

ISSN 2074-272X

науково-практичний
журнал

2017/2



ЕІЕ **Електротехніка і** **Електромеханіка**

Electrical Engineering

& Electromechanics

Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

Електричні машини та апарати

Електротехнічні комплекси та системи.

Силова електроніка

Техніка сильних електричних та магнітних полів.

Кабельна техніка

Електричні станції, мережі і системи

Суміжні галузі

За 2015р. журнал отримав індекс 83.98

від міжнародної наукометричної бази

Index Copernicus



«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом

«Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») у 2002 р.

Співзасновник – Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму

Національної академії наук України» (ДУ «ІТПМ НАНУ»)

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



«ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS»

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Klymenko B.V.	Editor-in-Chief , Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Ukraine
Sokol Ye.I.	Deputy Editor , Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI", Ukraine
Rozov V.Yu.	Deputy Editor , Professor, Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine" (SI "ITPM NASU"), Kharkiv, Ukraine
Batygin Yu.V.	Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine
Bíró O.	Professor, Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria
Bolyukh V.F.	Professor, NTU "KhPI", Ukraine
Doležel I.	Professor, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic
Féliachi M.	Professor, University of Nantes, France
Gurevich V.I.	Ph.D., Honorable Professor, Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, Haifa, Israel
Kildishev A.V.	Associate Research Professor, Purdue University, USA
Kuznetsov B.I.	Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine
Kyrylenko O.V.	Professor, Member of NAS of Ukraine, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Podoltsev A.D.	Professor, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Rainin V.E.	Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia
Rezynkina M.M.	Professor, SI "ITPM NASU", Kharkiv, Ukraine
Rozanov Yu.K.	Professor, Moscow Power Engineering Institute, Russia
Shkolnik A.A.	Ph.D., Central Electrical Laboratory of Israel Electric Corporation, member of CIGRE (SC A2 - Transformers), Haifa, Israel
Yufarov V.B.	Professor, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Ukraine
Vinitzki Yu.D.	Professor, GE EEM, Moscow, Russia
Zagirnyak M.V.	Professor, Corresponding member of NAES of Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskyi National University, Ukraine
Zgraja J.	Professor, Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology, Poland

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

Клименко Б.В.	головний редактор , професор, НТУ "ХПІ"
Сокол Є.І.	заступник головного редактора , член-кор. НАНУ, ректор НТУ "ХПІ"
Розов В.Ю.	заступник головного редактора , член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ"
Гречко О.М.	відповідальний секретар , к.т.н., НТУ "ХПІ"
Баранов М.І.	д.т.н., НДПКи "Молнія" НТУ "ХПІ"
Боев В.М.	професор, НТУ "ХПІ"
Веприк Ю.М.	професор, НТУ "ХПІ"
Гриб О.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Гурин А.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Данько В.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Жемеров Г.Г.	професор, НТУ "ХПІ"
Клепиков В.Б.	професор, НТУ "ХПІ"
Кравченко В.І.	професор, директор НДПКи "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"
Сосков А.Г.	професор, ХНУМГ імені О.М. Бекетова,
Ткачук В.І.	професор, НУ "Львівська Політехніка"
Шинкаренко В.Ф.	професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

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

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

Klymenko B.V.	Editor-in-Chief , professor, NTU "KhPI"
Sokol Ye.I.	Deputy Editor , corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI"
Rozov V.Yu.	Deputy Editor , corresponding member of NAS of Ukraine, Director of SI "ITPM NASU"
Grechko O.M.	Executive Managing Editor , Ph.D., NTU "KhPI"
Baranov M.I.	Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI"
Boev V.M.	Professor, NTU "KhPI"
Veprik Yu.M.	Professor, NTU "KhPI"
Gryb O.G.	Professor, NTU "KhPI"
Guryn A.G.	Professor, NTU "KhPI"
Dan'ko V.G.	Professor, NTU "KhPI"
Zhemerov G.G.	Professor, NTU "KhPI"
Klepikov V.B.	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"
Soskov A.G.	Professor, O.M. Beketov National University
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. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +38 057 7076281, +38 067 3594696, e-mail: a.m.grechko@gmail.com (Гречко Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

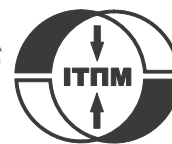
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2017

© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2017

Підписано до друку 28.04.2017 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-02-2017. Ціна договірна.

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славені імена

Баранов М.І. Антологія видатних досягнень в науці та техніці. Частина 37: Лауреати Нобелівської премії по фізиці за 2000-2004 гг. 3

Електричні машини та апарати

Gerlici J., Шведчикова І.А., Никитченко І.В., Романченко Ю.А. Исследование влияния конфигурации магнитной системы сепаратора на постоянных магнитах на распределение магнитного поля в рабочей зоне ... 13

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

Болух В.Ф., Кочерга А.І., Олексенко С.В., Щукін І.С. Методика експериментальних досліджень лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів 18

Кузнецов Б.І., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Бовдуй І.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Синтез систем активного екранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи различного конструктивного исполнения с учетом особенностей пространственно-временного распределения магнитного поля 29

Никитина Т.Б. Парето-оптимальное решение многокритериальной задачи синтеза робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем на основе многокритерийной стохастической мультиагентной оптимизации 34

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

Гринченко В.С., Ткаченко А.О., Гринченко Н.В. Повышение точности расчета токов в экранах кабелей при двустороннем заземлении трехфазной кабельной линии 39

Чулеева Е.В., Золотарев В.М. Исследование влияния дигидрата оксида магния на показатели горючести полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом 43

Електричні станції, мережі і системи

Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Разработка нечеткой нейронной сети для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов 49

Руденко С.С., Колішко Д.Г., Кашев О.В. Визначення напрямку реконструкції заземлювального пристрою 57

Суміжні галузі

Будашко В.В. Розробка тривірневої багатокритеріальної стратегії управління гібридною судновою енергетичною установкою комбінованого пропульсивного комплексу 62

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 37: Nobel Prize Laureates in Physics for 2000-2004. 3

Electrical Machines and Apparatus

Gerlici J., Shvedchikova I.A., Nikitchenko I.V., Romanchenko J.A. Investigation of influence of separator magnetic system configuration with permanent magnets on magnetic field distribution in working area 13

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Oleksenko S.V., Schukin I.S. A technique of experimental investigations of linear impulse electromechanical converters 18

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Synthesis of active screening system of magnetic field of high voltage power lines of different design taking into account spatial and temporal distribution of magnetic field 29

Nikitina T.B. Pareto optimal solution of multiobjective synthesis of robust controllers of multimass electromechanical systems based on multiswarm stochastic multiagent optimization 34

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

Grinchenko V.S., Tkachenko O.O., Grinchenko N.V. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line 39

Chuleyeva E.V., Zolotaryov V.M. Study of the influence of magnesium hydroxide on the combustibility performance of polymer compositions based on ethylene vinyl acetate copolymer.....	43
--	----

Power Stations, Grids and Systems

Bondarenko V.E., Shutenko O.V. Development of fuzzy neural network for the interpretation of the results analysis dissolved in oil gases	49
Rudenko S.S., Koliushko D.G., Kashcheyev O.V. Determination of direction to reconstruction of grounding system	57

Related areas

Budashko V.V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex	62
--	----

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2017 рік – 289,26 грн., на два місяці – 48,21 грн., на чотири місяці – 96,42 грн., на шість місяців – 144,63 грн., на вісім місяців – 192,84 грн., на десять місяців – 241,05 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано Наказом МОН України № 1328 від 21 грудня 2015 р. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

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

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

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

Починаючи з №1 за 2016 р. усі статті на сайті доступні на двох мовах – обов'язково англійською, а також російською або українською. Також кожній статті в журналі присвоюється унікальний цифровий ідентифікатор DOI (Digital Object Identifier) від організації Crossref (<http://crossref.org/>).

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 Web of Science Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI), Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИНЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, GALE General Science Collection та Academic OneFile, DOAJ та ін.



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

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 37: ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ ЗА 2000-2004 гг.

Наведено короткий аналітичний огляд основних наукових досягнень вчених світу, які відмічені Нобелівською премією по фізиці за період 2000-2004 рр. У число таких досягнень увійшли розробка напівпровідникових гетероструктур для високочастотної техніки і оптоелектроніки, винахід інтегральної мікросхеми, отримання конденсації Бозе-Ейнштейна в розріджених газах лужних металів, виявлення космічних нейтрино, відкриття космічних джерел рентгенівського випромінювання, розробка теорії надпровідників і надтекучих рідин і відкриття асимптотичної свободи в теорії сильних взаємодій елементарних частинок. Бібл. 36, рис. 16.

Ключові слова: сучасна фізика, досягнення, напівпровідникова гетероструктура, інтегральна мікросхема, конденсація Бозе-Ейнштейна в розріджених газах лужних металів, космічні нейтрино, космічні джерела рентгенівського випромінювання, теорія надпровідників і надтекучих рідин, асимптотична свобода в теорії сильних взаємодій елементарних частинок.

Приведен краткий аналитический обзор выдающихся научных достижений ученых мира, отмеченных Нобелевской премией по физике за период 2000-2004 гг. В число таких достижений вошли разработка полупроводниковых гетероструктур для высокочастотной техники и оптоэлектроники, изобретение интегральной микросхемы, получение конденсации Бозе-Эйнштейна в разреженных газах щелочных металлов, обнаружение космических нейтрино, открытие космических источников рентгеновского излучения, разработка теории сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей и открытие асимптотической свободы в теории сильных взаимодействий элементарных частиц. Библ. 36, рис. 16.

Ключевые слова: современная физика, достижения, полупроводниковая гетероструктура, интегральная микросхема, конденсація Бозе-Ейнштейна в разреженных газах щелочных металлов, космические нейтрино, космические источники рентгеновского излучения, теория сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей, асимптотическая свобода в теории сильных взаимодействий элементарных частиц.

