E_\varphi^{(4)}(p,r,z) = 0 \end{aligned}$$

Вне системы, $z \in [(3h+2d); \infty)$:

$$\frac{\partial^2 E_\varphi^{(5)}(p,r,z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi^{(5)}(p,r,z)) \right) = 0. \quad (9)$$

Условию ограниченности радиального распределения $E_\varphi(p,r,z)$ из уравнений (5–9) при $r=0$ и $r=\infty$ удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [2, 13]:

$$E_\varphi(p,r,z) = \int_0^\infty E_\varphi(p,\lambda,z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (10)$$

где $J_1(\lambda \cdot r)$ – функция Бесселя первого порядка, λ – параметр интегрального преобразования.

В соответствии с (10) уравнения (5–9) приводятся к обыкновенным линейным дифференциальным уравнениям второго порядка относительно образа – $E_\varphi(p,\lambda,z)$.

В полупространстве с внешней стороны вспомогательного экрана, $z \in (-\infty; h]$:

$$\frac{d^2 E_\varphi^{(1)}(p,\lambda,z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_\varphi^{(1)}(p,\lambda,z) = K_1(p,\lambda) \cdot \delta(z), \quad (11)$$

где

$$K_1(p,\lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j_1(p) \cdot f_1(\lambda);$$

$$f_1(\lambda) = \int_0^\infty f(r) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot r \cdot dr.$$

В металле вспомогательного экрана $z \in [h; (h+d)]$:

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = 0, \quad (12)$$

где $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p\mu\gamma}$ – величина, имеющая смысл продольного волнового числа в металле с удельной электропроводностью γ и магнитной проницаемостью μ [11].

В пространстве между экраном и заготовкой $z \in [(h+d); (3h+d)]$:

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z) = K_2(p, \lambda) \cdot \delta(z - (2h+d)) \quad (13)$$

где

$$K_2(p, \lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j_2(p) \cdot f_2(\lambda);$$

$$f_2(\lambda) = \int_0^{\infty} f(r) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot r \cdot dr.$$

В металле листовой заготовки $z \in [(3h+d); (3h+2d)]$:

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(4)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_{\varphi}^{(4)}(p, \lambda, z) = 0, \quad (14)$$

Вне системы, $z \in [(3h+2d); \infty)$:

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(5)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}^{(5)}(p, \lambda, z) = 0. \quad (15)$$

Общие интегралы уравнений (9), (11 – 15) для выделенных областей представляются линейными комбинациями фундаментальных решений [13].

В полупространстве с внешней стороны вспомогательного экрана, $z \in (-\infty; h]$, условию ограниченности при $z \rightarrow -\infty$ удовлетворяет функция:

$$E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = A(p, \lambda) e^{\lambda(z-h)} + \frac{K_1(p, \lambda)}{\lambda} \eta(z) \text{sh}(\lambda z), \quad (16)$$

где $A(p, \lambda)$ – произвольная постоянная интегрирования; $\eta(z)$ – ступенчатая функция Хевисайда.

В металле вспомогательного экрана, $z \in [h; (h+d)]$:

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = B_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)(z-h)} + B_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda)(z-h)}, \quad (17)$$

где $B_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования.

В пространстве между экраном и заготовкой, $z \in [(h+d); (3h+d)]$:

$$E_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z) = C_1(p, \lambda) e^{\lambda(z-(h+d))} + C_2(p, \lambda) e^{-\lambda(z-(h+d))} + \frac{K_2(p, \lambda)}{\lambda} \eta(z - (2h+d)) \text{sh}(\lambda(z - (2h+d))), \quad (18)$$

где $C_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования.

В металле заготовки, $z \in [(3h+d); (3h+2d)]$:

$$E_{\varphi}^{(4)}(p, \lambda, z) = D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)(z-(3h+d))} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda)(z-(3h+d))}, \quad (19)$$

где $D_{1,2}(p, \lambda)$ – произвольные постоянные интегрирования.

В пространстве вне системы, $z \in [(3h+2d); \infty)$, условию ограниченности при $z \rightarrow \infty$ удовлетворяет функция:

$$E_{\varphi}^{(5)}(p, \lambda, z) = G(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda(z-(3h+2d))}, \quad (20)$$

где $G(p, \lambda)$ – произвольная постоянная интегрирования.

С помощью уравнения (3) и выражений (16 – 20) находим тангенциальную компоненту напряжённости магнитного поля.

В полупространстве с внешней стороны вспомогательного экрана, $z \in (-\infty; h]$:

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \times \left(A(p, \lambda) e^{\lambda(z-h)} + \frac{K_1(p, \lambda)}{\lambda} \eta(z) \text{ch}(\lambda z) \right) \quad (21)$$

В металле вспомогательного экрана, $z \in [h; (h+d)]$:

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p \cdot \mu} \times \left(B_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)(z-h)} - B_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda)(z-h)} \right) \quad (22)$$

В пространстве между экраном и заготовкой, $z \in [(h+d); (3h+d)]$:

$$H_r^{(3)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \times \left(C_1(p, \lambda) e^{\lambda(z-(h+d))} - C_2(p, \lambda) e^{-\lambda(z-(h+d))} + \frac{K_2(p, \lambda)}{\lambda} \eta(z - (2h+d)) \text{ch}(\lambda(z - (2h+d))) \right) \quad (23)$$

В металле заготовки, $z \in [(3h+d); (3h+2d)]$:

$$H_r^{(4)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p \cdot \mu} \times \left(D_1(p, \lambda) e^{q(p, \lambda)(z-(3h+d))} - D_2(p, \lambda) e^{-q(p, \lambda)(z-(3h+d))} \right) \quad (24)$$

В пространстве вне системы, $z \in [(3h+2d); \infty)$:

$$H_r^{(5)}(p, \lambda, z) = -\frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot G(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda(z-(3h+2d))}. \quad (25)$$

Из условия непрерывности касательных компонент вектора напряжённости электромагнитного поля на границах выделенных областей получаем системы алгебраических уравнений для определения неизвестных произвольных постоянных интегрирования в выражениях для интегральных образов E_{φ} и H_r .

Полученные системы линейных алгебраических уравнений не приводим, ввиду их громоздкости. Отметим, что они являются определёнными и позволяют получить единственные решения поставленной электродинамической задачи для произвольных временных зависимостей полей и токов в рассматриваемой "индукторной системе с притягивающим экраном" [13, 14].

Для практики, в первую очередь, представляет интерес, так называемый, низкочастотный режим, когда экран и листовая заготовка являются "прозрачными" для действующих полей [2, 4, 6, 12].

Низкочастотный режим действующих полей. Низкочастотный режим есть некоторая идеализация, предполагающая интенсивные процессы проникновения сквозь металлические элементы в

системе. Условием его реализации является выполнение неравенства:

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (26)$$

где ω – круговая частота возбуждающего сигнала, $\tau = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$ – введено автором работы [15] и названо характерным временем диффузии поля в магнитный проводящий слой с удельной электропроводностью γ и относительной магнитной проницаемостью μ_r .

Следует подчеркнуть практическую полезность данной идеализации, несмотря на невозможность её абсолютно строгого осуществления. Она позволяет получить простые соотношения для характеристик электродинамических процессов и установить ориентиры, к которым следует стремиться при создании реальных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения металлов.

Выполнение неравенства (26) допускает упрощение зависимости для продольного волнового числа в металле – $q(p, \lambda)$:

$$|p \cdot \mu_r \cdot \gamma| \ll \lambda^2 \Rightarrow q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \cdot \mu_r \cdot \gamma} \approx \lambda^2. \quad (27)$$

Поставленную задачу можно существенно упростить с математической точки зрения, если обратиться к варианту, когда экран и листовая заготовка выполнены из немагнитных металлов. Для практики этот случай представляет интерес, если речь идёт о деформировании притяжением, например, нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и др. Пренебрежение магнитными свойствами обрабатываемых объектов означает, что полученные оценки будут соответствовать минимальным значениям усилий, возбуждаемых в системе.

Расчётные соотношения для токов и сил.

В алгебраических системах уравнений для неизвестных постоянных интегрирования следует положить, что $\mu_r = 1$.

В конечном итоге получим:

• $z = h$:

$$\begin{cases} A(p, \lambda) + \frac{K_1(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \text{sh}(\lambda h) = B_1(p, \lambda) + B_2(p, \lambda); \\ A(p, \lambda) + \frac{K_1(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \text{ch}(\lambda h) = B_1(p, \lambda) - B_2(p, \lambda). \end{cases} \quad (28)$$

• $z = (h+d)$:

$$\begin{cases} B_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda \cdot d} + B_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot d} = C_1(p, \lambda) + C_2(p, \lambda); \\ B_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda \cdot d} - B_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot d} = C_1(p, \lambda) - C_2(p, \lambda). \end{cases} \quad (29)$$

• $z = (3h+d)$:

$$\begin{cases} C_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda \cdot 2h} + C_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot 2h} + \frac{K_2(p, \lambda)}{\lambda} \text{sh}(\lambda h) = \\ = D_1(p, \lambda) + D_2(p, \lambda); \\ C_1(p, \lambda) e^{\lambda \cdot 2h} - C_2(p, \lambda) e^{-\lambda \cdot 2h} + \frac{K_2(p, \lambda)}{\lambda} \text{ch}(\lambda h) = \\ = D_1(p, \lambda) - D_2(p, \lambda). \end{cases} \quad (30)$$

• $z = (3h+2d)$:

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda \cdot d} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot d} = G(p, \lambda); \\ D_1(p, \lambda) \cdot e^{\lambda \cdot d} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot d} = -G(p, \lambda). \end{cases} \quad (31)$$

В дальнейшем нас будут интересовать поля и токи в металле экрана и листовой заготовки. Поэтому

ограничимся нахождением лишь неизвестных $B_{1,2}(p, \lambda)$ и $D_{1,2}(p, \lambda)$:

$$\begin{cases} B_1(p, \lambda) = -\frac{K_2(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot e^{-\lambda(h+d)}; \\ B_2(p, \lambda) = -\frac{K_1(p, \lambda)}{2\lambda} \cdot e^{-\lambda h}. \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda) = 0; \\ D_2(p, \lambda) = -\frac{1}{2\lambda} (K_1(p, \lambda) e^{-\lambda(3h+d)} + K_2(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}) \end{cases} \quad (33)$$

Зависимость (32) подставим в выражение (17). Получим формулу для образа напряжённости электрического поля в металле вспомогательного экрана. Найденный результат помножим на удельную электропроводность его металла – γ и проинтегрируем по пространственной переменной $\zeta = (z-h)$; $\zeta \in [0; d]$ связанной непосредственно с толщиной экрана.

Выполнив необходимые обратные интегральные преобразования и раскрыв величины $K_{1,2}(p, \lambda)$, придём к аналитическому выражению для линейной плотности тока, возбуждаемого в металле экрана витками индуктора. Кроме того, для определённости положим, что радиальные распределения токов в витках – равномерные, а их временные зависимости одинаковы.

$$J_{\Phi}^{(2)}(t, r) = -\frac{\tau}{(2d^2)} \times \int_0^{\infty} \left(\frac{dj_1(t)}{dt} \cdot f_1(\lambda) + \frac{dj_2(t)}{dt} \cdot f_2(\lambda) \right) \cdot \frac{e^{-\lambda h(1-e^{-\lambda d})}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda \quad (34)$$

где $j_1(t) = j_{1m} j(t)$ – плотность возбуждающего тока в первом индукторе, $j_2(t) = j_{2m} j(t)$ – плотность возбуждающего тока в первом индукторе, $j_{1,2m}$ – амплитудные значения, $j(t)$ – временная зависимость,

$$f_1(\lambda) = \int_{R_3}^{R_4} r \cdot J_1(\lambda r) dr, \quad f_2(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr.$$

Аналогичным образом, после подстановки (33) в (19) и выполнения необходимых математических преобразований с теми же обозначениями, что в (34) находим линейную плотность тока в металле листовой заготовки.

$$J_{\Phi}^{(3)}(t, r) = -\frac{\tau}{(2d^2)} \times \int_0^{\infty} \left(\frac{dj_1(t)}{dt} f_1(\lambda) e^{-\lambda(3h+d)} + \frac{dj_2(t)}{dt} f_2(\lambda) e^{-\lambda h} \right) \times \frac{(1-e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (35)$$

Если витки одинаковы и расположены строго друг над другом, тогда $f_1(\lambda) = f_2(\lambda) = f(\lambda)$. Пусть в них протекают одинаковые токи, то есть, $j_1(t) = j_2(t) = j_m g(t)$, j_m – амплитуда, $g(t)$ – временная зависимость.

В принятых условиях выражения (34) и (35) принимают вид:

а) в экране:

$$J_{\phi}^{(3)}(t, r) = - \left(2j_m \frac{dg(t)}{dt} \right) \frac{\tau}{(2d^2)} \times \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) e^{-\lambda h} (1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (36)$$

б) в листовой заготовке:

$$J_{\phi}^{(3)}(t, r) = - \left(j_m \cdot \frac{dg(t)}{dt} \right) \frac{\tau}{(2d^2)} \times \int_0^{\infty} \left(e^{-\lambda(2h+d)} + 1 \right) \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} (1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (37)$$

Согласно известным зависимостям, приведенным в классических литературных источниках [11, 16], можно записать формулу для вычисления распределённой силы притяжения, которая при жёстко фиксированном экране будет притягивать листовую заготовку к рабочей поверхности витка внутреннего индуктора.

$$F_{attr}(t, r) = \mu_0 \cdot J_{\phi}^{(3)}(t, r) \cdot J_{\phi}^{(3)}(t, r) \cdot \frac{r}{(2h)}, \quad (38)$$

где $J_{\phi}^{(3)}(t, r)$, $J_{\phi}^{(3)}(t, r)$ – определены зависимостями (34) и (35), соответственно.