Введение. Нобелевские премии являются уникальными международными наградами, престиж которых в мире чрезвычайно высок. Нобелевскому лауреату в торжественной обстановке в присутствии короля Швеции 10 декабря ежегодно, начиная с 1901 г., вручается диплом, золотая медаль (рис. 1) и крупное денежное вознаграждение, сумма которого с годами изменялась. На лицевой стороне медали изображен профиль известного шведского инженера-бизнесмена Альфреда Нобеля (1833-1896 гг.), а на оборотной – по ее периметру надпись «Способствует облагораживанию жизни открытиями в области искусств» [1]. Эта надпись была взята из стиха «Энеиды» римского поэта Марона Вергилия (70-19 гг. до н.э.). Там же изображена природа в образе богини, сходящей с облаков и держащей в руке «рог изобилия». Ее вуаль приподнимает женщина, олицетворяющая «гений науки».



Рис. 1. Внешний вид золотой медали лауреата Нобелевской премии по физике (слева – лицевая сторона медали, а справа – оборотная; диаметр медали – 65 мм, а вес – 205 г.) [1]

Для первого Нобелевского лауреата по физике за 1901 г. Вильгельма Конрада Рентгена (1845-1923 гг.)

размер денежного вознаграждения составлял 150 тыс. шведских крон. В 2005 г. эта сумма составляла уже 10 млн. этих крон или около 1,3 млн. долларов США [1].

1. Создание полупроводниковых гетероструктур для высокочастотной техники и оптоэлектроники. В 2000 г. Нобелевской премии по физике были удостоены результаты важных исследований россиянина Жореса Алфёрова (рис. 2), немца Герберта Крёмера (рис. 3) и американца Джека Килби (рис. 4).



Рис. 2. Выдающийся российский физик, академик АН СССР и РАН Жорес Иванович Алфёров (1930 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2000 г.

Первых два физика-экспериментатора (российский Ж.И. Алфёров и немецкий Г. Крёмер) этой

© М.И. Баранов

высокой премии были удостоены «за развитие физики полупроводниковых гетероструктур для высокочастотной техники и оптоэлектроники», а третий физик (американский инженер-изобретатель Дж.К. Килби) – «за вклад в открытие интегральной схемы» [1-4].

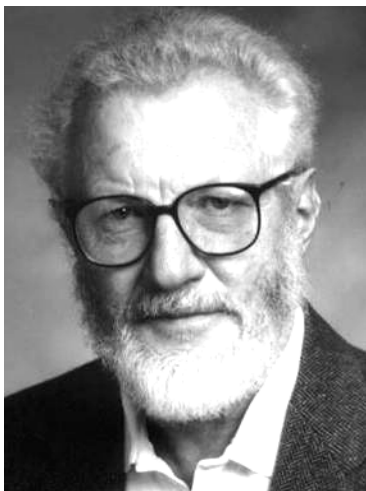


Рис. 3. Выдающийся немецкий физик-теоретик и экспериментатор Герберт Крёмер (Herbert Krömer, 1928 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2000 г.

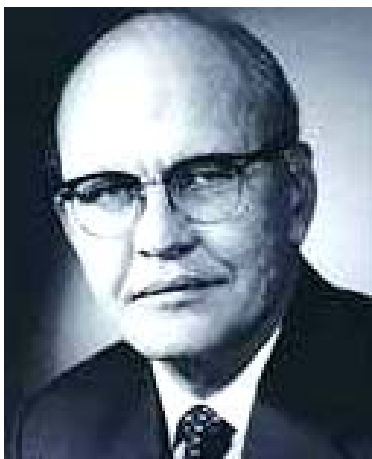


Рис. 4. Американский физик и инженер-изобретатель Джек Клейр Килби (Jack Kleyn Kilby, 1923 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2000 г.

Нобелевские лауреаты по физике Ж.И. Алфёров и Г. Крёмер стали одними из основателей современной информационной быстродействующей техники, способной передавать большой объем информации за короткий промежуток времени. Именно для этой техники они открыли и создали быстродействующие опто- и микроэлектронные устройства на базе полупроводниковых *гетероструктур* [2-4]. Данные устройства включают быстродействующие транзисторы, лазерные диоды для систем передачи информации в оптоволоконных сетях и мощные эффективные светолучающие диоды. Общеизвестно, что большинство полупроводниковых приборов основано на использовании *p-n*- перехода, образующегося между поверхностями (частями) одного и того же полупроводника с разными типами его проводимости («электронной» или «дырочной»), создаваемыми за счет внедрения (введения) в них (эти поверхности или части) соот-

ветствующих примесей (например, атомов фосфора Р или бора В) [5, 6]. Напомним, что транзисторный эффект был открыт в 1947 г. американскими физиками Джоном Бардиным (1908-1991 гг.), Уолтером Браттейном (1902-1987 гг.) и Уильямом Брэдфордом Шокли (1910-1989 гг.), а первые в мире полупроводниковые устройства-транзисторы с *p-n-p* переходом (кристаллические германиевые триоды-усилители с точечным контактом) были созданы в 1949 г. [4]. В 1956 г. указанным ученым-физикам США «за исследование полупроводников и открытие транзисторного эффекта» была присуждена Нобелевская премия по физике [1]. Кроме того, У.Б. Шокли в 1949 г. предсказал возможность осуществления полупроводникового диода с *p-n*- переходом и разработал его теорию, а в 1951 г. он предложил использовать в транзисторах *гетеропереходы* [1]. *Гетеропереход* в полупроводниковой структуре является, по существу, контактной зоной между двумя разными по своему химическому составу полупроводниками с различными ширинами их запрещенных энергетических зон [4, 7]. Практическая реализация *гетеропереходов* давала возможность создания электронных и оптоэлектронных приборов чрезвычайно малых размеров вплоть до атомных масштабов. Попытки создания таких высокоэффективных *гетеропереходов* в физике и технике полупроводников долгие годы оставались безрезультатными. Для создания идеального *гетероперехода* физикам необходимо было подобрать два разных полупроводника с практически одинаковыми на атомарном уровне размерами элементарных ячеек их кристаллических решеток. Первому в мире решить эту проблемную физико-техническую задачу в конце 1960-х годов удалось нашему отечественному ученому – тогда еще к.ф.-м.н. Ж.И. Алфёрову (свою кандидатскую диссертацию, посвященную получению сверхчистых германиевых и кремниевых кристаллов, он защитил в 1961 г.), работавшему во всемирно известном Ленинградском физико-техническом институте (ЛФТИ) им А.Ф. Иоффе [4, 8]. Заметим, что позже с 1987 по 2003 гг. д.ф.-м.н. (свою докторскую диссертацию он защитил в 1970 г. в ЛФТИ по результатам исследований *гетеропереходов* в полупроводниках) Ж.И. Алфёров, став в 1979 г. академиком РАН (в период 1990-2013 гг. он был также вице-президентом АН СССР и РАН), был директором этого института [8, 9]. Он со своими коллегами по ЛФТИ им. А.Ф. Иоффе к 1970 г. на основе галлия Ga и мышьяка As создал эффективный *гетеропереход* из полупроводников с близкими периодами кристаллической решетки – вида GaAs и далее, используя алюминий Al, – тройное полупроводящее соединение с *гетеропереходом* вида AlGaAs [4]. Развитие технологии получения *гетеропереходов* путем эпитаксиального роста в вакууме кристаллической пленки одного полупроводника на поверхности другого привело в мире к дальнейшей миниатюризации радиоэлектронных устройств вплоть до нанометрических размеров [4, 8]. Было установлено, что в полупроводниковой активной среде с линейными размерами (толщиной) от 50 мкм до 1 мм можно было добиваться очень больших показателей оптического усиления света, необходи-

мых для создания в области квантовой электроники мощного лазерного излучения. Следует отметить, что в полупроводниковых лазерах используются квантовые переходы между энергетическими уровнями *гетероструктурного* полупроводника [8]. Однако, физики долго не могли решить очень важную проблему, связанную с тем, что полупроводниковые лазеры устойчиво работали только при низких температурах. Так, первые полупроводниковые лазеры, созданные на соединениях галлия Ga и мышьяка As, работали в низкотемпературном диапазоне от 4 до 20 К [8]. Благодаря разработкам Ж.И. Алфёрова полупроводниковые лазеры надежно заработали (с 1969 г.) и при комнатных температурах. Советские ученые-физики, активно работавшие рядом с Ж.И. Алфёровым, понимали, что в условиях острой конкуренции с западными фирмами соответствующие отечественные разработки в области физики и техники полупроводников необходимо было выполнять в крайне сжатые сроки. На примере самоотверженного труда выдающегося ученого-физика современности Ж.И. Алфёрова убеждаешься, что успех в жизни и науке приходит не просто к талантливому человеку, а к талантливому и трудолюбивому человеку [2, 4, 9]. Невиданные перспективы открываются сейчас перед людьми благодаря новым способам обработки и передачи информации, включая оптоэлектронику. На смену микроэлектронике приходит наноэлектроника. Свой весомый вклад в эти важнейшие области физики внесли указанные нобелевские лауреаты за 2000 г. [1].

Укажем, что в 1952 г. Г. Крёмер защитил докторскую диссертацию в Гёттингенском университете на тему, связанную с изучением эффекта «горячих» электронов в транзисторах [3]. В 1950-х годах им была разработана теория биполярного транзистора, выполненного на основе *гетероструктур* и который мог работать в гигагерцовом частотном диапазоне. В 1963 г. он независимо от советского ученого-физика Ж.И. Алфёрова разработал физические основы построения полупроводниковых лазеров, использующих двойные *гетероструктуры*. Данные разработки на многие годы опережали развитие радио- и квантовой электроники [3]. Свое практическое применение они нашли лишь в период 1970-1980-х годов с развитием в мире атомной (молекулярной) *эпитаксии* – ориентированного роста в вакууме одного кристалла на поверхности другого (подложке) [3, 10]. В середине 1970-х годов Г. Крёмер, работая профессором Калифорнийского университета (г. Санта-Барбара, США), с помощью метода молекулярной *эпитаксии* изучал новые комбинации полупроводниковых *гетероструктур* на кремниевой подложке, включающие галлий Ga и фосфор P – соединение вида GaP, а также предложенное Ж.И. Алфёровым в ЛФТИ им. А.Ф. Иоффе соединение вида GaAs. С 1985 г. Г. Крёмер свои научные интересы направил на изучение других полупроводниковых *гетероструктур*, включающих комбинации индия In с мышьяком As – соединение вида InAs, галлия Ga с сурьмой Sb – соединение вида GaSb и алюминия Al с сурьмой Sb – соединение вида AlSb [3, 8].