Фактически, в принятой постановке решаемой задачи на обрабатываемый объект будет действовать только сила притяжения. Интегральная во времени действительность сил иного плана (отталкивание и радиальное растяжение-сжатие), обусловленных взаимодействием возбуждающих и индуцированных токов, будет крайне малой и ими в рамках принятой идеализации можно пренебречь [2, 4, 6].

При $j_{2m} \approx 0$ (отсутствует виток с током внутри системы), как следует из выражений (34) и (35), между экраном и заготовкой должны иметь место силы притяжения, определяемые произведением индуцированных токов. Величина каждого из них устанавливается лишь удалённостью от источника возбуждения.

Полученные аналитические выражения для токов, индуцированных в металле экрана и заготовки, а также распределённой силы притяжения позволят провести численные оценки процессов в перспективных конструкциях ИСПЭ.

Результирующие токи, как в экране, так и заготовке, однонаправлены и определяются линейной комбинацией индуцированных токов – алгебраических слагаемых, каждое из которых обусловлено вкладом тока, протекающего в соответствующем витке индуктора.

Пренебрежение магнитными свойствами обрабатываемых объектов при получении расчетных зависимостей означает, что полученные оценки будут соответствовать минимальным значениям усилий, возбуждаемых в системе, а значит, применение полученных формул для магнитных металлов должно повысить эффективность силового воздействия.

Выводы.

1. Проведен расчёт характеристик электродинамических процессов в индукторной системе с притяги-

вающим экраном и дополнительным витком – инструменте магнитно-импульсного притяжения немагнитных тонкостенных листовых металлов.

2. В идеализации "предельно низких" частот действующих полей получены аналитические выражения для возбуждаемых токов и сил, позволяющие оценить уровень эффективности исследованной конструкции инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.1. под ред. проф. Батыгина Ю.В. [2-е изд.]. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
2. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
3. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.
4. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Цилиндрическая индукционная индукторная система для притяжения тонкостенных листовых металлов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №11 (47). – С. 109-117.
5. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Щиголева С.А. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора // Электричество. – 2011. – №4. – С. 55-62.
6. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида // Технічна електродинаміка. – 2010. – №1. – С. 9-14.
7. Пат. 70734 Україна, МПК В 21 D 26/14 Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Щіголева С.О., Чаплигін Є.О., Гопко А.В., Дробинін О.М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201114018; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
8. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Распределение напряженности магнитного поля в плоской индукторной системе с экраном // Вісник НТУ "ХПИ". – 2006. – №17. – С. 55-64.
9. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С. Расчет усилий в индукционной индукторной системе прямоугольной геометрии с ферромагнитным массивным экраном и заготовкой // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №3. – С. 61-64.
10. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с ферромагнитным массивным экраном и листовой заготовкой // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №4. – С. 56-59.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620с.
12. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Щиголева С.А. Направление сил, действующих на ферромагнетик, в зависимости от временных характеристик при МИОМ // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №3. – С. 56-61.
13. Мэтьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики / Пер. с англ. Крайнова В.П.. – М.: Атомиздат, 1972. – 399 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
15. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
16. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1968. – 939 с.

REFERENCES

1. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Himenko L.T. *Impul'snyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Tom 1* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.1]. Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 288 p. (Rus).
2. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impul'snyie magnitnyie polya dlya progressivnyih tehnologiy. Tom 3. Teoriia i eksperiment pritiazheniia tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi poliami* [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol.3. Theory and experiment of thin-walled metals attraction by the pulse magnetic fields]. Kharkov, KhNAHU Publ., 2009. 240 p. (Rus).
3. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov* [Directory of magnetic-pulse treatment of metals]. Kharkiv, Vishcha shkola Publ., 1977, 189 p. (Rus).
4. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Chaplygin E.A. Cylindrical induction inductor system for attraction of thin-walled sheet metal. *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2007, no.11(47), pp. 109-117. (Rus).
5. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Schigoleva S.A. The attraction of the thin-walled metal sheets by magnetic field of the single-turn inductor. *Elektrichestvo – Electricity*, 2011, no.4. pp. 55-62. (Rus).
6. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu. The forces acting on the thin conductor in penetrating the field of flat single-turn solenoid. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2010, no.1, pp. 9-14. (Rus).
7. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin Y.A., Gopko A.V., Shigoleva S.A., Drobinin A.M. *Sposib magnitno-impul'snogo prytjagannja metalevyh ob'ektiv dvovytkovoju krugovoju induktornoju systemoju z tonkym ekranom* [The method of magnetic-pulse attraction of metal objects by double-turn circular inductor system with a thin screen]. Patent UA, no.70734, 2012.
8. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu. The distribution of magnetic field strength in the flat inductor system with screen. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2006, no.17, pp. 55-64. (Rus).
9. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S. Calculation of forces in a rectangular-geometry induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a work-piece. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.3, pp. 61-64. (Rus).
10. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Calculation of electrodynamic forces in an induction inductor system with a non-ferromagnetic massive screen and a sheet work-piece. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.4, pp. 56-59. (Rus).
11. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodynamika sploshnyh sred* [Electrodynamics of the continuous medium]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 620 p. (Rus).
12. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Schigoleva S.A. Direction of force action on sheet ferromagnetic as function of time characteristics under electromagnetic forming. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.3, pp. 56-61. (Rus).
13. Matthews J., Walker R. *Matematicheskie metody fiziki* [Mathematical methods of physics]. Moscow, Atomizdat Publ., 1972, 399 p. (Rus).
14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Directory of a mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 831 p. (Rus).
15. Shneerson G.A. *Polya i perehodnye processy v apparature sverhsilnyh tokov* [Fields and transients in equipment ultra strong currents]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981, 200 p. (Rus).
16. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Directory of a physics]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 939 p. (Rus).

Поступила (received) 05.12.2014

Батыгин Юрий Викторович¹, д.т.н., проф.,
 Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доцент,
 Шиндерук Светлана Александровна¹, аспирант,
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный
 университет,
 61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
 тел/phone +38 057 7073653, e-mail: batygin48@mail.ru;
 chaplygin_e_a@mail.ru; svetlana11177@rambler.ru

Yu.V. Batygin¹, E.A. Chaplygin¹, S.A. Shinderuk¹
¹Kharkov National Automobile and Highway University,
 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening.

In the idealization of the "limiting low" frequencies of acting fields the calculated dependences for the density of the induced currents and distributed force of the attractive in the induction system with attractive screen and the external additional coil which allow to evaluate the characteristics of flowing electrodynamics processes and make recommendations for the design of the real tools for magnetic-pulse attractive of nonmagnetic thin-walled sheet metals are obtained. References 16, figure 1.

Key words: induction system, electromagnetic process, inductor, attractive screen, additional coil.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ІНДУКУВАННЯ "СТІЙКОГО" ПЛАЗМОВОГО КІЛЬЦЯ У ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ

Здійснено числові дослідження умов індукції "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі. Визначено вплив опору струмопровідного кільця на його перехід до "стійкого" стану. Виявлено залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля від кількості витків індуктора та початкової швидкості руху кільця. Обґрунтовано умови технічної реалізації електродинамічного прискорювача, за яких можливе утворення "стійкого" плазмового кільця. Бібл. 8, рис. 9.

Ключові слова: кульова блискавка, електродинамічний прискорювач, плазмове кільце.

Проведены численные исследования условий индукции "устойчивого" плазменного кольца в электродинамическом ускорителе. Определено влияние сопротивления токопроводящего кольца на его переход в "устойчивое" состояние. Выявлена зависимость коэффициента преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля от количества витков индуктора и начальной скорости движения кольца. Обоснованы условия технической реализации электродинамического ускорителя, при которых возможно образование "устойчивого" плазменного кольца. Библ. 8, рис. 9.

Ключевые слова: шаровая молния, электродинамический ускоритель, плазменное кольцо.

Вступ. Кульова блискавка як природне явище, що являє собою плазмове утворення, викликає значний науковий інтерес. При штучному утворенні просторового плазмового згустку з'являються можливості керування ним, зокрема прискорення в певному напрямку, що відкриває великі можливості в розвитку новітніх технологій.

Потенційно дослідження кульової блискавки може призвести до відкриття нового способу накопичення електромагнітної енергії, вирішення питання генерування "стійкої" плазми для ряду практичних задач. Тому науково-прикладна задача дослідження умов генерування "стійких" плазмових формувань та керування ними є актуальною.

Існує декілька гіпотез утворення кульової блискавки, які представлені математичними моделями [1-4]. Але відсутність кульових блискавок, що штучно створені у лабораторних умовах, не дозволяє надати перевагу тим, чи іншим моделям.

Відома гіпотеза устрою блискавки з фізико-математичним обґрунтуванням стійкості такого плазмового утворення [1-3], за якою кульова блискавка являє собою форму організованого руху електронів та іонів. При цьому, рух електронів відбувається у електронній оболонці, а позитивні іони зосереджені у ядрі блискавки. Перевірка даної гіпотези може бути здійснена шляхом індукції струму у газорозрядній плазмі за допомогою електродинамічного прискорювача.

Спробу здійснити таке індукції на дослідній установці зроблено в роботі [4]. Для цього здійснювалось накопичування електромагнітної енергії, після чого відбувався розряд потужного імпульсу струму в просторі, обмеженому об'ємним витком. Цей простір попередньо заповнювався гарячим повітрям та спектрально розчленованим світлом. При розряді утворювалась кульова блискавка у вигляді тороїдальної сфери. Але за результатами досліджень формування "стійкого" плазмового утворення не відбулося. Це може бути пов'язано з неузгодженням процесу прискорення. Тому дана робота направлена на обґрунтування умов індукції "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі.

В роботі [5] описано спосіб електродинамічного прискорення газоплазмового середовища. Для цього використовується детонаційна труба, яка заповнюється детонаційно-спроможною газовою сумішшю. В трубі відбувається переміщення ударної хвилі до секції прискорення. Потім відбувається розряд ємнісного накопичувача на електричне коло, утворене обмоткою електромагніта і розрядними елементами. При пробиванні міжелектродного проміжку в електричному колі протікає струм. У потоці газу в секції прискорення формується область з підвищеною провідністю у вигляді замкнутого контуру, на який діє магнітне поле обмотки електромагніта і відбувається прискорення ударної хвилі в газоплазмовому середовищі.

Але для реалізації зазначеного способу необхідна спеціальна детонаційно-спроможна газова суміш.

Моделювання процесу електродинамічного прискорення струмопровідного плазмового кільця. Умови індукції "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі визначено з наступних міркувань. Згідно з моделями [1-4], стійкість плазмового кільця забезпечується компенсуванням відцентрових сил, що виникають під час колективного руху електронів навколо шару іонів по колу, силами електричного поля. Колективний рух електронів у заданому напрямку характеризується електричним струмом. Струмопровідне кільце має власну індуктивність L . Відповідно, під час протікання струму i у струмопровідному плазмовому кільці відбувається накопичення енергії магнітного поля $0,5Li^2$. Таким чином, наявність енергії магнітного поля у струмопровідному кільці є першою умовою утворення "стійкого" просторового плазмового згустку.

Під час електродинамічного прискорення струмопровідного кільця в електродинамічному прискорювачі відбуваються процеси перетворення енергії імпульсного джерела, наприклад, ємнісного накопичувача енергії в магнітну, електричну, кінетичну та безповоротну – у теплову. Припинення процесу перерозподілу енергії між індуктором електродинамічного прискорювача та струмопровідним плазмовим кіль-

цем відбувається після зникнення електромагнітної взаємодії. При цьому, у струмопровідному кільці надалі продовжується лише процес перетворення накопиченої енергії магнітного поля у теплову енергію. Звідси, другою умовою утворення "стійкого" плазмового кільця є зникнення зовнішніх електромагнітних сил, що діють на струмопровідне кільце, після накопичення у ньому енергії магнітного поля.

Час "стійкості" утвореного плазмового кільця обмежується тривалістю процесу перетворення енергії магнітного поля у теплову енергію. Умови наявності рівноваги між відцентровими силами, що виникають під час колективного руху електронів по колу кільця, та силами електричного поля виходять за рамки задачі, що розглядається.

З урахуванням приведених вище обмежень, умови індукування "стійкого" плазмового кільця можливо визначити за математичною моделлю електродинамічного прискорення струмопровідного кільця у індукційному прискорювачі, що описана в роботах [6-8]. Область застосування моделі обмежується коаксіальною схемою розміщення індуктора електродинамічного прискорювача та струмопровідного кільця.

Перехідні електричні процеси у електродинамічному прискорювачі розраховувались за рівняннями:

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + C^{-1} \int i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + V(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz}(z) = U_0; \quad (1)$$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + V(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz}(z) = 0, \quad (2)$$

де індекс "1" відповідає контуру індуктора, індекс "2" – контуру струмопровідного кільця; R , L , C – активний опір, індуктивність та ємність, відповідно, $M_{12}(z) = M_{21}(z)$ – взаємна індуктивність між індуктором та струмопровідним кільцем; $i(t)$ – струм; $V(t)$ – швидкість руху струмопровідного кільця.

Електродинамічна сила між індуктором та струмопровідним кільцем визначається рівнянням:

$$f(t, z) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}. \quad (3)$$

Швидкість руху струмопровідного кільця визначалась рівнянням:

$$V = m_{\text{кіль}}^{-1} \int f(t, z) dt, \quad (4)$$

де $m_{\text{кіль}}$ – маса струмопровідного кільця.

Параметри електродинамічного прискорювача визначались виходячи зі схеми експерименту, що планується. Моделювання здійснено за розмірами індуктора: зовнішній діаметр – 8 см, внутрішній діаметр – 4 см, аксіальна висота – 0,6 см; струмопровідного кільця: зовнішній діаметр – 8 см, внутрішній діаметр – 6 см, аксіальна висота – 1 см. Розрахункова індуктивність струмопровідного кільця склала $L_{\text{кіль}} = 94,6$ нГн. Початкова відстань між геометричними центрами симетрії індуктора та кільця дорівнювала 1 см. Ємність накопичувача енергії $C = 16,2$ мкФ, напруга заряджання $U_0 = 20$ кВ. Відповідно, повна енергія розряду $Q = 3,24$ кДж.

Припустимо, що струмопровідне кільце утворюється з газорозрядної плазми, яка має провідність $100 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. За вище наведеними геометричними

розмірами струмопровідного кільця його опір дорівнює $R_{\text{кіль}} = 0,22$ Ом. Густина повітря, з якого створюється плазмове кільце, не перевищуватиме $1,29 \text{ кг/м}^3$. В розрахунковому варіанті маса кільця не перевищує $m_{\text{кіль}} = 28$ мг. Під час прискорення кільця виникає сила аеродинамічного опору. Урахування сили опору здійснено шляхом збільшення сили інерції через підвищення маси кільця.

Як параметри, що варіювалися в задачі, розглядалися кількість витків індуктора $w_{\text{інд}}$, що впливає на його активний опір $R_{\text{інд}}$ та індуктивність $L_{\text{інд}}$. Також, змінювалась початкова швидкість V_0 кільця.

В результаті розрахунку визначались: струм у контурах індуктора та кільця, залежності сили прискорення та швидкості руху кільця від часу прискорення. Також визначались кінетична енергія $Q_{\text{кін}}$, яку отримує струмопровідне кільце у результаті електродинамічного прискорення, та енергія $Q_{\text{маг}}$ магнітного поля, що накопичується у кільці після суттєвого послаблення сили електромагнітної взаємодії:

$$Q_{\text{маг}} = L_{\text{кіль}} \frac{I_{\infty}^2}{2}, \quad (4)$$

де I_{∞} – струм у кільці після суттєвого послаблення сили електромагнітної взаємодії. Енергія $Q_{\text{маг}}$ визначалась, коли сила f електродинамічного прискорення ставала меншою ніж $|f| < 1$ Н.

На рис. 1 показана схема електродинамічного прискорювача, де r – радіус плазмового кільця.

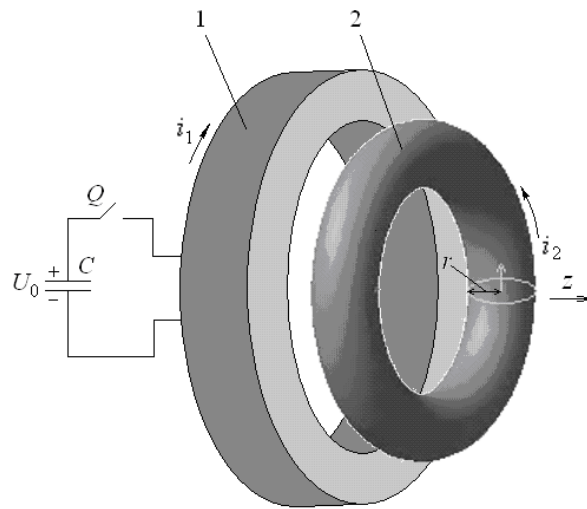


Рис. 1. Схема електродинамічного прискорювача: 1 – індуктор; 2 – струмопровідне плазмове кільце

Чисельні дослідження із застосуванням методу перебору показали, що у разі, коли опір струмопровідного кільця визначається провідністю газорозрядною плазми ($\sigma = 10 - 200 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$), накопичення енергії магнітного поля у кільці практично не відбувається. У варіанті електродинамічного прискорювача з $w_{\text{інд}} = 1$, $V_0 = 0$ м/с, $m_{\text{кіль}} = 28$ мг отримуємо розрахункові параметри $R_{\text{інд}} = 1$ мОм, $L_{\text{інд}} = 77$ нГн, та $R_{\text{кіль}} = 0,22$ Ом та електроmechanічні характеристики, що представлені на рис. 2 – 4).

З аналізу електродинамічної сили (рис. 3) маємо, що зникнення сили нижче $|f| < 1$ Н відбувається, коли час розрахунку перевищує $t > 80$ мкс. При $t > 80$ мкс відбувається накопичення кінетичної енергії у кільці,

що відображається у наявності його швидкості (рис. 4), але накопичення енергії магнітного поля практично не відбулося, що відображається у практично повному зникненні струму у кільці (рис. 2).

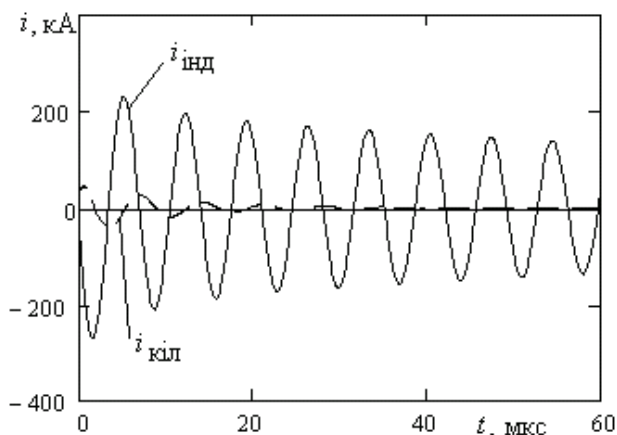


Рис. 2. Струми у колах індуктора $i_{\text{інд}}$ та струмопровідного кільця $i_{\text{кіль}}$ у розрахунковому варіанті прискорювача

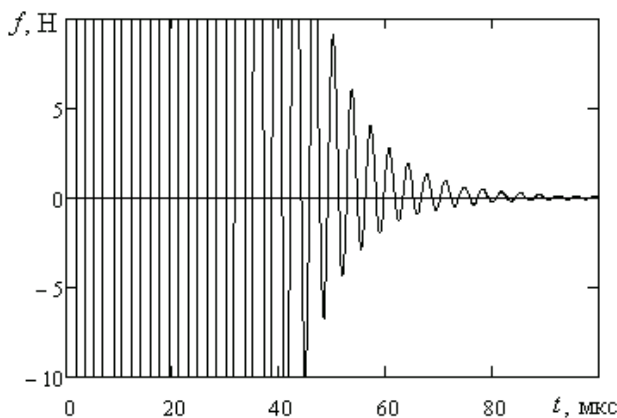


Рис. 3. Електродинамічна сила f прискорювача

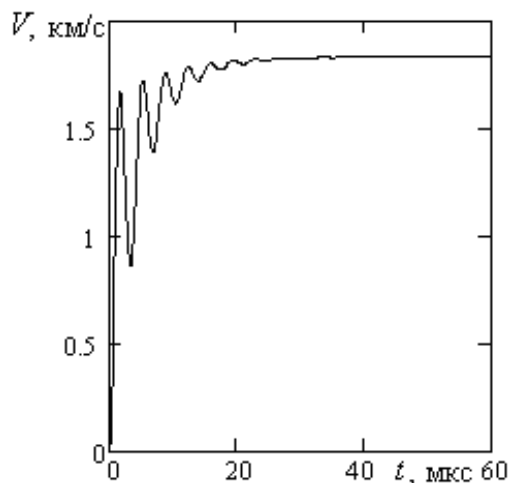


Рис. 4. Швидкість V струмопровідного кільця прискорювача

Згідно з роботою [1], у кульовій блискавці плазма переходить у надпровідний стан, тобто її активний опір відсутній. Тому проведені дослідження накопичення енергії магнітного поля у струмопровідного кільця при зменшенні його опору. За вищезазначеними параметрами, що приймалися у розрахунковому варіанті, окрім $R_{\text{кіль}}$, отримано залежність енергії магнітного поля $Q_{\text{маг}}$, що накопичується у кільці, від опору струмопровідного кільця (рис. 5).

Як витікає з розрахунків, енергія магнітного поля $Q_{\text{маг}}$, що накопичується у плазмовому кільці, збільшується при зменшенні його опору, особливо суттєво в діапазоні $R_{\text{кіль}} = 10^{-5} - 10^{-3}$ Ом. А при $R_{\text{кіль}} > 10^{-2}$ Ом зазначена енергія практично відсутня.

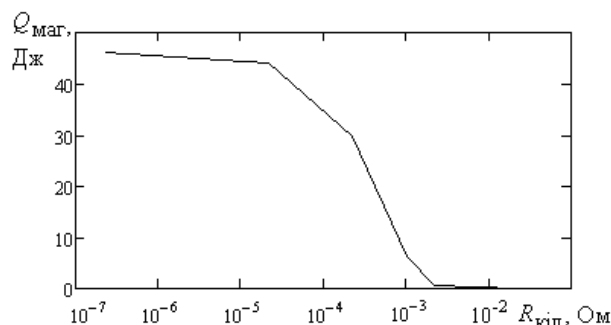


Рис. 5. Залежність енергії $Q_{\text{маг}}$ від опору струмопровідного кільця у розрахунковому варіанті

Виникнення "стійкого" плазмового кільця у розрахунковому варіанті підтверджується наявністю струму $i_{\text{кіль}}$ після послаблення електродинамічної сили (рис. 6).

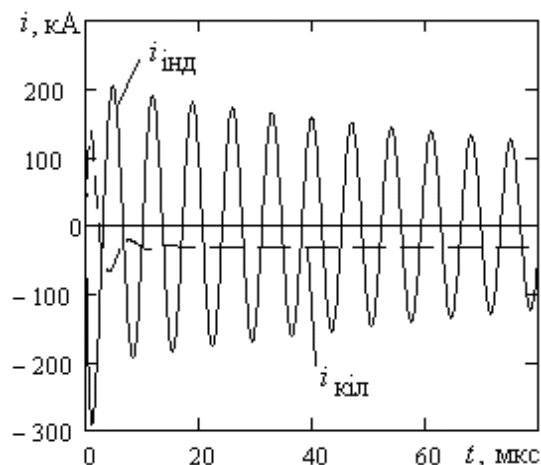


Рис. 6. Зміна струму у колах індуктора та кільця при $R_{\text{кіль}} = 22$ мкОм

За результатами розрахунку маємо, що зростання енергії магнітного поля у струмопровідному кільці відбувається за умови збільшення провідності плазми не менше, ніж на три порядки. Таким чином, електродинамічний прискорювач, що забезпечить прискорення та формування "стійкого" плазмового кільця, дозволить перевірити гіпотези щодо іон-електронної моделі кульової блискавки.

Слід зазначити, що виникають значні труднощі у практичному досягненні значень індуктивності та опору у колі індуктора, що визначені у розрахунковому варіанті ($R_{\text{інд}} = 1$ мОм, $L_{\text{інд}} = 77$ нГн). Такі обмеження викликані власною індуктивністю та опором ємнісного накопичувача енергії, наявністю індуктивності та опору у електричних дротах, що утворюють електричне коло індуктора.

Крім того, у задачі формування "стійкого" плазмового кільця ефективність електродинамічного прискорювача доцільно визначати не коефіцієнтом перетворення електричної енергії у кінетичну енергію, а коефіцієнтом перетворення електричної енергії у ене-

ргію магнітного поля. Зокрема, у розрахунковому варіанті у енергію магнітного поля перетворено лише $Q_{\text{маг}} = 44$ Дж, що відповідає $\eta_{\text{маг}} = 1,3\%$, а у кінетичну енергію $Q_{\text{кін}} = 1044$ Дж, що відповідає $\eta_{\text{кін}} = 44,2\%$.

Вирішення зазначеної проблеми досягається шляхом збільшення кількості витків індуктора. Числове дослідження залежності коефіцієнта $\eta_{\text{маг}}$ перетворення електричної в магнітну енергію від кількості витків індуктора наведено за розрахунковими параметрами прискорювача: $R_{\text{інд}} = 1$ мОм, $V_0 = 0$ м/с, $m_{\text{кіль}} = 28$ мг, $R_{\text{кіль}} = 22$ мкОм (рис. 7).

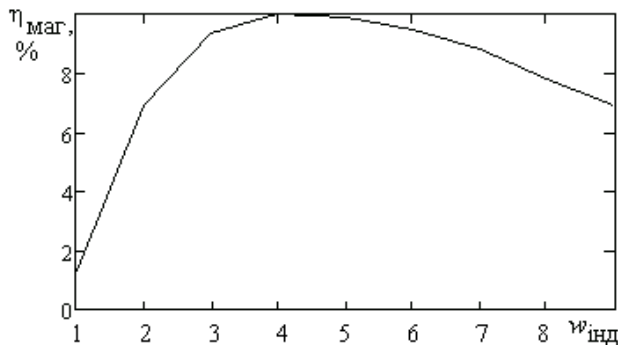


Рис. 7. Залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля від кількості витків індуктора

З аналізу результатів (рис. 7) маємо, що у розрахункових варіантах коефіцієнт перетворення електричної в магнітну енергію $\eta_{\text{маг}}$ набуває максимуму при кількості витків індуктора $w_{\text{інд}} = 4$, що відповідає індуктивності $L_{\text{інд}} = 1,2$ мкГн. За такої індуктивності індуктора забезпечується можливість технічної реалізації такого електродинамічного прискорювача. Слід також відзначити зниження струму у колі індуктора по відношенню до струму у струмопровідному кільці (рис. 8), що також сприяє індукванню "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі.