2. Создание интегральной схемы. Прежде всего, следует заметить, что под *интегральной схемой* в

слаботочной электронике понимается микроминиатюрное электронное устройство, элементы которого нераздельно связаны между собой конструктивно, технологически и электрически [10]. Микроэлектроника, выросшая на интегральных схемах, стала основой многих современных технологий. Поэтому недаром 1/2 часть Нобелевской премии по физике за 2000 г. в области фундаментальных работ по информационным и коммуникационным технологиям Шведская Королевская академия наук присудила американскому физика и изобретателю Дж. К. Килби (компания Texas Instruments, г. Даллас, США) за изобретение интегральной микросхемы. А начиналось вся эта работа в 1958 г., когда Дж. К. Килби создал первую простейшую интегральную схему на кристалле германия. В феврале 1959 г. он подал в Патентное ведомство США заявку на интегральную схему (патент ему был выдан в 1964 г.), в которой транзистор изготавливался с послойно выполненными *p-n-p* или *n-p-n* переходами [1, 8]. Фундаментальная разработка талантливого физика и инженера-изобретателя Дж. К. Килби оказалась истинно бесценной для бурного развития во всем нашем мире современных информационных технологий. В настоящее время на микрочипах (микросхемах) выпускается широчайший ассортимент электронных аппаратов, начиная от часов до компьютеров, управляющих сложными наземными и космическими объектами. По меткому высказыванию члена указанной выше Академии наук Г. Гриммиса [8]: «... *Без разработок Дж. К. Килби по интегральным микросхемам невозможно было бы создание персональных компьютеров, а без разработок Ж.И. Алфёрова и Г. Крёмера по полупроводниковым гетероструктурам было бы невозможным быстро передавать огромные потоки информации через спутники связи*».

3. Открытие конденсации Бозе-Эйнштейна. Очередным проникновением пытливого ума человеческого в тайны окружающего нас микромира материи стало открытие в 1995 г. американскими и немецкими физиками-экспериментаторами нового состояния вещества в экстремальных температурных условиях – *Бозе-Эйнштейновского конденсата* [11]. Этими учеными-первопроходцами стали талантливые физики – американцы Эрик Аллин Корнелл (рис. 5), Карл Виман (рис. 6) и немец Вольфганг Кеттерле (рис. 7) [1].



Рис. 5. Выдающийся американский физик-экспериментатор Эрик Аллин Корнелл (Eric Allin Cornell, 1961 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2001 г.

Материальная субстанция, впервые полученная опытным путем работавшими в различных американских научно-исследовательских учреждениях (Э.А. Корнелл в Национальном институте стандартов; К. Виман в Колорадском университете; В. Кеттерле в Массачусетском технологическом институте) указанными учеными-физиками в результате так называемой конденсации Бозе-Эйнштейна при сверхнизких температурах (около $20 \cdot 10^{-9}$ К), в природе сама по себе не существует [12-15]. Возможность существования вещества в таком новом физическом состоянии предсказали еще в 1920-х годах выдающиеся физики-теоретики из Индии Шатъендранат Бозе (1894-1974 гг.) и Германии Альберт Эйнштейн (1879-1955 гг.) [1, 16]. В июне 1995 г. Э.А. Корнелл и К. Виман экспериментально получили маленькое «пятнышко» субстанции Бозе-Эйнштейна, состоящее из 2000 переохлажденных атомов щелочного элемента рубидия Rb.



Рис. 6. Выдающийся американский физик-экспериментатор Карл Виман (Carl Wieman, 1951 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2001 г.



Рис. 7. Выдающийся немецкий физик-экспериментатор Вольфганг Кеттерле (Wolfgang Ketterle, 1957 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2001 г.

Для получения конденсации Бозе-Эйнштейна в газе этого металла, для которой характерным является то, что при очень низкой конечной температуре практически все входящие в ее состав атомы (молекулы) заполняют один энергетический уровень, соответствующий их нулевому импульсу (количеству движения), данные физики-экспериментаторы «улавливали» атомы щелочного химического элемента рубидия Rb

«магнитными ловушками», а затем путем их (атомов) сверхглубокого охлаждения (до температур порядка 10^{-5} К) «паутиной» из лазерных лучей резко замедляли их движение [15]. Заметим, что в используемых ими «магнитных ловушках» исключалось взаимодействие этих атомов со стенками низкотемпературного сосуда (роль стенки такого сосуда при этом играло магнитное поле параболической конфигурации). Используя далее технику физического эксперимента, похожую на обычное выпаривание («метод испарительного охлаждения»), эти физики избавлялись от самых «горячих» (быстрых) атомов и работали с указанными атомами в состоянии, близком к абсолютно нулю температуры (при температурах порядка 10^{-8} К) [11, 15]. В результате таких сверхтонких оптических манипуляций (в рабочий объем конденсируемого газа вводить ничего другого материального было нельзя – в противном случае «погибала» уникальная конденсируемая среда [17]) на атомарном уровне им при фантастически низкой температуре (около $2 \cdot 10^{-8}$ К) удалось получить бозе-эйнштейновскую конденсацию разреженного газа с атомами рубидия Rb [15, 17]. В 1995 г., несколькими месяцами спустя, В. Кеттерле удалось не только повторить научные результаты Э.А. Корнелла и К. Вимана, но и получить при использовании в подобных низкотемпературных опытах другого щелочного элемента из периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева натрия Na значительно большее количество бозе-эйнштейновского конденсата (до 10^5 переохлажденных атомов этого элемента) [17]. Кроме того, в 1997 г. В. Кеттерле при изучении этого уникального бозе-эйнштейновского конденсата разреженного газа щелочного металла (с его плотностью порядка 10^{21} м^{-3}) показал, что поведение атомов натрия Na в таком конденсате полностью согласовано и в нем сгусток этих атомов колеблется в унисон и когерентно. Ему удалось под действием сил земной гравитации сформировать из нового агрегатного состояния вещества своего рода лазерный «атомарный луч», состоящий не из световых квазичастиц (фотонов), а из микрочастиц, обладающих массой покоя [15]. Профессор физики Даниэл Клеппнер об открытии конденсации Бозе-Эйнштейна сказал следующие примечательные слова [15]: «... Демонстрация того факта, что атомы могут существовать в своего рода квантовомеханическом унисонном состоянии окажет значительное влияние на многие разделы физического знания. Картина слияния атомных волн и реализация, так сказать, атомного лазера поразили научное воображение множества физиков». Ученым-физикам понадобилось фактически 70 лет, чтобы экспериментально подтвердить теорию конденсата Бозе-Эйнштейна, предложенную в 1924-1925 гг. [1, 4]. Где может найти прикладное применение данное новое открытие выдающихся ученых-физиков? Прежде всего, при создании сверхпрецизионных атомных часов, ультраминиатюрных электронных схем и квантовых компьютеров, обладающих невообразимым быстродействием [15, 17]. В 2001 г. Э.А. Корнелл, К. Виман и В. Кеттерле «за экспериментальное наблюдение бозе-эйнштейновской конденсации в разреженных газах

атомов щелочных металлов и за первые фундаментальные исследования свойств таких конденсатов» были удостоены Нобелевской премии по физике [1]. Об этом важном событии в мире науки академик РАН Ю.М. Каган (РНИИ «Курчатовский институт», РФ) сказал [17]: «... Нобелевской премией по физике за 2001 г. были отмечены выдающиеся работы, которым суждено сыграть заметную роль в современной науке».

4. Обнаружение космических нейтрино. В 2002 г. очередными лауреатами Нобелевской премии по физике стали американский физик-химик Раймонд Дэвис-младший (мл.) (рис. 8) и японский физик-экспериментатор Масатоси Косиба (рис. 9) «за создание нейтринной астрономии» и итальянский физик-экспериментатор Риккардо Джаккони (рис. 10) «за открытие космических источников рентгеновского излучения» [18]. После защиты в 1942 г. в Йельском университете США докторской диссертации по теме из области физической химии и службы в армии США, связанной с испытаниями химического оружия, Р. Дэвис-мл. оказался в Брукхейвенской национальной лаборатории, занимающейся проблемами мирного использования атомной энергии [19]. Вот здесь он и решил вплотную заняться физикой *нейтрино* – одной из девяти абсолютно стабильных частиц [1, 20].



Рис. 8. Выдающийся американский физик-химик Раймонд Дэвис-младший (Raymond Davis Jr., 1914-2006 гг.), лауреат Нобелевской премии по физике за 2002 г.



Рис. 9. Выдающийся японский физик-экспериментатор Масатоси Косиба (Masatoshi Koshiba, 1926 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2002 г.

Отметим, что в конце 1940-х годов *нейтрино* существовали только в виде теоретического постулата. Экспериментальных результатов в физике элементарных частиц на эту тему в мире еще не было. В своих первых ядерных экспериментах Р. Дэвис-мл. решил воплотить идею от 1946 г. итальянского физика-теоретика Бруно Понтекорво (1913-1993 гг.), ставшего позже известным советским физиком в области ядерной физики (академиком АН СССР с 1964 г. и РАН с 1991 г.) [1]. Эта идея заключалась в регистрации *нейтрино*, возникающих в активной зоне ядерных реакторов, при помощи ядерной реакции следующего вида [1, 19]: ${}_{17}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}_{18}^{37}\text{Ar} + e^-$. Эта реакция, включающая захват изотопом хлора электронного *нейтрино* ν_e , должна была приводить к образованию изотопа аргона и электрона e^- . В 1955 г. в качестве хлорсодержащей среды, улавливающей *нейтрино* ν_e , им была использована емкость объемом гораздо более $3,78 \text{ м}^3$, наполненная тетрахлаорметаном и размещенная вблизи энергетического ядерного реактора на объекте США в районе Саванна Ривер Сайт [19]. Однако, в данных схемах детектирования *нейтрино* ν_e конечный результат для ученых оказался отрицательным по той причине, что в используемых ядерных реакторах возникали *антинейтрино* $\bar{\nu}_e$, а экспериментальная установка Р. Дэвиса-мл. была чувствительна лишь к *нейтрино* ν_e . Тем не менее, целеустремленный Р. Дэвис-мл. в 1960-х годах решил использовать разработанную им экспериментальную методику для обнаружения и измерения солнечных (космических) *нейтрино* ν_e в радиационном потоке от Солнца. С этой целью им в глубокой шахте Хоумстейк, расположенной вблизи г. Лид (штат Южная Дакота, США), на глубине 1400 м была смонтирована установка с хлорсодержащей жидкостью (перхлорэтиленом) уже объемом 378 м^3 [19]. В 1970 г. с помощью этой уникальной экспериментальной установки и хлор-аргонного метода детектирования элементарных частиц Р. Дэвис-мл. смог впервые в мире зарегистрировать солнечные *нейтрино* ν_e . При этом он опытным путем показал, что скорость ядерной реакции вида ${}_{17}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}_{18}^{37}\text{Ar} + e^-$ составляет $2,1 \pm 0,3$ солнечных нейтринных единиц (это было эквивалентно протеканию в хлорсодержащей емкости указанного объема одного акта ядерного взаимодействия в 1 с на 10^{36} атомов ядерной мишени) [1]. Вероятность наступления такого ядерного акта взаимодействия была ничтожно малой. Р. Дэвис-мл. смог убедить мировое научное сообщество в реальном существовании в микромире материи событий, происходящих с частотой несколько десятков раз в месяц. Поэтому Р. Дэвис-мл. по праву считается одним из основоположников нейтринной астрофизики.

В 1955 г. М. Косиба, закончивший в 1951 г. Токийский университет, защитил докторскую диссертацию в Рочестерском университете США по теме, посвященной сверхвысокоэнергетическим явлениям в космических лучах [21]. В 1970-х годах эти научные занятия и интересы в области физики высоких энергий привели М. Косибу к попытке углубления наших знаний о таких представителях микромира материи как *мюоны* и *нейтрино* [20]. Сконструированный им

детектор элементарных частиц «Kamiokande», первоначально предназначенный для регистрации в рамках выполняемого на ускорителе протонов DESY (г. Гамбург, Германия) немецко-японского проекта JADE продуктов распада на ядерной мишени ускоренных протонов, он использовал для детектирования космических *нейтрино* ν_e [21]. В процессе взрыва в космосе сверхновой звезды 1987A ему удалось на указанном детекторе зарегистрировать 12 шт. космических *нейтрино* ν_e , причем девять из них он зафиксировал в первые две секунды этого грандиозного космического явления. Эти экспериментальные результаты явились первыми прямыми опытными данными, подтверждающими ранее разработанные астрофизиками теории процессов, происходящих при коллапсах звезд нашей Вселенной. В частности, теорию «нейтринного охлаждения» этих регулярно наблюдаемых нами на ночном небосклоне «живущих» миллиарды лет и когда-то все же «умирающих» уникальных по размерам и внутренним процессам космических объектов [22].

5. Открытие космических источников рентгеновского излучения. Начнем с того, что укажем, что в 1960 г. ученым-астрономам удалось впервые получить изображение Солнца в рентгеновском диапазоне. В 1962 г. группе ученых США, в составе которых был будущий нобелевский лауреат Р. Джаккони, с помощью установленного на запущенной и просуществовавшей в околоземном пространстве около 6 мин. ракете счетчика Гейгера [1, 20], удалось открыть первый источник рентгеновского излучения вне Солнечной системы (звезда X-1 в созвездии Скорпиона) [23].



Рис. 10. Выдающийся итальянский физик-астроном Риккардо Джаккони (Riccardo Giacconi, 1931 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2002 г.

Вдохновленный этим успехом Р. Джаккони инициировал разработку и создание спутника «UHURU» (это название в переводе с африканского языка «суахили» означает «СВОБОДА» [10, 23]) для рентгеновской астрономии, запущенного на околоземную орбиту в 1970 г. Этот спутник США оказался наиболее технически совершенным в мире астрономическим аппаратом в 1970-е годы [23]. Именно с его помощью ученым-астрономам удалось открыть в космическом пространстве более 400 новых астрономических объектов, в том числе первые «рентгеновские пульсары» и «черные дыры» [24]. Новым успехом Р. Джаккони

стал запуск в 1978 г. созданной под его научным руководством в США орбитальной рентгеновской обсерватория «EINSTEIN» (это название она получила в честь выдающегося немецко-американского физика-теоретика Альберта Эйнштейна [1, 16]). Чувствительность рентгеновской аппаратуры данной обсерватории была настолько высокой, что она позволяла обнаруживать в открытом космосе объекты со светимостью в миллионы раз слабее, чем от указанной нами выше звезды X-1. В 1990 г. под научным руководством Р. Джаккони был создан и выведен на околоземную орбиту самый крупный в мире космический телескоп «HUBBLE», названный в честь знаменитого американского астронома Эдвина Пауэлла Хаббла (1889-1953 гг.) [24]. После устранения в 1993 г. американскими астронавтами допущенных при его сборке в земных условиях ошибок и вызванных ими неисправностей в его работе на полученных с его помощью и переданных на Землю уникальных снимках перед человечеством в цвете предстала совершенно новая, великолепная по четкости и разрешению величественная картина нашей Вселенной [23]. В 1999 г. снова под вдохновляющим творческим началом Р. Джаккони в США была построена новая космическая рентгеновская обсерватория «CHANDRA», получившая свое название в честь известного американского астрофизика и лауреата Нобелевской премии по физике за 1983 г. («за исследования строения и эволюции звезд») С. Чандрасеккара (1910-1995 гг.) [1, 23]. За несколько лет работы на околоземной орбите ее уникальная аппаратура позволила обнаружить сверхмассивные «черные дыры» в ядрах ряда галактик и рентгеновские «пульсары», а также получить уникальные снимки многих звезд, туманностей и других интересных для землян небесных объектов бесконечной и постоянно поражающей их воображение Вселенной в невидимых человеческим глазом рентгеновских лучах [23]. Научный вклад физика-астронома Р. Джаккони в астрофизику и изобретение им оригинальных рентгеновских телескопов, которые привели к открытию источников интенсивных космических рентгеновских лучей и созданию нового раздела в астрономической науке – рентгеновской астрономии, и был по достоинству оценен в 2002 г. членами Нобелевского комитета при Шведской Королевской академии наук [25].

6. Создание теории сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей. В 2003 г. Нобелевская премия по физике была присуждена трем выдающимся физикам-теоретикам «за пионерский вклад в теорию сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей» [25, 26]. Лауреатами данной престижной премии при этом стали [1]: россиянин-американец Алексей Алексеевич Абрикосов (рис. 11), россиянин Виталий Лазаревич Гинзбург (рис. 12) и англичанин-американец Энтони Джеймс Леггетт (рис. 13). А.А. Абрикосов, работая в Институте физических проблем АН СССР (г. Москва), в 1955 г. защитил докторскую диссертацию в области квантовой электродинамики высоких энергий [26]. Далее он свои творческие усилия направил на разгадку тайн сверхпроводимости вещества. К тому времени тремя выдающимися американскими физиками-теоретиками Джоном Бардиным (1908-1991 гг.), Леоном Купером (1930 г. рождения) и Джоном

Шриффером (1931 г. рождения) уже была создана микроскопическая теория сверхпроводимости материала («теория БКШ»), удостоенная в 1972 г. Нобелевской премии по физике [1, 27]. Данная теория для сверхпроводимости чистых металлов (сверхпроводников I-го рода [26], базирующаяся на идее «куперовских электронных пар», оказалась не состоянием обосновать физические механизмы возникновения этого явления в сплавах (сверхпроводниках II-го рода [26]), имеющих важное технико-практическое применение и сохраняющих сверхпроводящие свойства в условиях действия на них сильных магнитных полей с индукцией 1 Тл и более (для напряженности магнитного поля 10 кЭ и выше) [26–29]. А.А. Абрикосов смог объяснить свойства сверхпроводников II-го рода [26].



Рис. 11. Выдающийся российско-американский физик-теоретик, академик АН СССР и РАН Алексей Алексеевич Абрикосов (1928 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2003 г.

Развивая теоретические подходы, представленные еще в 1950 г. известными советскими учеными-физиками в феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау, он уже в 1952 г. для объяснения этого явления в сверхпроводниках II-го рода воспользовался регулярной решеткой магнитных линий («вихревой решеткой Абрикосова»), окруженных кольцевыми микротоками [30]. Им была выдвинута новая идея о существовании в таких сверхпроводниках сверхтонких областей нормальной фазы [1, 26, 27].



Рис. 12. Выдающийся российский физик-теоретик, академик АН СССР и РАН Виталий Лазаревич Гинзбург (1916–2009 гг.), лауреат Нобелевской премии по физике за 2003 г.

В 1957 г. А.А. Абрикосов, уточняя свои научные построения в рассматриваемой области, разработал теорию, согласно которой в сверхпроводниках II-го рода одновременно существуют нормальная и сверхпроводящая фазы [1, 27]. Он выполнил детальный расчет структуры такого «смешанного» состояния в сверхпроводниках II-го рода, который показал, что нормальная фаза в них зарождается в форме тонких нитей («вихрей Абрикосова»). Эти нити, имеющие толщину, сравнимую с глубиной проникновения Δ_m магнитного поля в сверхпроводник этого рода (как правило, $\Delta_m \approx 10$ нм [27]), пронизывают весь объем материала сверхпроводника. Причем, с увеличением уровня напряженности внешнего магнитного поля концентрация этих нитей в нем возрастает [31]. Возрастает соответственно и зона нормальных областей. При критическом уровне напряженности магнитного поля материал сверхпроводника II-го рода теряет свои сверхпроводящие свойства. В 1960 г. А.А. Абрикосов совместно с будущим академиком АН СССР (с 1987 г.) и РАН (с 1991 г.) Л.П. Горьковым создал теорию применительно к сверхпроводникам, содержащим в своем составе магнитные примеси, а также предсказал новое явление бесщелевой сверхпроводимости [1, 27].