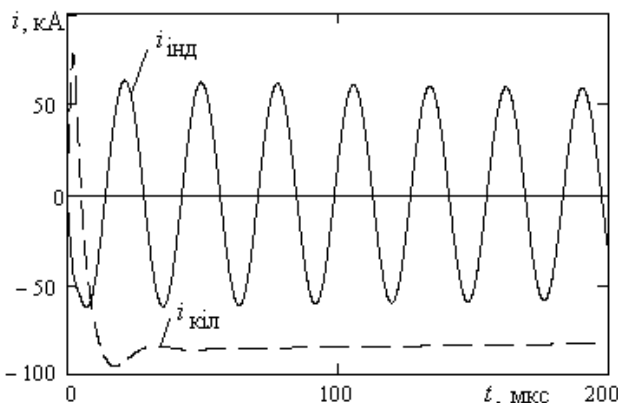


Рис. 8. Струм у колах індуктора $i_{\text{інд}}$ та струмопровідного кільця $i_{\text{кіль}}$ при $w_{\text{інд}} = 4$

При зростанні активного опору у колі індуктора $R_{\text{інд}}$ з 1 мОм до 10 мОм відбувається несуттєве зниження енергії магнітного поля $Q_{\text{маг}}$ з 309 Дж до 298 Дж. Подальше зростання опору кола індуктора до $R_{\text{інд}} = 100$ мОм призводить до прискореного зниження енергії магнітного поля $Q_{\text{маг}}$ до 228 Дж.

На ефективність перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля значний вплив має

аеродинамічний опір навколишнього середовища. Так, у разі зростання сили інерції (збільшення маси кільця з $m_{\text{кіль}} = 28$ мг до $m_{\text{кіль}} = 280$ мг) відбувається зниження енергії з $Q_{\text{маг}} = 228$ Дж до $Q_{\text{маг}} = 99$ Дж.

Вплив аеродинамічного опору може бути компенсований приданням початкової швидкості струмопровідному кільцю (рис. 9). Результати розрахунків наведено за параметрами електродинамічного прискорювача: $w_{\text{інд}} = 4$, $m_{\text{кіль}} = 280$ мг, що відповідає розрахунковим параметрам $R_{\text{інд}} = 10$ мОм, $L_{\text{інд}} = 1,2$ мкГн та $R_{\text{кіль}} = 22$ мкОм.

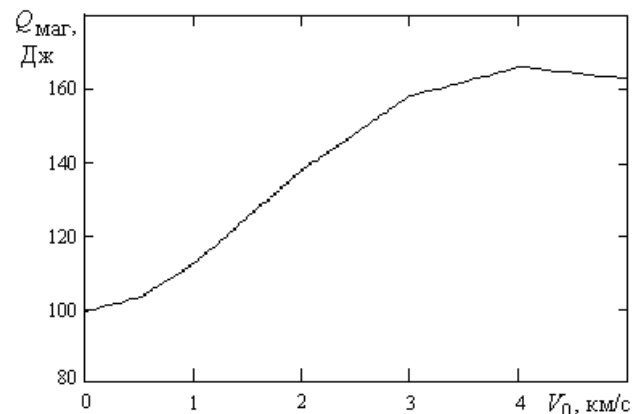


Рис. 9. Залежність енергії $Q_{\text{маг}}$ від початкової швидкості руху V_0 струмопровідного кільця

Таким чином, при збільшенні початкової швидкості струмопровідного плазмового кільця збільшується енергія магнітного поля, що в ньому накопичується. Найбільше збільшення магнітної енергії відбувається при початковій швидкості плазмового кільця близько 4 км/с для електродинамічного прискорювача з розрахунковими параметрами.

Висновки.

В результаті числових досліджень умов індукванню "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі визначено, що формування "стійкого" плазмового кільця можливе лише у разі переходу плазми у надпровідний стан.

Збільшення коефіцієнта перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля та створення умов для технічної реалізації такого перетворення досягається доведенням до оптимальних величин кількості витків індуктора та наданням початкової швидкості руху кільцю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеликин М.И. Сверхпроводимость плазмы и шаровая молния // Современная математика. Фундаментальные направления. – 2006. – Т. 19. – С. 45-69.
2. Федосин С.Г., Ким А.С. Шаровая молния: электронно-ионная модель // Наука и техника. – 2000. – №1. – С. 1-5.
3. Федосин С.Г., Ким А.С. Физическая теория шаровой молнии // Прикладная физика. – 2001. – №1. – С. 69-87.
4. Патент РФ, МПК Н 05 Н 1/00, G 09 В 23/18. Способ получения шаровой молнии / Ким А.С., Федосин С.Г. – № 2210195; Заявл. 09.04.2001; Опубл. 10.08.2003. – Бюл. № 22. – 6 с.
5. Пат. Україна. МПК Н 05 Н 1/02, F 02 К 99/00, Н 05 Н 11/00. Спосіб електродинамічного прискорення газоплазмового середовища і пристрій для його здійснення / Болюх

В.Ф., Довбня А.М., Стаховський О.В., Косою О.І., Коритченко К.В. – № 9123012; Заявл. 12.07.2011; Опубл. 10.10.2012. Бюл. №7. – 5 с.

6. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Х.: НТУ "ХПІ", 2006. – 258 с.

7. Болюх В.Ф., Кочерга А.Г., Коротченко К.В. Эффективность дополнительного ускорения движущихся массивных объектов электромеханическим индукционным преобразователем // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011. – №1. – С. 87-94.

8. Болюх В.Ф., Коротченко К.В., Кочерга А.Г. Индукционно-динамическое ускорение массивных объектов, обладающих начальной скоростью // Электротехника і електро-механіка. – 2010. – №6. – С. 8-12.

REFERENCES

1. Zelikin M.I. Superconductivity of plasma and fireball. *Sovremennaja matematika. Fundamental'nye napravlenija – Journal of Mathematical Sciences*, 2006, Vol.19, pp. 45-69. (Rus).

2. Fedosin S.G., Kim A.S. Fireball: electron-ion model. *Nauka i tehnika – Science & Technology*, 2000, no.1, pp. 1-5. (Rus).

3. Fedosin S.G., Kim A.S. Physical theory of fireball. *Prikladnaja fizika – Applied physics*, 2001, no.1, pp. 69-87. (Rus).

4. Kim A.S., Fedosin S.G. *Sposob poluchenija sharovoj molnii* [Method for formation of the fireball]. Patent RU, no.2210195, 2003.

5. Bolyukh V.F., Dovbnya A.M., Stakhovsky O.V., Kosoy A.I., Korytchenko K.V. *Sposib elektrodinamichnogo pryskorennja gazoplazmovogo seredovyshha i prystrij dlja jogo zdijsnennja* [Method of an electrodynamic acceleration of gas-plasma environment and a device for its implementation]. Patent UA, no.91230, 2010.

6. Bolyukh V.F. Dan'ko V.G. *Linijni elektromehanichni peretvorjuvachi impul'snoi' dii'* [Linear electromechanical pulsed accelerators]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2006, p. 258. (Ukr).

7. Bolyukh V.F., Kocherga A.G., Korytchenko K.V. Efficiency of additional acceleration of heave moving objects by electro-mechanical induction accelerator. *Integrovani tehnologii' ta energoberezhennja – Integrated technology and energy efficiency*, 2011, no.1, pp. 87-94. (Rus).

8. Bolyukh V.F., Korytchenko K.V., Kocherga A.G. Induction-dynamic acceleration of massive objects with initial velocity. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.6, pp. 8-12. (Rus).

Надійшла (received) 30.10.2014

Сакун Олександр Валерійович¹, к.б.н., с.н.с.,
Болюх Володимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Месенко Олександр Петрович²,
Коритченко Костянтин Володимирович¹, д.т.н., с.н.с.

¹ Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076816, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua,

² Управління державної охорони України,
01024, Київ, вул. Богомольця, 8,
тел/phone +38 044 2536659, e-mail: info@do.gov.ua

O.V. Sakun¹, V.F. Bolyukh¹, O.P. Mesenko², K.V. Korytchenko¹

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

² State Guard Department of Ukraine,
8, Bohomoltsia Str., Kyiv, 01024, Ukraine.

Conditions investigations of induction of the "steady" plasma ring in the electrodynamic accelerator.

The numerical investigation of conditions of the "steady" plasma ring induction in the electrodynamic accelerator was made. The influence of a ring resistance on transition of the ring to "steady" state was determined. The dependence of the coefficient of electrical energy conversion into magnetic field energy on the number of inductor turns and the initial velocity of the ring was found out. The technical requirements to the electrodynamic accelerator by which possible the formation of "steady" plasma ring was obtained. References 8, figures 9.

Key words: fireball, electrodynamic accelerator, plasma ring.

НЕКАНОНИЧЕСКОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ ТЯГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

В статті запропоновано адаптоване до систем електричного транспорту неканонічне розкладання випадкових процесів тягових напруг і струмів. Виконано чисельне представлення випадкової функції напруги на струмоприймачах електровозів ВЛ8 і ДЭ1. Бібл. 15, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: струм, напруга, випадкова функція, системи електричного транспорту, розкладання величини.

В статье предложено адаптированное к системам электрического транспорта неканоническое разложение случайных процессов тяговых напряжений и токов. Выполнено численное представление случайной функции напряжения на токоприемниках электровозов ВЛ8 и ДЭ1. Библ. 15, табл. 1 рис. 3.

Ключевые слова: ток, напряжение, случайная функция, системы электрического транспорта, разложение величины.

Введение. Электровозы, мотор-вагоны электропоездов и метрополитенов, а также трамваи и троллейбусы вместе с подсистемами тягового электрооборудования являются мощными системами различных видов электрического транспорта. Их силовые тяговые цепи, будучи несинусоидальными параметрическими, не могут быть проанализированы классическими методами теоретической электротехники. Необходимо разработка специфических подходов к анализу их функционирования.

Постановка задачи. Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитных процессов в устройствах систем электрического транспорта немислимы не только без знания, но и правильного оперирования и использования тяговых напряжений и токов в них. Сложность и трудоемкость таких исследований обусловлена тем, что и напряжения $U(t)$, и токи $I(t)$ в системах электротранспорта являются случайными процессами, причем нередко нестационарными, характеризующимися резкими непрерывными колебаниями во времени (рис. 1).

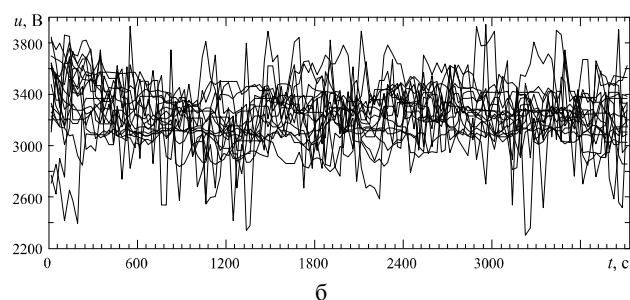
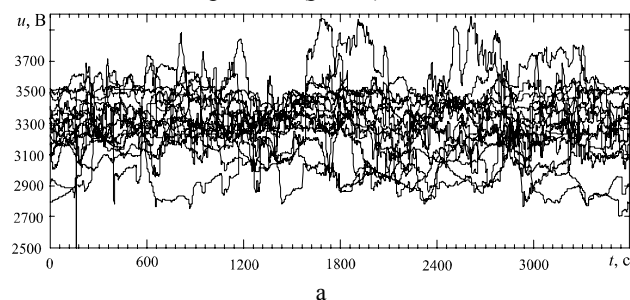


Рис. 1. Временные реализации напряжения на токоприемнике: а – электровозов ВЛ8; б – электровозов ДЭ1

И поэтому чаще всего расчеты осуществляют по средним или действующим значениям электрических величин, что, естественно, влечет за собой существенные ошибки в результатах исследований.

Особенно задача усложняется, если рассматриваются процессы в нелинейных устройствах и тем более переходные процессы, когда приходится формулировать задачу стохастическими интегро-дифференциальными уравнениями. В этой связи для получения результатов достаточной точности актуальной является задача разработки методов представления (разложения) случайных функций напряжения и тока.