В.Л. Гинзбург, работая с 1940 г. в теоретическом отделе Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН), в 1942 г. (в тяжелые годы для граждан и ученых советской страны и военно-эвакуационный период работы ФИАН в г. Казани) защитил докторскую диссертацию по теории микрочастиц с высшими спинами [32]. Он не один раз просился у соответствующих военных органов уйти на фронт добровольцем, но его просьбы удовлетворены не были (видимо, судьбой ему было предназначено выполнять в жизни что-то другое и не менее важное). С 1943 г. он переключился в ФИАН на тематику, связанную с природой явления сверхпроводимости вещества, не имевшего в то время физического объяснения. В 1950 г. В.Л. Гинзбург совместно с будущим лауреатом Нобелевской премии по физике за 1962 г. («за пионерские исследования в теории конденсированного состояния материи, в особенности жидкого гелия» [1]), академиком АН СССР Львом Давидовичем Ландау была разработана теория сверхпроводимости («теория Гинзбурга-Ландау») [32]. Эта теоретическая разработка считается наиболее весомым научным вкладом В.Л. Гинзбурга в физическую природу явления сверхпроводимости. В 1958 г. В.Л. Гинзбург совместно с будущим академиком АН СССР (с 1990 г.) и РАН (с 1991 г.) Л.П. Питаевским разработал феноменологическую теорию сверхтекучести вещества («теория Гинзбурга-Питаевского») [1, 32]. Исследования в области физики сверхтекучих жидкостей позволяют человечеству глубже проникнуть в сложные и зачастую неизвестные процессы, протекающие в материи при сверхнизких температурах в наиболее низком и упорядоченном энергетическом состоянии ее атомов.

В 1964 г. Э.Дж. Леггетт защитил в Оксфордском университете (г. Оксфорд, Англия) докторскую диссертацию в области физики конденсированного состояния вещества, связанной с высокотемпературной сверхпроводимостью и сверхтекучестью материи, а с

1983 г. работал профессором теоретической физики в Иллинойском университете (г. Иллинойс, США). Укажем, что Э.Дж. Леггеттом была разработана теория сверхтекучести легкого изотопа гелия ^3He при сверхнизких температурах [1]. Им были выполнены глубокие теоретические исследования макроскопической квантовой когерентности и процессов рассеяния волн материи в ряде важных для практики квантовых систем. Он положил начало теоретическим исследованиям макроскопических диссипативных систем и применению специальных конденсированных систем для проверки основных положений квантовой механики (в частности, возможности распространения квантового формализма на макроскопический уровень) [1].

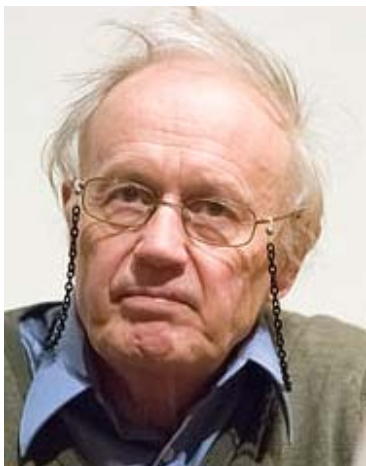


Рис. 13. Выдающийся английско-американский физик-теоретик Энтони Джеймс Леггетт (Anthony James Leggett, 1938 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2003 г.

7. Открытие асимптотической свободы в теории сильных взаимодействий элементарных частиц. Нобелевская премия по физике за 2004 г. была вручена трем американским физикам-теоретикам «за открытие асимптотической свободы в теории сильных взаимодействий» [33]: Дэвиду Джонатану Гроссу (рис. 14), Хью Дэвиду Политцеру (рис. 15) и Фрэнку Антони Вильчеку (рис. 16). В 1966 г. Д.Дж. Гросс защитил докторскую диссертацию по физике в Калифорнийском университете (г. Беркли, США) [33, 34].



Рис. 14. Выдающийся американский физик-теоретик Дэвид Джонатан Гросс (David Jonathan Gross, 1941 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2004 г.

Д.Дж. Гросс в 1973 г. совместно со своим аспирантом-физиком Ф.А. Вильчеком обнаружил «асимптотическую свободу», согласно которой сильное взаимодействие между *кварками* ослабевает с уменьшением расстояния между ними [34, 35]. Заметим, что под «кварками» в физике элементарных частиц понимаются гипотетические частицы (прямым экспериментальным путем они пока никем в мире не зафиксированы) с дробным электрическим зарядом ($1/3$ и $2/3$ от элементарного отрицательного заряда электрона $e^- = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл [20]) [10]. Согласно одной из предложенных гипотез считается, что, возможно, из *кварков* состоят элементарные частицы (*адроны*), участвующие в микромире в сильных взаимодействиях.



Рис. 15. Выдающийся американский физик-теоретик Хью Дэвид Политцер (Hugh David Politzer, 1949 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2004 г.

Согласно теоретическим данным Д.Дж. Гросса и Ф.А. Вильчека, полученным ими в Принстонском университете (г. Принстон, США), в случае очень близкого взаимного расположения *кварков* они должны вести себя как свободные частицы. Именно в этом и состоит открытое физиками-теоретиками явление «асимптотической свободы» для рассматриваемых элементарных частиц нового типа [1]. К аналогичным результатам в теоретических исследованиях взаимодействия *кварков* пришел в 1973 г. и работавший в Гарвардском университете США Х.Д. Политцер [36].



Рис. 16. Выдающийся американский физик-теоретик Фрэнк Антони Вильчек (Frank Anthony Wilczek, 1951 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2004 г.

Дальнейшие события в области физики элементарных частиц и физики высоких энергий показали, что открытое американскими физиками-теоретиками явление «асимптотической свободы» сыграло ключевую роль в развитии квантовой хромодинамики, занимающейся как раз теоретическими аспектами сильных взаимодействий представителей микромира [36].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Алфёров,_Жорес_Иванович.
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Крёмер,_Герберт.
4. [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2000/5\(19\)-2000/19-4](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2000/5(19)-2000/19-4).
5. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Том 38. – Вып. 8. – С. 937-948. doi: 10.1134/1.1787110.
6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 32: Альтернативная энергетика: состояние и перспективы развития // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – №3. – С. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.01.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
8. <http://allrefs.net/c24/22vfk>.
9. Храмов Ю.А. Алфёров Жорес Иванович // Физики: Биографический справочник / Под ред. А.И. Ахиезера. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
10. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
11. <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1171898>.
12. https://ru.wikipedia.org/wiki/Корнелл,_Эрик_Аллен.
13. https://ru.wikipedia.org/wiki/Виман,_Карл.
14. https://ru.wikipedia.org/wiki/Кеттерле,_Вольфганг.
15. <http://www.sbras.ru/HBC/hbc.phtml?8+71+1>.
16. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 34: Открытие и изучение квантово-волновой природы микромира материи // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – №5. – С. 3-15. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.01.
17. http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/01_02/NOBEL2001.HTM.
18. <http://www.afportal.ru/physics/prize/2002>.
19. https://ru.wikipedia.org/wiki/Дэвис,_Раймонд.
20. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
21. https://ru.wikipedia.org/wiki/Косиба,_Масатоси.
22. <http://velchel.ru/index.php?cnt=9>.
23. https://ru.wikipedia.org/wiki/Джаккони,_Риккардо.
24. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 2. – Х.: НТМТ, 2013. – 333 с.
25. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics.
26. <http://n-t.ru/nl/2003.htm>.
27. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
28. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
29. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
30. https://ru.wikipedia.org/wiki/Абрикосов,_Алексей_Алексеевич.
31. <http://elementy.ru/lib/430825/430827>.
32. https://ru.wikipedia.org/wiki/Гинзбург,_Виталий_Лазаревич.
33. <http://www.afportal.ru/physics/prize/2004>.
34. https://ru.wikipedia.org/wiki/Гросс,_Дэвид.
35. https://ru.wikipedia.org/wiki/Вильчек,_Фрэнк.
36. https://ru.wikipedia.org/wiki/Политцер,_Хью_Дэвид.

REFERENCES

1. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
2. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Zhores_Alferov (accessed 15 August 2012).
3. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert_Kroemer (accessed 25 September 2013).
4. Available at: [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2000/5\(19\)-2000/19-4](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2000/5(19)-2000/19-4) (accessed 11 April 2012). (Rus).
5. Alferov Z.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. Solar photovoltaics: Trends and prospects. *Semiconductors*, 2004, vol.38, no.8, pp. 899-908. doi: 10.1134/1.1787110.
6. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 32: Alternative energy: state and prospects of development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 3-16. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.01.
7. Kuhling H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
8. Available at: <http://allrefs.net/c24/22vfk> (accessed 10 July 2011).
9. Khramov Yu.A. *Alferov Zhores Ivanovich. Fiziki: Biograficheskij spravochnik* [Alferov Zores Ivanovich. Physics: Biographical Directory]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 400 p. (Rus).
10. *Bol'shoy illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
11. Available at: <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1171898> (accessed 18 September 2013). (Rus).
12. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Eric_Allin_Cornell (accessed 21 February 2012).
13. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Wieman (accessed 22 May 2012).
14. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Eric_Allin_Cornell (accessed 15 August 2012).
15. Available at: <http://www.sbras.ru/HBC/hbc.phtml?8+71+1> (accessed 03 May 2012). (Rus).
16. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 34: Discovery and study of quantum-wave nature of microscopic world of matter. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.5, pp. 3-15. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.01.
17. Available at: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/01_02/NOBEL2001.HTM (accessed 10 April 2014). (Rus).
18. Available at: <http://www.afportal.ru/physics/prize/2002> (accessed 23 July 2013). (Rus).
19. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Raymond_Davis_Jr (accessed 06 December 2013).
20. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
21. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Masatoshi_Koshiba (accessed 20 May 2012).
22. Available at: <http://velchel.ru/index.php?cnt=9> (accessed 09 October 2012). (Rus).
23. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Riccardo_Giacconi (accessed 11 October 2013).

24. Baranov M.I. *Antologiya vydaishchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 2.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.2]. Kharkov, NTMT Publ., 2013. 333 p. (Rus).
25. Available at: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics (accessed 02 June 2015).
26. Available at: <http://n-t.ru/nl/2003.htm> (accessed 12 July 2014).
27. Baranov M.I. *Antologiya vydaishchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
28. Knopfel' G. *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
29. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushiesja 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).
30. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Alexei_Alexeyevich_Abrikosov (accessed 15 December 2014).
31. Available at: <http://elementy.ru/lib/430825/430827> (accessed 22 May 2012). (Rus).
32. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Vitaly_Ginzburg (accessed 30 July 2014).
33. Available at: <http://www.afportal.ru/physics/prize/2004> (accessed 14 April 2013). (Rus).
34. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/David_Gross (accessed 02 September 2012).
35. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Frank_Wilczek (accessed 14 June 2013).
36. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hugh_David_Politzer (accessed 22 August 2014).

Поступила (received) 14.01.2016

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

M.I. Baranov

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

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 37: Nobel Prize Laureates in Physics for 2000-2004.

Purpose. Implementation of brief analytical review of the distinguished scientific achievements of the world scientists-physicists, awarded the Nobel bonus on physics for period 2000-2004. **Methodology.** Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information of world level in area of modern theoretical and experimental physics. **Results.** The brief analytical review of the scientific openings and distinguished achievements of scientists-physicists is resulted in area of modern physical and technical problems which were marked the Nobel Prizes on physics for period 2000-2004. **Originality.** Systematization is executed with exposition in the short concentrated form of the known scientific and technical materials, devoted creation of semiconductor heterostructures scientists-physicists, integral microcircuit, to the receipt of condensation of Bose-Einstein in rarefied gases of alkaline metals, finding out a space neutrino, opening of space sources of X-rays, development of theory of superconductors and superfluid liquids and opening of asymptotic freedom in the theory of strong interactions of elementary particles. **Practical value.** Popularization and deepening of scientific and technical knowledges for students, engineers and technical specialists and research workers in area of modern theoretical and experimental physics, extending their scientific range of interests and cooperant of further development of scientific and technical progress in human society. References 36, figures 16.

Key words: modern physics, achievements, semiconductor heterostructure, integrated circuit, condensation of Bose-Einstein in rarefied gases of alkaline metals, space neutrino, space sources of X-rays, theory of superconductors and superfluid liquids, asymptotic freedom in the theory of strong interactions of elementary particles.

J. Gerlici, I.A. Шведчикова, И.В. Никитченко, Ю.А. Романченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СЕПАРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

У роботі проведено дослідження впливу конфігурації магнітної системи (форми та розмірів постійних магнітів) на просторовий розподіл індукції магнітного поля в робочій зоні магнітного сепаратора нового конструктивного виконання. Поставлені задачі вирішені з використанням чисельного метода скінченних елементів. Показано, що кільцеві постійні магніти з прямокутною формою поперечного перетину забезпечують найбільш високі показники магнітної індукції в робочих повітряних проміжках на необхідних відстанях від поверхні магнітів. За результатами аналізу просторового розподілу індукції магнітного поля встановлено, що в міжполюсному робочому об'ємі сепаратора створюється достатньо інтенсивне магнітне поле з високим значенням градієнта магнітної індукції. Відзначено доцільність використання результатів досліджень для вибору раціональних конструктивних параметрів магнітної системи та визначення силових характеристик сепаратора. Бібл. 11, рис. 8.

Ключові слова: магнітний сепаратор, постійний магніт, магнітне поле, метод скінченних елементів.

В работе проведено исследование влияния конфигурации магнитной системы (формы и размеров постоянных магнитов) на пространственное распределение индукции магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора нового конструктивного исполнения. Поставленные задачи решены с использованием численного метода конечных элементов. Показано, что кольцевые постоянные магниты с прямоугольной формой поперечного сечения обеспечивают наиболее высокие показатели магнитной индукции в рабочих воздушных зазорах на требуемых расстояниях от поверхности магнитов. В результате анализа пространственного распределения индукции магнитного поля установлено, что в межполюсном рабочем объеме сепаратора образуется достаточно интенсивное магнитное поле с высоким значением градиента индукции. Отмечена целесообразность использования результатов исследования для выбора рациональных конструктивных параметров магнитной системы и определения силовых характеристик сепаратора. Библ. 11, рис. 8.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, постоянный магнит, магнитное поле, метод конечных элементов.

Введение. В последние годы в электромеханических устройствах технологического назначения (сепараторы, питатели) широко используются высококоэрцитивные редкоземельные постоянные магниты (ПМ) на основе NdFeB (неодим-железо-бор). При относительно низкой стоимости они обладают высокой остаточной магнитной индукцией B_r (до $B_r = 1,44$ Тл); характеризуются температурной стабильностью при температурах до 150 °C; имеют малый объем, приходящийся на единицу энергии; устойчивы к воздействию размагничивающих полей [1, 2].

Разнообразие форм, конструктивных компоновок и направлений намагниченности ПМ позволяет создавать новые магнитные системы электромеханических устройств с необходимой топологией магнитного поля в рабочих зазорах. Электромеханические устройства с ПМ могут не только успешно конкурировать с их электромагнитными аналогами, но и иметь расширенные функциональные возможности.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Анализ распределения магнитного поля является важным этапом проектирования сепарирующих устройств на основе ПМ. Характер распределения магнитного поля в рабочих зазорах таких устройств существенно зависит от конфигурации магнитной системы, которая должна быть оптимизирована по массе ПМ.

В высокопроизводительных магнитных сепараторах, как показано в [3, 4], применяются, в основном, магниты цилиндрической или кольцевой формы. В [3] предложена математическая модель распределения скалярного магнитного потенциала, создаваемого

в окружающем пространстве цилиндрическим или кольцевым ПМ. Данная модель основана на представлении ПМ в виде эквивалентного соленоида, содержит в явной форме параметры ПМ и может быть использована для анализа внешнего поля магнитов в однородной среде.

В работе [5] выполнены экспериментальные исследования распределения индукции магнитного поля в простейшем случае – для одиночных и спаренных магнитных элементов в различных модулях магнитных сепараторов. Показана возможность и практическая целесообразность использования принципа суперпозиции для установления результирующей характеристики индукции поля между противостоящими магнитными элементами для замены реального моделирования расчетным.

Результаты экспериментальных исследований распределения магнитных сил в рабочих зонах цилиндрических магнитных систем барабанных сепараторов представлены в работе [6]. Влияние основных рабочих параметров на производительность высокоградиентного сепаратора на ПМ исследовано в работе [7].

Значительная часть публикаций посвящена использованию компьютерного моделирования для исследования магнитных полей, создаваемых ПМ в рабочих зазорах магнитных сепараторов.

В [8] приведены результаты расчета и внедрения в производство барабанного сепаратора на ПМ. Для решения задачи по выбору оптимальных параметров магнитной системы был использован пакет конечно-элементного моделирования дифференциальных

© J. Gerlici, I.A. Шведчикова, И.В. Никитченко, Ю.А. Романченко

уравнений в частных производных FEMLAB. При этом рассматривалась плоскопараллельная аналогия, что с учетом длины сепаратора достаточно хорошо отображает реальную пространственную картину распределения поля.

В работе [9] предложена новая конструкция магнитного сепаратора с трансверсально намагниченными дисковыми постоянными магнитами. Расчет магнитного поля выполнен с использованием метода конечных элементов. Показано, что наибольшие значения силового фактора (около 600 Тл²/м) достигаются в районах наибольшей плотности магнитного поля.

Как показал анализ публикаций [3-9], расчет магнитного поля в рабочих межполюсных зазорах магнитных сепараторов является достаточно сложной задачей, которая для большинства конфигураций магнитных систем так и не решена до настоящего времени аналитически, а экспериментальные методы достаточно трудоемки. При разработке новых конструкций магнитных сепараторов для получения информации о распределении индукции магнитного поля в рабочих зазорах целесообразно использовать численные расчеты с применением соответствующих компьютерных программ.

Цель работы заключается в исследовании численными методами влияния конфигурации магнитной системы (формы и размеров ПМ) на пространственное распределение индукции магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора нового конструктивного исполнения.

Материал и результаты исследований. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на топологию магнитного поля было проведено для новой конструкции дискового сепаратора [10, 11], предложенной авторами статьи. Дисковый сепаратор предназначен для извлечения ферромагнитных включений из сыпучих сред, транспортируемых ленточными конвейерами. В рабочем режиме устройство устанавливается над поверхностью сыпучего материала. Магнитная система сепаратора включает кольцеобразные магниты, расположенные по спирали Архимеда на равных расстояниях друг от друга с чередованием полярности полюсов в радиальном направлении и в направлении разворачивания спирали. При этом между соседними витками спирали, образующими ее шаг, также выдерживается одно и то же расстояние. При такой конфигурации магнитной системы создаются условия для самоочистки рабочей поверхности диска от извлеченных ферромагнитных включений, что значительно упрощает процесс их разгрузки без остановки рабочего процесса сепарации.

На рис. 1 показан фрагмент спиральной магнитной системы дискового сепаратора, содержащий четыре кольцеобразных магнита, с указанием основных конструктивных параметров: δ – воздушный зазор; a – поперечный размер (ширина) магнита; b – расстояние между соседними витками спирали; t – толщина магнитов (принималась неизменной, равной $t = 12,5$ мм).

Магнитное поле в системе с ПМ при отсутствии электрического тока описывается системой уравнений Максвелла, которая в магнитостатическом приближении имеет вид [10]:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции.

Уравнение состояния для постоянных магнитов:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (2)$$

где μ_r , B_r – относительное значение магнитной проницаемости и остаточная индукция ПМ, соответственно; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Уравнение состояния для ферромагнитных элементов и окружающей среды (воздух):

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

где μ_r – относительное значение магнитной проницаемости для ферромагнитного материала и воздуха ($\mu_r = 1$), соответственно.