Методы исследования. Как известно [1-3], любую случайную функцию $X(t)$ (в нашей задаче $U(t)$ или $I(t)$) можно рассматривать как некоторую абстрактную функцию, зависящую от двух переменных: времени t и индекса опыта z , т.е. $X(t) = x(t, z)$. При каждом фиксированном значении времени, т.е. при некотором t_k , выполняя "сечение" всех реализаций функции $X(t)$, получаем систему случайных величин, а при каждом фиксированном значении аргумента z получаем некоторую детерминированную функцию $x_c(t)$, называемую реализацией случайного процесса $X(t)$. Таким образом, представляется возможным рассматривать случайную функцию либо как множество случайных величин, либо как множество реализаций (детерминированных функций). Так как методы вычисления вероятностных характеристик случайных величин хорошо разработаны [3], то в настоящее время задача разложения случайных функций, как правило, решается путем их представления в форме детерминированных функций случайных величин. Основанием для такой замены является теорема, согласно которой для любой случайной функции $X(t)$, непрерывной в интервале (a, b) , справедливо разложение [4]:

$$X(t) = \bar{x}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} V_j \frac{\varphi_j(t)}{\sqrt{\lambda_j}}, \quad (1)$$

где V_j – взаимно некоррелированные случайные величины, обладающие нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; λ_j и $\varphi_j(t)$ – собственные числа и собственные функции интегрального уравнения:

$$\varphi_j(t) = \int_a^b K_x(t, \tau) \varphi(\tau) d\tau,$$

где K_x – корреляционная функция случайной функции $X(t)$.

В теории анализа точности нелинейных систем [1, 4-11] существует ряд методов, широко распространенных в практике и использующих представление (1). Это метод обобщенных рядов Фурье, метод Карунена, метод Котельникова, представления при помощи интерполяционных полиномов и др. Но наиболее распространены канонические разложения Пу-гачева [1]. Все эти методы обладают одним общим серьезным недостатком [7]: для достаточно точного представления случайной функции требуется использовать большое количество случайных величин, что, во-первых, затрудняет расчеты даже с помощью ЭВМ и, во-вторых, не дает возможности разработать простые, пригодные для практического использования, методы оценки погрешности расчетов даже в пределах корреляционной теории статистического анализа нелинейных систем [5, 9-11].

Более эффективным, по нашему мнению, является метод неканонических разложений, изложенный в [7, 8]. Его преимущество перед другими, упомянутыми выше, методами заключается в том, что количество случайных величин в разложении $X(t)$ не превышает трех. Согласно этому методу любую квазистационарную случайную функцию $X(t)$ можно представить абсолютно точно в пределах корреляционной теории в форме:

$$X(t) = m_x(t) + \lambda_1 \sin \omega t + \lambda_2 \cos \omega t, \quad (2)$$

где $m_x(t) = M[X(t)]$ – математическое ожидание этой случайной функции, величина считается известной; $\lambda_1, \lambda_2, \omega$ – независимые случайные величины с параметрами: $M[\lambda_1]=0; M[\lambda_2]=0; D[\lambda_1]=D[\lambda_2]=D_x$ (где D_x – дисперсия соответствующей функции $X(t)$).

Законы распределения λ_1 и λ_2 произвольны, а плотность распределения случайной величины ω определяется по найденной спектральной плотности $S_x(\omega)$ процесса $X(t)$ как:

$$f(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{D_x}. \quad (3)$$

В свою очередь, для определения $S_x(\omega)$ необходимо нахождение корреляционной функции $K_x(\tau)$ по полученным экспериментальным поляризациям $X(t)$, так как известно [1-4],

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (4)$$

Результаты численных расчетов разложения напряжения на токоприемниках электровозов. Используя изложенный метод и экспериментальные данные и практические расчетные подходы, приведенные в работах [12-15], построим разложения случайных процессов напряжения $U(t)$ на токоприемниках электровозов ВЛ8 и ДЭ1. Тогда, согласно (2), квазистационарные случайные процессы $U(t)$ (рис. 1) представим выражением:

$$U(t) = m_U(t) + \lambda_1 \sin \omega t + \lambda_2 \cos \omega t. \quad (5)$$

Вероятностные характеристики процесса $U(t)$, в том числе, математическое ожидание m_U и дисперсия D_U , для обоих электровозов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вероятностные характеристики		m_U , В	D_U , В ²	σ_U , В	A_S , от.ед.	E_x , от.ед.
Тип электровоза	ВЛ8	3288	44940	212	-0,28	0,01
	ДЭ1	3262	47090	217	-0,18	1,1

На рис. 2 приведены графики корреляционных функций $K_U(\tau)$ напряжений на токоприемниках электровозов, из которых, в частности, вытекает следующее:

1. Функция корреляции стремится к нулю с возрастанием τ , следовательно, квазистационарный случайный процесс напряжения $U(t)$ обладает эргодическим свойством;
2. Знакопеременный характер $K_U(\tau)$ свидетельствует о наличии в структуре процесса напряжения периодической составляющей;
3. Сравнительно медленное затухание колебаний корреляционной функции указывает на сохранение связи между значениями напряжения при значительных величинах τ ;
4. Отрицательные значения функции корреляции подчеркивают тот факт, что положительным отклонениям напряжения в данный момент времени t_1 соответствуют преимущественно отрицательные отклонения его в другой момент времени t_2 и наоборот.

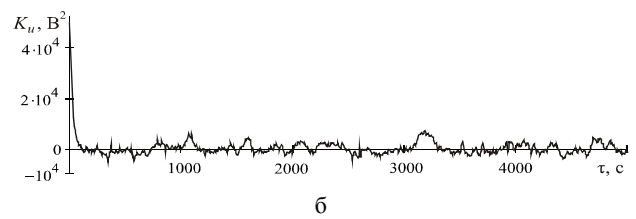
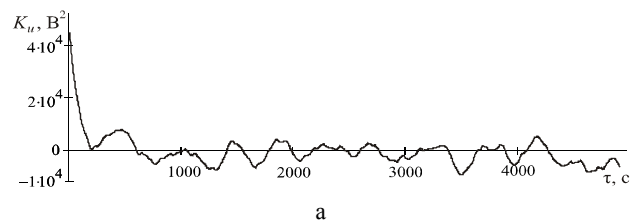


Рис.2. Корреляционные функции напряжения на пантографе: электровоза ВЛ8 (а); электровоза ДЭ1 (б)

Характер изменения экспериментальных зависимостей $K_U(\tau)$ (рис. 2) позволяет аппроксимировать их выражением:

$$K_U(\tau) = D_U e^{-\alpha|\tau|}, \quad (6)$$

где α – коэффициент затухания; τ – интервал времени между двумя сечениями случайного процесса $U(t)$; D_U – дисперсия функции $U(t)$.

При этом значения параметров функции $K_U(\tau)$ составили: для электровоза ВЛ8 – $D_U = 44940 \text{ В}^2$,

$\alpha_U = 0,0025 \text{ с}^{-1}$; для электровоза ДЭ1 – $D_U = 47090 \text{ В}^2$, $\alpha_U = 0,009 \text{ с}^{-1}$.

Подставив (6) в (4) и выполнив интегрирование, получим общее выражение спектральной плотности случайной функции напряжения:

$$S_U(\omega) = \frac{D_U}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_U(\tau) e^{-\alpha_U |\tau|} d\tau = \frac{D_U \alpha_U}{\pi(\alpha_U^2 + \omega^2)}. \quad (7)$$

Подставив в (7) приведенные выше значения D_U и α_U , получим конкретные выражения функций спектральной плотности напряжения:

- для электровоза ВЛ8:

$$S_U(\omega) = \frac{35,78}{6,25 \cdot 10^{-6} + \omega^2}, \text{ В}^2 \cdot \text{с}; \quad (8)$$

- для электровоза ДЭ1:

$$S_U(\omega) = \frac{134,97}{81 \cdot 10^{-6} + \omega^2}, \text{ В}^2 \cdot \text{с}. \quad (9)$$

Графики спектральных плотностей $S_U(\omega)$, построенные по выражениям (8) и (9), представлены на рис. 3.

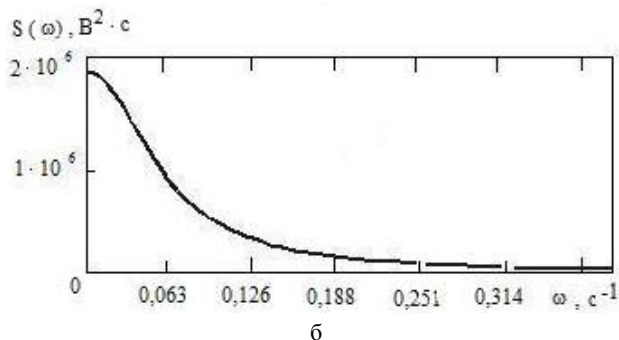
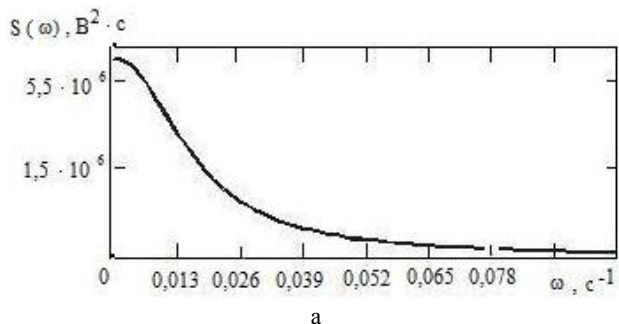


Рис. 3. Спектральные плотности напряжения на токоприемнике: электровозов ВЛ8 (а), ДЭ1(б)

Тогда, согласно (3), законы распределения случайной величины ω , примут вид:

- для ВЛ8:

$$f(\omega) = \frac{7,96 \cdot 10^4}{6,25 \cdot 10^{-6} + \omega^2}; \quad (10)$$

- для ДЭ1:

$$f(\omega) = \frac{28,66 \cdot 10^{-4}}{81 \cdot 10^{-6} + \omega^2}. \quad (11)$$

Дисперсии случайных величин λ_1 и λ_2 соответственно электровозам составят: 44949 В^2 и 47090 В^2 .

В конечном итоге, искомые разложения функций напряжения на токоприемниках электровозов ВЛ8 и ДЭ1 представляют собой выражение (5), в котором

математическое ожидание $m_U(t)$ и дисперсии величин λ_1, λ_2 приведены в таблице, а законы распределения величины ω представлены выражениями (10) и (11).

Выводы.

1. Изложенный метод неканонических разложений случайных процессов позволяет представлять случайные функции электрических величин несложными выражениями, содержащими не более трех случайных величин.

2. Метод в полной мере применим и к разложению тяговых токов, которые можно принять квазистационарными, если считать реализацией случайной функции множество ее колебаний.

3. Так как методы анализа систем на основе теории случайных величин развиты значительно сильнее, то представление тяговых напряжений и токов выражениями функциями со случайными величинами значительно упрощает анализ электромагнитных процессов в устройствах систем электрического транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 883 с.
2. Лившиц Н.А., Пугачев В.С. Вероятностный анализ систем автоматического управления. В 2-х томах. – М.: Советское радио, 1963. – Т. 1 – 482 с., Т. 2 – 895 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
5. Казаков И.Е. Доступов Б.Г. Статистическая динамика нелинейных автоматических систем. – Москва: Гос. изд. физ.-мат. лит.-ры, 1962. – 331 с.
6. Деч Р. Нелинейные преобразования случайных процессов. – М.: Советское радио, 1965. – 206 с.
7. Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. – М.: Машиностроение, 1968. – 246 с.
8. Статистические методы в проектировании нелинейных систем автоматического управления. Под ред. д.т.н., проф. Б.Д. Доступова. – М.: Машиностроение, 1970. – 407 с.
9. Kuo F.F. Freeny S.L. Hildert transforms and modulation theory. – Proc. NEC, 1962, no.18, pp. 61-68.
10. Dunkan D.B. Response of linear time-dependent systems to random inputs. J. Phys., May 1963, no.24, pp. 47-52.
11. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
12. Костин Н.А., Шейкина О.Г. Коэффициент реактивной мощности электрического транспорта постоянного тока // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силовa електроніка та енергоефективність". – 2008. – Ч. 4. – С. 72-75.
13. Костин Н.А., Саблин О.И. Методы корреляционно-спектрального анализа напряжения на токоприемнике и тягового тока электрического транспорта // Материалы конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта". – Днепропетровск, 2009. – С. 130-131.
14. Саблин О.И. Повышение эффективности электропривода электроподвижного состава постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. / Днепропетровск, 2009. – 191 с.
15. Mykolay Kostin. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in the recuperation mode // Warsaw Przegląd Elektrotechniczny, 2013, no.2a, pp. 273-275.

REFERENCES

1. Pugachev V.S. *Teoriia sluchainykh funktsii i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of random

functions and its application to problems of automatic control]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 883 p. (Rus).

2. Livshits N.A., Pugachev V.S. *Veroiatnostnyi analiz sistem avtomaticheskogo upravleniia. V 2-kh tomakh* [Probabilistic analysis of automatic control systems. In 2 volumes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963. Vol.1, 482 p., Vol.2, 895 p. (Rus).

3. Venttsel' E.S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p. (Rus).

4. Sveshnikov A.A. *Prikladnye metody teorii sluchainykh funktsii* [Applied methods of the theory of random functions]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 463 p. (Rus).

5. Kazakov I.E., Dostupov B.G. *Statisticheskaiia dinamika nelineinykh avtomaticheskikh sistem* [Statistical dynamics of nonlinear circuit and system]. Moscow, State Publ. of physics & mathematics literature, 1962. 331 p. (Rus).

6. Dech R. *Nelineinye preobrazovaniia sluchainykh protsessov* [Nonlinear transformations of random processes]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1965. 206 p. (Rus).

7. Chernetskii V.I. *Analiz tochnosti nelineinykh sistem upravleniia* [Analysis of the accuracy of nonlinear control system]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 246 p. (Rus).

8. Dostupov B.D. *Statisticheskie metody v proektirovanii nelineinykh sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Statistical methods in designing of nonlinear systems of automatic control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 407 p. (Rus).

9. Kuo F.F. Freeny S.L. Hildert transforms and modulation theory. *Proc. NEC*, 1962, no.18, pp. 61-68.

10. Dunkan D.B. Response of linear time-dependent systems to random inputs. *J. Phys.*, May 1963, no.24, pp. 47-52.

11. Kazakov I.E. *Statisticheskaiia dinamika sistem s peremennoi strukturoi* [Statistical dynamics of systems with variable structure]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 416 p. (Rus).

12. Kostin N.A. Power Factor electric vehicles DC. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Silova elektronika i energoefektivnist" – Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2008, Part 4, pp. 72-75. (Rus).

13. Kostin N.A., Sablin O.I. Methods of correlation and spectral analysis of the voltage across the current collector and the torque current electric vehicles. *Materialy konferentsii*

"Problemy i perspektivy razvitiia zheleznodorozhnogo transporta" [Proceedings of the conference "Problems and prospects of railway transport development"]. Dnepropetrovsk, 2009, pp. 130-131. (Rus).

14. Sablin O.I. *Povyshenie effektivnosti elektropotrebleniia elektropodvizhnogo sostava postoiannogo toka*. Diss. kand. techn. nauk [Improving the efficiency of energy consumption of electric rolling stock DC. Cand. tech. sci. diss.]. Dnepropetrovsk, 2009. 191 p. (Rus).

15. Mykolay Kostin. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in the recuperation mode. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2013, no.2a, pp. 273-275.

Поступила (received) 02.12.2014

Костин Николай Александрович¹, д.т.н., проф.,

Шейкина Ольга Григорьевна¹, к.т.н., доц.,

¹ Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010, Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел/phone +38 056 3731537, e-mail: shog73@mail.ru

N.A. Kostin¹, O.G. Sheikina¹

¹ Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan Str., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine.

Non-canonical spectral decomposition of random functions of the traction voltage and current in electric transportation systems.

The paper proposes the non-canonical spectral decomposition of random functions of the traction voltages and currents. This decomposition is adapted for the electric transportation systems. The numerical representation is carried out for the random function of voltage on the pantograph of electric locomotives VL8 and DE1. References 15, table 1, figures 3.

Key words: current, voltage, random, electric transportation systems, decomposition of value.

ФІЗИЧНА ОСНОВА ЗАКОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Твердження про залежність ЕРС на макрорівні від зміни магнітного потоку контуру у часі невірно відображує фізичне явище електромагнітної індукції за Фарадеєм, тому що ЕРС може наводитись, якщо магнітний потік контуру не змінюється. Зміна магнітного потоку контуру при наведенні ЕРС виникає лише як наслідок перетинання провідником магнітних силових ліній і є винятком, який стосується лише певних класів електричних машин. Бібл. 11, рис. 11.

Ключові слова: закон електромагнітної індукції, Фарадей, Максвелл, явище.

Утверждение про зависимость ЭДС на макроуровне от изменения магнитного потока контура во времени неверно отображает физическое явление электромагнитной индукции по Фарадею, т. к. ЭДС может наводиться, если магнитный поток контура не изменяется. Изменение магнитного потока контура при наведении ЭДС возникает только как следствие пересечения проводником магнитных силовых линий и является исключением, которое касается только определенных классов электрических машин. Библи. 11, рис. 11.

Ключевые слова: закон электромагнитной индукции, Фарадей, Максвелл, явление.

Постановка проблеми. Розглянемо математичні моделі закону електромагнітної індукції на макрорівні у вигляді формулювання Максвелла [8]

$$e = -P \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

де e – ЕРС; t – час; $d\Phi$ – зміна магнітного потоку контур, що викликана будь-якою причиною; P – перемікаюча функція, яка приймає значення "1" при дотриманні умов Фарадея та "0" у іншому разі [8];

та формулювання Фарадея (воно часто тлумачиться з точки зору зміни магнітного потоку контур)

$$e = PBL_{\Pi}V, \quad (2)$$

де B – магнітна індукція; L_{Π} – довжина провідника; V – модуль швидкості руху провідника у напрямку, перпендикулярному довжині провідника, який урахує перетинання провідником безперервних магнітних силових ліній.

Фізичну основу закону електромагнітної індукції на макрорівні визначив Фарадей: ЕРС дорівнює швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній.

Математично тотожні і експериментально підтвержені моделі (1) та (2) є вірними, корисними і необхідними при аналізі електричних машин. Але сучасне тлумачення явища електромагнітної індукції згідно формул (1) та (2) в основному пов'язує фізику створення ЕРС на макрорівні із зміню магнітного потоку контур [1-6, 8, 10, 11].

Між тим досліди показують, що без урахування умов Фарадея формула (1) у вигляді $e = -d\Phi/dt$:

1. При $d\Phi \neq 0$ та $dt \neq 0$ не підтверджується експериментально, бо $e = 0$ [10].

2. В уніполярних генераторах при $e = E = \text{const}$, (звідки $\Phi = -Et$) у дійсності спостерігається $\Phi = \text{const}$, [8], що позбавляє рівняння $e = -d\Phi/dt = E = \text{const}$, не лише фізичного, але й математичного сенсу внаслідок "некоректності" математичних перетворень.

В результаті виникають питання: наскільки формули (1) та (2) вірно тлумачаться при поясненні фізики явища? Чи є необхідність протиставлення фізичних процесів зміни магнітного потоку контуру та перетинання провідником магнітних силових ліній?

Мета. Метою статті є доведення того, що при тлумаченні фізики явища електромагнітної індукції треба використовувати визначення Фарадея. Зміна магнітного потоку контуру за формулою (1) при наведенні ЕРС спостерігається не в усіх експериментах; в дослідах, де ця зміна магнітного потоку контуру все ж підтверджена, вона є наслідком перетинання провідником магнітних силових ліній, тобто не є першопрчиною наведення ЕРС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фарадей у 1831 р. сформулював закон електромагнітної індукції у вигляді твердження стосовно замкнутого контуру зі струмом: "Заряд Δq , який пройшов по замкнутому ланцюгу, є пропорційним зміні магнітного поля $\Delta\Phi$ і є зворотно пропорційним опорю ланцюга R ", тобто

$$\Delta q = -\Delta\Phi/R. \quad (3)$$

Уніполярний генератор (рис. 1) був створений Фарадеєм у 1831 р. для демонстрації наведення ЕРС і складався з постійного магніту 1 та мідного диску 2, що обертався між полюсами N та S магніту 1. ЕРС знімалась щітками і вимірювалась гальванометром G.

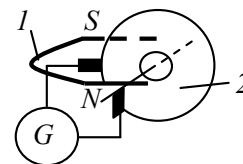


Рис. 1. Генератор Фарадея

Пізніше Фарадей ввів поняття магнітного потоку Φ та його зміни $\Delta\Phi$, створив "мову" магнітних силових ліній і прийшов до висновку, що вирішальною умовою виникнення індукційних струмів є перетинання провідником магнітних силових ліній. До цього твердження є більш наближеною формула (2).

В.Ф. Миткевич [10, с. 83-86] розрізняв закон Фарадея

$$e = -\frac{d\Phi^*}{dt}, \quad (4)$$

де Φ^* – кількість пересічених провідниками контур магнітних силових ліній,

і закон Максвелла у вигляді $e = -d\Phi/dt$. Він стверджував, що формула (4) ближче до суті фізичного процесу і є стабільно універсальною у порівнянні з формулюванням Максвелла $e = -d\Phi/dt$.

Для доведення необхідності використання формули (4) замість формули $e = -d\Phi/dt$ В.Ф. Миткевич описав три експерименти, у яких не дотримувались умови Фарадея щодо перетину провідником магнітних силових ліній, внаслідок чого ЕРС контуру дорівнювала нулю при зміні його магнітного потоку [10]. Для скорочення огляду, з наведених ним трьох дослідів розглянемо лише один (рис. 2). На рис. 2 по первинній обмотці трансформатора w_1 протікає постійний струм Φ , а замкнений на гальванометр G один виток вторинної обмотки $w_2 = 1$ при ковзанні по електропровідному "кільцю" "стрибком" змінює свій магнітний потік з нуля на Φ [10, с. 83]. Але при цьому за законом $e = -d\Phi/dt$ ЕРС не створюється із-за відсутності процесу перетинання провідником магнітних силових ліній.

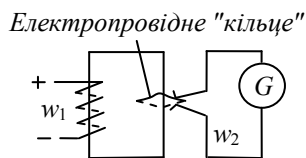


Рис. 2. Дослід В.Ф. Миткевича (1901 р.)

В.Ф. Миткевич також стверджував, що в уніполярних машинах існує захована комутація [10]. Але проведений пізніше дослід на барабанному уніполярному генераторі (рис. 3) довів, що "захованої комутації" не існує, а у замкненому контурі можна нескінченно довго наводити постійну ЕРС без зростання модуля магнітного потоку контуру до "нескінченності" [7].

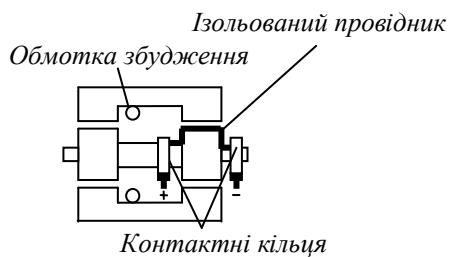


Рис. 3. Уніполярний генератор

Для аналізу процесу створення ЕРС є зручними уніполярні генератори періодичних прямокутних імпульсів. Схема обмотки уніполярного генератора прямокутних імпульсів постійного струму наведена на рис. 4,а [9]. Початки та кінці з'єднаних паралельно провідників 1 на одному полюсі циліндричного ротора уніполярного генератора барабанного типу увімкнені до двох контактних кілець 2, а уніполярний полюс статора 3 є зубчастим і вміщує однакові одноіменні виділені сірим фоном полюси, які рівномірно розміщені по колу статора.

Між циліндричним ротором та зубцями-полюсами статора передбачений повітряний проміжок, який у ділянці між полюсами статора різко зростає. У кожному провіднику 1 за формулою (2) гене-

руються однакові прямокутні імпульси ЕРС, які спадають майже до нуля при проходженні провідниками ділянки між полюсами статора з малим значенням магнітної індукції (рис. 4,б).

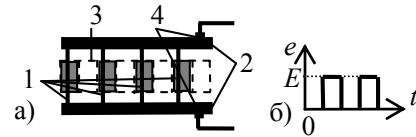


Рис. 4. Схема обмотки генератора уніполярних імпульсів

Результати повторення дослідів Фарадея рис. 1 з урахуванням схеми рис. 3 у дисковому варіанті (рис. 5) наведені в роботі [8]. Уніполярний генератор (рис. 5,а) складається з постійного магніту, між полюсами якого N та S обертається диск 1 з односторонньої друкованої плати з фольгованого склотекстоліту товщиною 1,5 мм, на якій витравлені верхня доріжка для щітки 2, активний провідник 3 (у ньому наводиться ЕРС) та нижня доріжка для щітки 4.

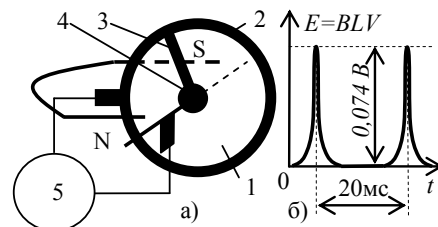


Рис. 5. Принцип роботи уніполярного імпульсного генератора постійного струму: а – схема виконання дослідів; б – форма отриманих осцилограм

За допомогою щіток ЕРС активного провідника 3 вимірюється осцилографом 5.

Магнітна система генератора створює у робочому повітряному проміжку машини магнітний полюс шириною 4 мм та довжиною 50 мм вздовж радіусу ротора. Двигун, який обертає диск 1, не показаний. При обертанні диска 1 у провіднику 3 (рис. 5,а) наводиться позитивно спрямовані імпульси постійної ЕРС з амплітудою 0,074 В. Форма імпульсів ЕРС наведена на рис. 5,б.

Досліди показали, що додання до схеми рис. 5,а нового магніту, зсунутого на деякий кут відносно першого магніту і з протилежним напрямком магнітної індукції, призводить до отримання на виході ЕРС зі змінними напрямками імпульсів.

З дослідних даних генератора рис. 5 випливає:

1. Підтверджується висновок, наведений в роботі [7], що у замкненому контурі можна нескінченно довго наводити імпульси ЕРС постійного напрямку без зростання модуля магнітного потоку контуру до "нескінченності" (відомий "парадокс" уніполярного генератора).

2. Наведення ЕРС в контурі рис. 5,а відбувається, лише коли ізолюваний провідник ротору пересікає магнітне поле статора. В усіх інших положеннях провідника зовні дії магнітного потоку статора ЕРС не наводиться. Напрямок ЕРС залежить від напрямку магнітної індукції полюса постійного магніту.

В роботі [8] описані багатопольосні імпульсні уніполярні генератори постійного та змінного струму дискового (рис. 6) та барабанного (рис. 7) типів.