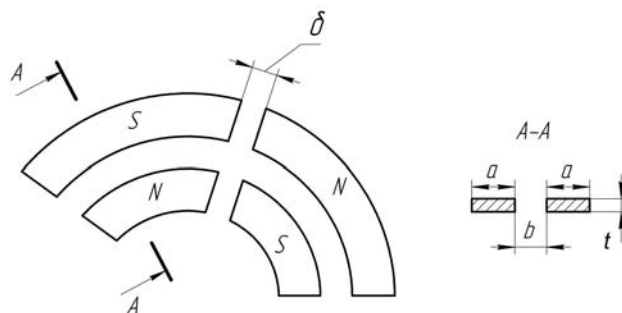


Рис. 1. Фрагмент магнитной системы сепаратора с указанием основных размеров

На первом этапе были проведены исследования влияния формы поперечного сечения ПМ на распределение индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Ставилась задача определения такой формы сечения ПМ, при которой масса магнитной системы будет минимальной, а индукция, создаваемая в воздушном зазоре, максимальной. Были рассмотрены четыре формы поперечного сечения полюсов (ширина магнитов a принималась равной $a = 67,5$ мм): прямоугольная (рис. 2,а); прямоугольная со скошенными углами (рис. 2,б); трапециевидная (рис. 2,в); сферическая (рис. 2,г).

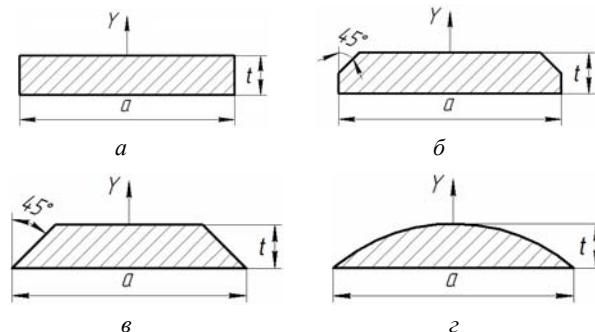


Рис. 2. Исследуемые формы поперечного сечения полюсов: а – прямоугольная; б – прямоугольная со скошенными углами; в – трапециевидная; г – сферическая

Решение поставленной задачи по исследованию влияния формы поперечного сечения ПМ выполнено численным методом конечных элементов в двумерной постановке с использованием программного пакета Elcut. Задавались следующие характеристики высоко-

коэрцитивного магнитотвердого материала типа NdFeB: относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1,06$; остаточная магнитная индукция магнитов $B_r = 1,2$ Тл (вертикальная составляющая, направленная вдоль оси Y , рис. 2), коэрцитивная сила $H_c \geq 995$ кА/м. В качестве граничных условий на внешних границах расчетной области использовалось условие магнитной изоляции. На рис. 3 для примера показаны геометрическая модель (рис. 3,а) с нанесенной на нее сеткой из конечных элементов и результат моделирования в виде картины поля (рис. 3,б) для ПМ с прямоугольной формой поперечного сечения.

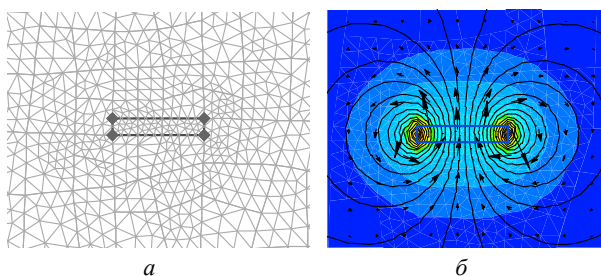


Рис. 3. Моделирование ПМ с прямоугольной формой поперечного сечения: а – геометрическая модель; б – результат моделирования

Определение модуля магнитной индукции B_i ($i = 1, \dots, 4$, где 1 соответствует прямоугольной, 2 – прямоугольной со скошенными углами, 3 – трапециевидальной и 4 – сферической форме поперечного сечения ПМ, соответственно) осуществлялось вдоль оси Y (рис. 2) на расстояниях от поверхности магнитов от 0 до 100 мм с шагом 5 мм. На рис. 4 приведены данные отношений значений модулей магнитной индукции B_i в выбранных точках для всех четырех форм поперечных сечений полюсов к соответствующим значениям модуля магнитной индукции B_1 для ПМ с прямоугольной формой поперечного сечения.

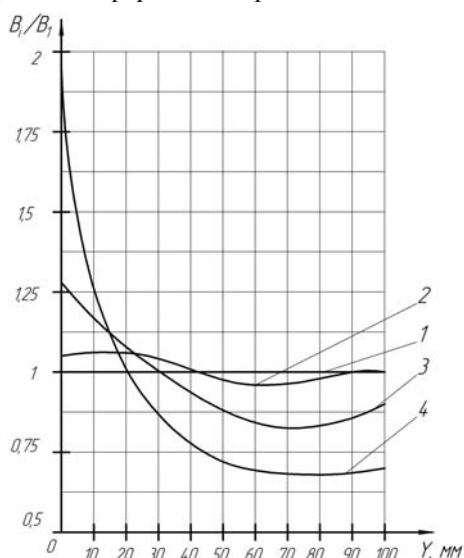


Рис. 4. Сравнение отношений модулей магнитной индукции B_i/B_1 для ПМ с разной формой поперечного сечения: 1 – прямоугольная; 2 – прямоугольная со скошенными углами; 3 – трапециевидальная; 4 – сферическая

Как видно из рис. 4, при малых расстояниях от поверхности ПМ ($0 \leq Y \leq 15$ мм) максимальные зна-

чения магнитной индукции обеспечивают сферические (кривая 4 на рис. 4) и трапециевидальные (кривая 3 на рис. 4) ПМ. Они же значительно выигрывают по массе в сравнении с магнитами прямоугольного сечения (при одной и той же длине магнитов): расчетная масса сферического магнита на 32 %, а трапециевидального магнита – на 19 % меньше расчетной массы ПМ с прямоугольной формой поперечного сечения.

Однако на больших расстояниях ($Y \geq 20$ мм), где обычно и происходит рабочий процесс сепарации, интенсивность магнитного поля, создаваемого магнитами сферического и трапециевидального сечения, существенно снижается. При этом магниты с прямоугольной (кривая 1 на рис. 4) и прямоугольной со скошенными углами (кривая 2 на рис. 4) формой поперечного сечения создают примерно одинаковые по интенсивности магнитные поля, незначительно отличающиеся по массе (не более 5 %).

С учетом вышеизложенного, для дальнейших исследований следует рекомендовать использование кольцевых ПМ с прямоугольной формой поперечного сечения. Они обеспечивают наиболее высокие показатели магнитной индукции в рабочих воздушных зазорах на требуемых расстояниях. Кроме того, магниты такой формы широко представлены в каталогах фирм, занимающихся продажей ПМ.

На втором этапе для обоснования основных геометрических размеров магнитной системы заданной конфигурации был выполнен расчет распределения магнитного поля для двух трехмерных моделей магнитной системы (рис. 5) с одинаковыми расчетными массами ПМ (16,28 кг): модель 1 (рис. 5,а): $\delta = 25$ мм, $a = 67,5$ мм, $b = 51,7$ мм; модель 2 (рис. 5,б): $\delta = 50$ мм, $a = 25,5$ мм, $b = 19,0$ мм. На рис. 5 показаны также характерные точки, в которых выполнялись измерения (модель 1 имеет 39, а модель 2 – соответственно, 119 характерных точек).

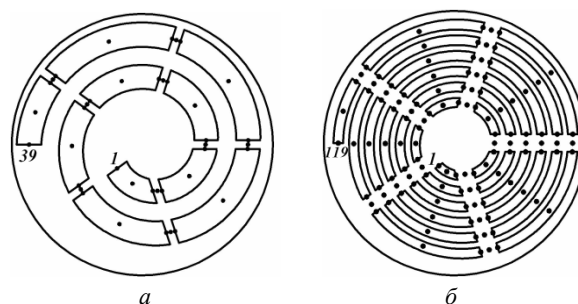


Рис. 5. Магнитные системы с указанием характерных точек: а – модель 1; б – модель 2

Изучение закономерностей пространственного распределения индукции магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора новой конструкции выполнено методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ COMSOL Multiphysics 3.5a.

Трехмерная геометрическая модель 1 магнитной системы с нанесенной на нее сеткой из конечных элементов показана на рис. 6,а. Для ферромагнитного диска, на котором установлены ПМ, принято допущение о постоянстве относительной магнитной проницаемости μ_r материала диска ($\mu_r = 1000$). Геометриче-

ские размеры диска (диаметр – 700 мм; толщина – 15 мм) выбраны, исходя из габаритов конвейерных систем, наиболее часто используемых на практике. На рис. 6,б приведен фрагмент картины распределения линий магнитной индукции в зазоре между кольцеобразными полюсами ПМ. Из рис. 6,б видно, что силовые линии сгущаются в окрестностях зазоров и несколько разрежаются в пределах магнитов.

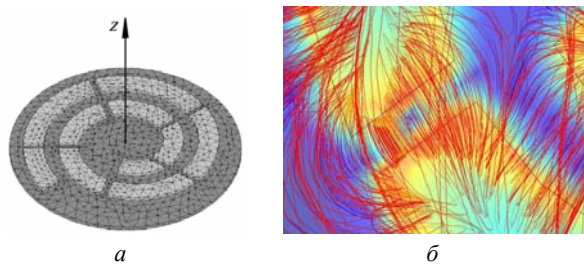


Рис. 6. Трехмерное моделирование магнитной системы: а – геометрическая модель; б – результат моделирования

Некоторые результаты моделирования, в частности, изменение модуля магнитной индукции B вдоль линий $a - a'$ и $b - b'$ (показаны на рис. 7) для модели 1 при $Z = 0$ мм приведены на рис. 8.