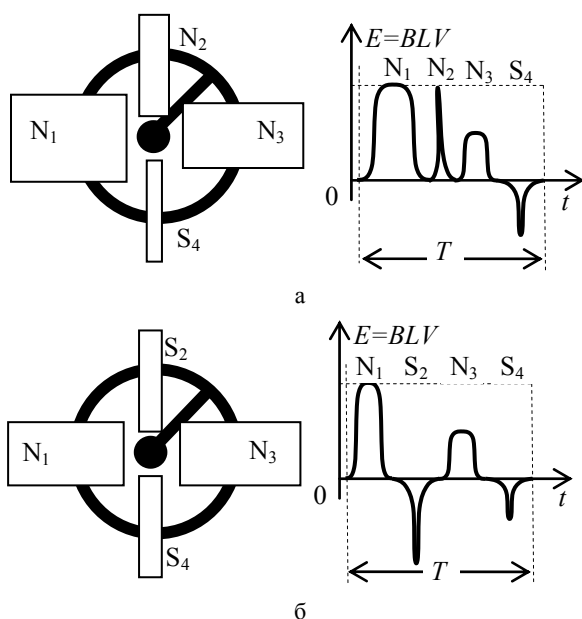


Рис. 6. Конструкції багатоплюсного уніполярного генератора дискового типу

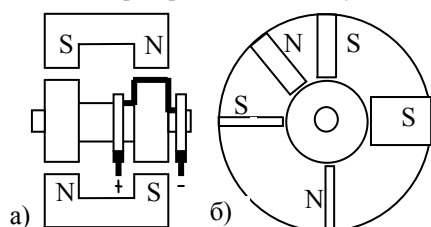


Рис. 7. Багатоплюсний уніполярний генератор барабанного типу: а – переріз вздовж осі; б – поперечний переріз

Ці машини мають довільне розміщення та довільну форму полюсів N та S постійних магнітів та один ізолюваний активний провідник на роторі. За один період обертання ротору машина може генерувати довільну послідовність імпульсів ЕРС заданої довільної форми та спрямування.

На рис. 6 показані два приклади можливих схем багатоплюсних уніполярних генераторів дискового типу та можливі вихідні імпульси ЕРС, зверху яких наведені позначення відповідних полюсів, помічених літерами N_1, N_2, N_3, S_2, S_4 [8].

В роботі [8] запропоновано використовувати закон електромагнітної індукції у формулюванні Максвелла для визначення ЕРС у вигляді

$$e = -P \cdot d\Phi / dt, \quad (5)$$

де $d\Phi$ – зміна магнітного потоку контуру; dt – крок у часі; P – перемикаюча функція, яка має значення "1" у випадку дотримання умов Фарадея і дорівнює "0" у іншому випадку,

а систему рівнянь Максвелла – у вигляді

$$\text{rot}E = P\delta B / \delta t; \text{rot}H = j + \delta D / \delta t; \text{div}D = \rho; \text{div}B = 0, \quad (6)$$

де E – напруженість електричного поля; B – магнітна індукція; H – напруженість магнітного поля; j – щільність електричного струму, викликаного рухом зарядів; D – електрична індукція; ρ – щільність електричного заряду.

Виклад основного матеріалу. При розгляді закону електромагнітної індукції Фарадея за формулами (1) та (2) потрібно розрізнати:

- кількість пересічених провідником магнітних силових ліній за одиницю часу (за Фарадеєм);
- інтегровану за деякий час загальну кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній. Наприклад, для всіх безперервно працюючих у часі електричних машин (синхронних, асинхронних, постійного струму з колектором, уніполярних) у природі не існуюча інтегрована за деякий час кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній (магнітний потік) наближується до "нескінченності" (напрямок магнітних силових ліній не розглядається);
- кількість магнітних силових ліній контур (магнітний потік контуру).

Сучасне тлумачення математичних моделей (1) та (2) має наступні відміни у порівнянні з явищем електромагнітної індукції, описаним Фарадеєм:

1. Першу різницю між ними можна визначити словом – "контур": тлумачення формул (1) та (2) в основному спрямовані на розгляд зміни магнітного потоку контуру. Разом з тим експерименти Миткевича [10] та проведені досліді на уніполярних машинах [7, 8] показують, що у загальному випадку наведення ЕРС не залежить від зміни магнітного потоку контуру.

Хоча введення поняття впливу "зміни магнітного потоку контуру" на ЕРС є необхідним і зручним для аналізу електричних машин, але стосовно фізики явища електромагнітної індукції воно повинне тлумачитись як виняток, який фізично обґрунтований лише для ряду електричних машин, але не стосується уніполярних машин і не підтверджується деякими іншими експериментами [10]. Між тим закон не повинен мати винятків та парадоксів. Тому у загальному випадку при поясненні явища електромагнітної індукції Фарадея в основному потрібно застосовувати поняття "провідника".

Ускладнень з аналізом роботи машин синхронних, асинхронних та машин постійного струму з колектором за формулою (1) не виникає, бо для них у кожний даний момент часу похідна по потоку $e = -d\Phi/dt$ дорівнює кількості перетнутих провідником магнітних силових ліній за одиницю часу, а магнітний потік контуру дорівнює інтегралу магнітної індукції по площині контуру.

Проблема виникає при аналізі уніполярних машин звичайної конструкції, у яких магнітний потік контуру є постійним ($\Phi = \text{const}, d\Phi \approx 0$), що позбуває не лише фізичного, але й математичного сенсу поняття потоку контуру у формулі (1).

2. Друга різниця між визначенням Фарадея та формулами (1) і (2) полягає у дотриманні лінгвістичної вимоги Фарадея – "перетинання провідником магнітних силових ліній".

У роботі [8] звернуто увагу на те, що магнітний потік уніполярного генератора не може перевищувати номінального значення, а його "нескінченне зростання у часі" пояснюється тим, що формула Максвелла (1) моделює роботу реально не існуючої електричної машини з нескінченно великим індуктором та рівним нескінченності магнітним потоком.

Разом з тим у роботі [8] залишились поза увагою те, що дослідні дані не підтверджують прив'язку

взаємопов'язаних формул (1) та (2) до зміни магнітного потоку контуру:

1. З експерименту рис. 2 випливає, що зміна магнітного потоку контуру не викликає виникнення ЕРС.

2. З експерименту рис. 3 випливає, що при постійному магнітному потоці контуру в ньому можна "нескінченно" довго наводити ЕРС. Якщо роботу будь-якої звичайної уніполярної машини дискового чи барабанного типу описати рівнянням $e = -d\Phi/dt = E = \text{const}$, то з математичної точки зору магнітний потік повинен лінійно зростати у часі до "нескінченності" за формулою $\Phi = -E \cdot t$. У дійсності експерименти це не підтверджують і можна вважати, що $\Phi \approx \text{const}$.

3. З експериментальних даних по ЕРС рис. 4,б (або рис. 8,а) та формули (1) випливає, що магнітний потік замкнутого контуру повинен безупинно збільшуватися до "нескінченності" згідно рис. 8,б, що є парадоксом: воно експериментами не підтверджується і таке нарощування теоретично неможливе, бо означає зростання до "нескінченності" накопиченої у магнітному полі електромагнітної енергії.

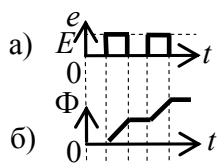


Рис. 8. Зміна у часі ЕРС та магнітного потоку генератора (рис. 4)

У звичайному уніполярному генераторі з рівномірним повітряним проміжком та конструкцією ротора, аналогічною рис. 4, у контурі з двох однакових паралельно увімкнених провідників наводяться рівні і зустрічно спрямовані ЕРС. Магнітний потік контуру з цих двох провідників, не змінюється (скільки увійшло у контур магнітних силових ліній – стільки ж й вийшло), і ЕРС контуру дорівнює нулю; а між тим явище електромагнітної індукції для двох провідників все ж спостерігається. І одночасно для аналогічного контуру з цих же двох провідників за даними рис. 2 можна збільшувати магнітний потік, а ЕРС контуру і провідників буде дорівнювати нулю.

Наявність парадоксів (невідповідності закону експериментам) прямо вказує на те, що математична модель та відповідне їй твердження не є законом. Разом з тим самі парадокси є захованою підказкою щодо розв'язання проблеми.

Щоб визначити вплив на ЕРС зміни величини магнітного потоку контуру, розглянемо звичайний дисковий уніполярний генератор рис. 9,а, де B вказує напрямом магнітних силових ліній стосовно дискового електропровідного ротора 1. З'єднані з гальванометром G провідники можна розмістити таким чином, щоб магнітний потік вимірювального контуру, який створюється лише робочим магнітним потоком статора, був мінімальним (з використанням положення провідника A , показаного безперервними лініями). В результаті при мініальному і постійному за величиною магнітному потоці контуру ми маємо стабільне у часі за період T наведення ЕРС у контурі (рис. 9,б).

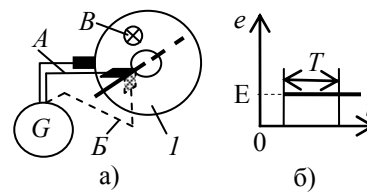


Рис. 9. Дисковий уніполярний генератор

Якщо змінити положення провідника A на положення B , то контур гальванометра G охоплює більшу частку робочого магнітного потоку, а величина ЕРС не змінюється у часі. Величина ЕРС також не змінюється у часі, якщо змінити знак магнітного потоку контуру переміщенням провідника A не проти руху стрілки годинника (як це показано на рис. 9,а), а за рухом стрілки годинника.

В результаті можна зробити висновок, що в уніполярному генераторі в режимі холостого ходу ми спостерігаємо стабільний у часі магнітний потік вимірювального контуру, який може змінюватись експериментатором по знаку та величині (від нуля до номінального значення) без впливу на величину ЕРС.

Цей висновок прямо суперечить математичній моделі $e = -d\Phi/dt$: ЕРС у контурі існує, а магнітний потік контуру не змінюється.

Слід звернути увагу на те, що це також "суперечить і нашим математичним поняттям", пов'язаним з тим, що магнітний потік, як інтегральна величина по часу, не може не змінюватись при наведенні ЕРС згідно $e = -d\Phi/dt$, а тим більше – стабільно дорівнювати нулю у часі, що спостерігається у положенні провідника A за рис. 9,а. Для усунення цього "математичного парадоксу" слід згадати про існування "математичних формул з лінгвістичними умовами", прикладом яких є вирази $e = -d\Phi/dt$ та (4): формально вони "наче однакові", але формула (4) супроводжується умовою Фарадея. Тому у питаннях наведення ЕРС потрібно мати на увазі всі без виключення умови Фарадея стосовно явища електромагнітної індукції. З формули $e = -d\Phi/dt$ випливає, що обов'язковою причиною появи ЕРС є зміна магнітного потоку контуру, а у формулі (4) "лінгвістичний додаток" вказує, що перетин провідником магнітних силових ліній є першопричиною і виникнення ЕРС і зміни (і то не в усіх дослідах) магнітного потоку контуру. Експерименти нам підказують: у деяких випадках наведення ЕРС за рахунок перетину провідником магнітних силових ліній супроводжується зміною магнітного потоку контуру (в машинах змінного струму), а у деяких випадках – ні (рис. 9,а).

На наш погляд, найліпшим чином це можна урахувати введенням перемикаючої функції P у рівняння Максвелла за формулами (1), (5) та (6) та у формулу Фарадея (2).

Картина, аналогічна рис. 9, також спостерігається стосовно звичайного уніполярного генератора барабанного типу (рис. 10).

На рис. 10,а позначені: 1 – виділений сірим фоном один масивний феромагнітний уніполярний полюс ротора уніполярного генератора барабанного типу у розгорнутому вигляді; 2 – щітки ковзання,

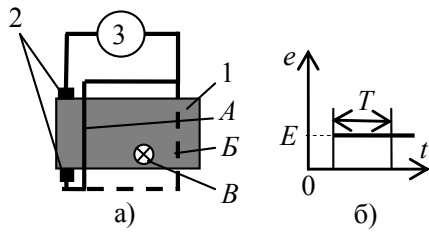


Рис. 10. Схема обмотки уніполярного генератора

напряга на яких вимірюється осцилографом 3; B – спрямованість магнітних силових ліній робочого магнітного потоку; A та B – одне з можливих положень вимірювального провідника осцилографа 3. Із рис. 10,а випливає, що якщо вимірювальний провідник знаходиться у положенні A , то магнітний потік контуру вимірювання $\Phi \approx 0 = \text{const}$; переміщення його у положення B збільшує магнітний потік контуру, але цей потік не змінюється у часі у процесі роботи. Стосовно схеми рис. 10 можна стверджувати, що **магнітний потік контуру при роботі не змінюється, а ЕРС не дорівнює нулю. Це можна пояснити лише за твердженням Фарадея.**

У цьому випадку контур рис. 10,а також демонструє відомий "парадокс": магнітний потік цього контуру за формулою Максвелла $e = -d\Phi/dt$ повинен зростати до нескінченності. Використання математичних моделей (5) та (6) вилучає цей "парадокс" і розв'язує математичні проблеми.

Розглянемо величину магнітного потоку контуру на одному полюсі ротора "барабанного" уніполярного генератора імпульсів ЕРС однакового спрямування (рис. 11,а, аналогічний рис. 7), на якому позначені: 1 – один ізолюваний провідник на циліндричному роторі, який з'єднаний з двома електропровідними кільцями 2, напруга з яких знімається за допомогою щіток ковзання 3 і вимірюється осцилографом 5. На статорі розміщені два полюси 4 однакової полярності N .

У цьому випадку можна розмістити провідники, з'єднані з осцилографом 5, у положення A (рис. 11,а), що дозволяє отримати показані на рис. 11,б однополярні імпульси ЕРС. Але переміщення провідника осцилографа з положення A в показане пунктиром положення B не змінює умови пересічення рухомим провідником 1 магнітних силових ліній, хоча магнітний потік контуру періодично й змінюється у часі.

Тобто в одному й тому ж приладі форма ЕРС не змінюється при $\Phi = 0 = \text{const}$, та при $\Phi = \text{var}$. Це доводить справедливість твердження Фарадея.

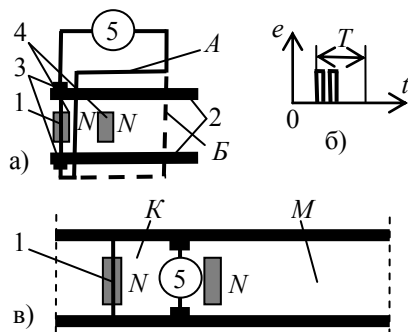


Рис. 11. Схема обмотки генератора уніполярних імпульсів

Згідно рис. 11,в осцилограф 5 з власними провідниками розділяє магнітний потік одного циліндричного полюсу ротору на дві частки, які позначимо літерами K та M (їх розміри змінюються при обертанні ротора). З рис. 11,в бачимо, що переміщення провідника 1 настільки ж збільшує магнітний потік контуру K , наскільки зменшує магнітний потік контуру M і навпаки. Тому ЕРС обох контурів спрямовані у різні сторони і співпадають по напрямку і по величині на осцилографі 5.

З рис. 11,в ми отримуємо **три взаємно пов'язаних твердження**: ЕРС у провіднику виникає при збільшенні магнітного потоку контуру K , при тотожному зменшенні магнітного потоку контуру M , при незмінності підсумку магнітних полів контурів K та M (незмінності робочого магнітного поля машини у режимі холостого ходу). Таким чином, у даному випадку ми повинні стверджувати, що причиною виникнення ЕРС у провіднику 1 рис. 11,в є зміна магнітних потоків **двох контурів** (збільшення магнітного потоку одного контуру повинне одночасно супроводжуватись зменшенням магнітного потоку другого контуру) при незмінності магнітного потоку контуру, який охоплює обидва вказані контури. Ці твердження цілком узгоджуються з формулою Максвелла $e = -d\Phi/dt$ і наведені лише для демонстрації деякого ускладнення аналізу, яке не виникає у цьому питанні з точки зору вимог Фарадея.

Хоча тут й отриманий зв'язок між зміною магнітного поля контурів та перетинанням провідником магнітних силових ліній, але ця зміна магнітних потоків контурів K та M існує як наслідок перетинання провідником магнітних силових ліній. Тобто єдине вірне фізичне пояснення явища електромагнітної індукції належить Фарадею: ЕРС дорівнює швидкості перетину провідником безперервних магнітних силових ліній і, відповідно, не залежить від зміни величини магнітного потоку контуру у часі за формулою $e = -d\Phi/dt$.

Цей процес можна розглянути також з точки зору зміни топології схеми: два контури об'єднуються у один контур з тим, щоб у наступний момент розділитись на два контури. В момент об'єднання двох контурів магнітний потік вимірювального контуру з осцилографом дорівнює мінімальному ("нульовому") значенню при максимальному магнітному потоці зовнішнього контуру, який після цього розділяється на два контури: в першому магнітний потік зменшується, а у другому – на стільки ж зростає. Відомо, що в момент зміни топології електромагнітна енергія може передаватись між конурами без перенапруг.

Якщо ж у рис. 11 використати магнітні полюси протилежної полярності N та S , то знову експериментально не підтверджується залежність ЕРС від величини магнітного поля контуру згідно $e = -d\Phi/dt$.

Дійсно, за формулою $e = -d\Phi/dt$ перший позитивний імпульс ЕРС означає збільшення магнітного потоку контуру, який потім залишається незмінним до другого негативного імпульсу ЕРС, що визначає зменшення магнітного потоку контуру на другому імпульсі до нуля. У цьому випадку виникає парадокс другого порядку: якщо ми визнаємо зростання магнітного потоку

контур на першому імпульсі ЕРС для рис. 11, то ми повинні визнати зростання магнітного потоку контуру до нескінченності за рис. 8,б. Ми не можемо стверджувати наче очевидну річ – зростання магнітного поля контуру на позитивному імпульсі ЕРС, бо існують два контури: в одному магнітне поле збільшується, а у іншому на стільки ж зменшується. А у цілому магнітний потік одного полюсу ротора не змінюється.

Вихід з цього тупика належить Фарадею: зміна магнітного потоку контуру у часі не впливає на ЕРС, головна фізична причина наведення ЕРС – це швидкість перетину провідником безперервних магнітних силових ліній.

З рис. 9 – 11 випливає, що в уніполярних машинах ЕРС контуру не залежить від зміни величини магнітного поля контуру і разом з тим процес створення ЕРС точно відповідає закону Фарадея.

Зміна магнітного потоку контуру у часі за формулою $e = -d\Phi/dt$ та кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній за одиницю часу – це не тотожні поняття.

З формул (1) та (2) випливає:

1. У формули (1) та (2) не входять перетнуті у минулому магнітні силові лінії. Це означає, що магнітний потік контуру не впливає на наведення в ньому ЕРС. Тому пояснення фізики явища повинне стосуватись не зміни у часі магнітного потоку контуру, а за Фарадеєм – швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній.

2. Розрахунок ЕРС уніполярних машин виконується за формулою (2), при розгляді провідника, що перетинає магнітні силові лінії і при незмінній величині магнітного потоку контуру. Ця математична несумісність з формулою (1) узгоджується лише за рахунок введення в (1) перемикаючої функції.

3. При проектуванні електричних машин, розрахунок ЕРС контуру, котушки і фази, а також обмоткового коефіцієнта (з урахуванням укорочення кроку котушки, скосу провідників, розподілу котушок) для електричних машин постійного струму з колектором та машин змінного струму виконується на базі розгляду ЕРС активних провідників, які перетинають магнітні силові лінії. У розрахункових формулах інтегральний магнітний потік контуру впливає потім, при узагальненні аналізу.

4. Без урахування скінченності розмірів індуктора та напрямку магнітних силових ліній за рівняннями (1) та (2) провідники контуру при необмеженій у часі роботі електричної машини перетинають "нескінченну" кількість магнітних силових ліній [8].

Таким чином, фізичною основою створення ЕРС є процес перетинання провідником магнітних силових ліній за Фарадеєм. Тобто формула Максвелла (1) у сучасному тлумаченні оперує не з фізичною причиною виникнення ЕРС, а з її наслідками, які є вірними лише для визначених типів електричних машин. У зв'язку з цим при фізичному тлумачення математичних моделей законів електромагнітної індукції (1) та (2) потрібно ураховувати вимоги Фарадея.

Висновки.

1. Фізичною основою закону електромагнітної індукції є твердження Фарадея, яке цілком розділяв

і Максвелл: ЕРС дорівнює швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній. Саме це й відображує формула (1). В формулі (1) $d\Phi$ слід розглядати як кількість перетнутих провідником магнітних силових ліній за час dt , а не як зміну магнітного потоку контуру, бо у загальному випадку магнітний потік контуру може й не змінюватись.

2. При розгляді закону електромагнітної індукції Фарадея у вигляді математичної моделі $e = -P \cdot d\Phi/dt$ потрібно розрізняти:

- кількість перетнутих провідником контуру магнітних силових ліній за одиницю часу (за Фарадеєм);
- інтегральну кількість пересічених провідником магнітних силових ліній при безперервній роботі машини (яка може збільшуватись у часі до "нескінченності");
- кількість магнітних силових ліній контуру.

3. Наведення ЕРС обов'язково супроводжується перетином провідником безперервних магнітних силових ліній, який не обов'язково змінює магнітний потік контуру (експерименти рис. 3, рис. 9, рис. 10), в той час як зміна у часі магнітного потоку контуру без перетину провідником магнітних силових ліній не викликає появи ЕРС (рис. 2).

4. Слід звернути увагу й на те, що у першому уніполярному генераторі (демонстраційному "диску Фарадея", рис. 1) магнітний потік контуру не змінюється. Тому, на наш погляд, бажано, щоб найбільш розповсюджена у фаховій літературі математична модель (1) поступилась своїм місцем формулі (2), яка більш точно передає фізичну сутність закону електромагнітної індукції, запропонованого Фарадеєм. Те, що для синхронних та асинхронних машин і колекторних машин постійного струму значення $d\Phi$ дорівнює зміні магнітного потоку контуру є вірним, але є лише наслідком перетинання провідниками магнітних силових ліній і винятком у загальному випадку. Фізичною причиною виникнення ЕРС є перетинання провідником магнітних силових ліній – за твердженням Фарадея.

5. Урахування умов Фарадея (наприклад, у формі виразів (1), (2), (5), (6) з використанням перемикаючих функцій P , чи у вигляді лінгвістичних обмежень) виключає "парадокси" і дозволяє:

- отримати в уніполярних генераторах "математично невірний" результат $\Phi = 0 = \text{const}$ при наведенні постійної ЕРС $e = -P \cdot d\Phi/dt = E = \text{const}$, $P = 1$;

- вилучити зростання до "нескінченності" магнітного потоку контуру в уніполярних машинах при ЕРС $e = -P \cdot d\Phi/dt = E = \text{const}$, $P = 1$, бо це зростання у формі $\Phi = -Et$ слід розглядати як результат безперервної роботи машини у часі при "нескінченній" величині індуктора;

- застосувати у математичній залежності (1) зміну магнітного потоку контуру $d\Phi$ лише у випадку, коли вона тотожно дорівнює швидкості перетинання провідником магнітних силових ліній.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навчальний посібник: у 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001. – 448 с.

2. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электротехнику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
3. Гончаренко С.У. Фізика: Довідкові матеріали для абітурієнтів. – К.: Либідь, 1996. – 208 с.
4. Дмитрієва В.Ф. Фізика: Навчальний посібник. – К.: Техніка, 2008. – 648 с.
5. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романішин Б.М. Курс фізики: Навчальний підручник. – Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2002. – 376 с.
6. Крыжановский В.Г. Физика. Справочник школьника и студента. – Донецк: ООО ПКФ "БАО", 2008. – 464 с.
7. Кутковецкий В.Я., Запорожец Ю.М. Взаимодействие проводника с магнитным полем // Электричество. – 1996. – №9. – С. 60-62.
8. Кутковецкий В.Я. Закон електромагнітної індукції // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 34-39.
9. Лившиц А.Л. Униполярный генератор постоянного тока. Авт. свидетельство СССР №104347, класс 21 d, 6 49m от 28.11.1951. – 3 с.
10. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.
11. Парсел Э. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1975. – 440 с.

REFERENCES

1. Bushok G.F., Levandovskiy V.V., Piven G.F. *Kurs fiziki: Navchalniy posibnik: u 2 kn. Kn. 1. Fizichni osnovi mehaniki. Electrica i magnetism* [Physics course: Tutorial: in 2 vols. Vol.1. Physical principles of mechanics. Electricity and Magnetism]. Kyiv, Libid Publ., 2001. 448 p. (Ukr).
2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postojannogo toka i transformatory* [Electrical machines. Introduction into electrical engineering. DC machines and transformers]. St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p. (Rus).
3. Goncharenko S.U. *Fizika: Dovidkovi materialy dlya abiturientiv* [Physics: Reference materials for entrants]. Kyiv, Libid Publ., 1996. 208 p. (Ukr).
4. Dmitrieva V.F. *Fizyka: Navchal'nyy posibnyk* [Physics: Tutorial]. Kyiv, Tehnika Publ., 2008. 648 p. (Ukr).

5. Zachek I.P., Kravchuk I.M., Romanishin B.M. *Kurs fiziki: navchalniy pidruchnik* [Physics course: Training Tutorial]. Lviv, Beskid Bit Publ., 2002. 376 p. (Ukr).
6. Krijanovskiy V.G. *Fizika. Spravochnik shkolnika i studenta* [Physics. Directory of pupils and students]. Donetsk, PKF "BAO" Ltd., 2008. 464 p. (Rus).
7. Kutkovetskiy V.J., Zapozhec Y.M. The interaction of conductor with a magnetic field. *Elektrichestvo – Electricity*, 1996, no.9, pp. 60-62. (Rus).
8. Kutkovetskiy V.J. The law of electromagnetic induction. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 34-39. (Ukr).
9. Livshiz A.L. *Unipolarniy generator postoyannogo toka* [Unipolar DC generator]. Patent USSR, no.104347, 1951, 3 p.
10. Mitkevich V.F. *Magnitniy potok i ego preobrazovaniya* [Magnetic flux and its conversion]. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1946. 258 p. (Rus).
11. Parcel E. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 440 p. (Rus).

Надійшла (received) 25.09.2014

Кутковецкий Валентин Якович, д.т.н., проф.,
 Чорноморський державний університет ім. Петра Могили,
 54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10,
 тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

V.J. Kutkovetskiy

Petro Mohyla Black Sea State University,
 10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine.

Physic basis of electromagnetic induction law.

The statement on the macro level of EMF dependence on change in magnetic flux in time wrong reflects the physical phenomenon of electromagnetic induction law by Faraday, because EMF can be induced if the magnetic flux of the circuit does not change. Changing magnetic flux of the circuit when the electromotive force arises is only a result of crossing the magnetic field lines by conductor and is an exception, which applies only to certain classes of electric machines. References 11, figures 11.

Key words: electromagnetic induction law, Faraday, Maxwell, phenomenon.