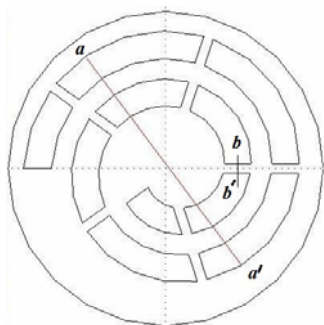


Рис. 7. Линии, вдоль которых проводилось измерение модуля магнитной индукции B

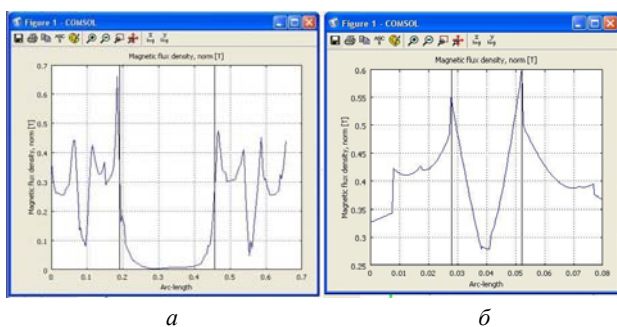


Рис. 8. Распределение магнитной индукции на границе раздела сред «ПМ – воздушный зазор»: а – в радиальном направлении (вдоль линии $a - a'$); б – в направлении разворачивания спирали (вдоль линии $b - b'$)

Как видно из рис. 8, на поверхности магнитов при $Z = 0$ мм наблюдается весьма большая разница между максимальным ($B_{\max}$) и минимальным ($B_{\min}$) значениями магнитной индукции, как в радиальном направлении (рис. 8,а), так и в направлении разворачивания спирали (рис. 8,б). Максимальные значения магнитная индукция B имеет в точках, лежащих на границе раздела сред «ПМ – воздушный зазор», а минимальные – в точках, расположенных посередине магнита и воздушного зазора, соответственно. На

поверхности магнитов (при $Z = 0$ мм) имеет место достаточно сильное магнитное поле: $B_{\max} = 0,76$ Тл (для модели 1) и $B_{\max} = 0,80$ Тл (для модели 2) – на границе ПМ – воздушный зазор; $B_{\max} = 0,31$ Тл (для модели 1) и $B_{\max} = 0,55$ Тл (для модели 2) – посередине полюса магнита. Наибольшая разница ΔB между максимальным $B_{\max}$ и минимальным $B_{\min}$ значениями магнитной индукции также наблюдается при $Z = 0$ мм на границе ПМ – воздушный зазор и составляет: 0,34 Тл – для модели 1 и 0,47 Тл – для модели 2.

Таким образом, с использованием компьютерного моделирования выполнено исследование влияния конфигурации магнитной системы (формы поперечного сечения и размеров ПМ) на пространственное распределение индукции магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора на ПМ.

Выводы. Исследование влияния формы поперечного сечения ПМ на распределение индукции магнитного поля в воздушном зазоре устройства позволило установить следующие закономерности:

- при малых расстояниях от поверхности ПМ ($0 \leq Y \leq 15$ мм) максимальные значения магнитной индукции обеспечивают ПМ со сферической и трапецидальной формой поперечного сечения при значительно меньшей расчетной массе ПМ в сравнении с ПМ прямоугольного сечения;

- на относительно больших расстояниях от поверхности полюсов ПМ ($Y \geq 20$ мм), где и происходит рабочий процесс сепарации, интенсивность магнитного поля, создаваемого магнитами сферического и трапецидального сечения, существенно ниже, чем у магнитов с прямоугольной и прямоугольной со скошенными углами формой поперечного сечения. При этом магниты с прямоугольной и прямоугольной со скошенными углами формой поперечного сечения создают примерно одинаковые по интенсивности магнитные поля, отличаясь по массе не более, чем на 5 %.

Анализ пространственного распределения индукции магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора новой конструкции показал, что в межполюсном рабочем объеме образуется достаточно сильное магнитное поле ($B_{\max} = 0,76 \dots 0,8$ Тл) с высоким значением градиента индукции. Наиболее высокая степень неоднородности поля имеет место на границе раздела сред «ПМ – воздушный зазор».

Полученные результаты могут быть использованы для выбора рациональных конструктивных параметров магнитной системы и определения силовых характеристик сепаратора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furlani E. Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analyses and Application. – New York: Academic Press, 2001. – 518 p. doi: 10.1016/B978-012269951-1/50005-X.
2. Strnat K.J. Modern Permanent Magnets for Application in Electro-Technology // Proceedings of the IEEE. – 1990. – vol.78. – no.6. – pp. 923-946. doi: 10.1109/5.56908.
3. Бульжев Е.М., Меньшов Е.Н., Джавахия Г.А. Моделирование поля постоянного магнита // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. – 2011. – Т.13. – №4. – С.106-110.

4. Булыжев Е.М., Меньшов Е.Н. Математическое моделирование поля постоянного магнита // *Электричество*. – 2010. – № 9. – С. 65-69.
5. Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Орешкин Д.В., Сандуляк А.В. Характеристики индукции поля в модуле магнитного сепаратора // *Вестник МГСУ*. – 2013. – №5. – С. 103-111.
6. Килин В.И., Килин С.В. К выбору полюсного шага магнитных систем сепараторов для сухого обогащения // *Обогащение руд*. – 2008. – №6. – С.14-18.
7. S. Zeng, W. Zeng, L. Ren, D. An, H. Li. Development of a high gradient permanent magnetic separator (HGPMs) // *Minerals Engineering*. – Feb. 2015. – vol.71. – pp. 21-26. doi: 10.1016/j.mineng.2014.10.009.
8. Лозин А.А., Арсенюк В.М., Петровский Я.Б. Использование информационно-аналитических технологий при расчете и моделировании стационарных магнитных систем в конструировании сепараторов на постоянных магнитах // *Горный журнал*. – 2004. – №5. – Режим доступа: <http://www.prodecolog.com.ua/pdf/gorec.pdf>.
9. S. Nedelcu, J. H. P. Watson. Magnetic separator with transversally magnetised disk permanent magnets // *Minerals Engineering*. – May 2002. – vol.15. – no.5. – pp. 355-359. doi: 10.1016/S0892-6875(02)00043-2.
10. Шведчикова И.А., Земзюлин М.А. Исследование распределения магнитного поля в дисковом сепараторе с магнитной системой спирального типа // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – №2(22). – Ч.2. – С. 18-24.
11. Шведчикова І.О., Романченко Ю.А. Патент України на корисну модель 110206. Дісковий магнітний сепаратор. UA МПК (2006.01) B 03 C 1/24. Публ. 26.09.16, Бюл. № 18.

REFERENCES

1. Furlani E. Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analyses and Application. *New York Academic Press*, 2001, p. 518. doi:10.1016/B978-012269951-1/50005-X.
2. Strnat K.J. Modern Permanent Magnets for Application in Electro-Technology. *Proceedings of the IEEE*, 1990, vol. 78, no. 6, pp.923. doi: 10.1109/5.56908.
3. Bulzhev E.M., Menshov E.N., Dzhavahija G.A. Modeling of the field permanent magnet. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol.13, no.4, pp.106-110. (Rus).
4. Bulzhev E.M., Menshov E.N. Mathematical modeling of the field a permanent magnet. *Electricity*, 2010, no. 9. pp. 65-69. (Rus).
5. Sandulyak A.A., Ershov D.V., Oreshkin D.V., Sandulyak A.V. Characteristics of Magnetic Field Induction inside a Module of a Magnetic Separator. *Vestnik MGSU*, 2013, no.5, pp. 103-111. (Rus).
6. Kilin V.I. Kilin S.V. By choosing the pole pitch of the magnetic separator systems for dry processing. *Obogashchenie Rud*, 2008, no.6, pp. 14-18. (Rus).
7. S. Zeng, W. Zeng, L. Ren, D. An, H. Li. Development of a high gradient permanent magnetic separator (HGPMs). *Minerals Engineering*, Feb. 2015, vol.71, pp. 21-26. doi: 10.1016/j.mineng.2014.10.009.
8. Lozin A.A., Arsenjuk V.M., Petrivskij Ya.B. Information and analytical technologies at calculation and modeling stationary magnetic systems in the construction of separators based on permanent magnets. *Gornyi Zhurnal*, 2004, no.5. (Rus). Available at: <http://www.prodecolog.com.ua/pdf/gorec.pdf>.
9. S. Nedelcu, J. H. P. Watson. Magnetic separator with transversally magnetised disk permanent magnets. *Minerals Engineering*, May 2002, vol.15, no.5, pp. 355-359. doi: 10.1016/S0892-6875(02)00043-2.
10. Shvedchikova I.A., Zemziulin M.A. Research of the magnetic field distribution in the magnetic disk separator with spiral-type system. *Electromechanical and energy saving systems*, 2013, no.2(22), part 2, pp. 18-24. (Rus).

11. Shvedchikova I.O., Romanchenko J.A. *Diskoviy magnitniy separator* [Disc magnetic separator]. Patent UA, no. 110206, 2016. (Ukr).

Поступила (received) 21.01.2017

Juraj Gerlici¹, Professor, Dr. Ing.,
 Шведчикова Ирина Алексеевна², д.т.н., проф.,
 Никитченко Инна Викторовна², аспирант,
 Романченко Юлия Андреевна², аспирант,
¹ University of Žilina, Žilina, Slovak Republic,
 1, Univerzitná, SK 01026 Žilina, Slovak Republic,
 тел/phone 421(41)513 2550,
 e-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk
² Восточноукраинский национальный университет
 имени Владимира Даля,
 93400, Северодонецк, пр. Центральный, 59-а,
 тел/phone +38 099 044 85 71,
 e-mail: ishved@i.ua, inna.mia.lg@gmail.com

J. Gerlici¹, I.A. Shvedchikova², I.V. Nikitchenko²,
 J.A. Romanchenko²
¹ University of Žilina, Žilina, Slovak Republic,
 1, Univerzitná, SK 01026 Žilina, Slovak Republic,
² Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,
 59-a, pr. Central, Severodonetsk, 93400, Ukraine.

Investigation of influence of separator magnetic system configuration with permanent magnets on magnetic field distribution in working area.

Purpose. To carry out research the influence of magnetic system configuration (shape and size of the permanent magnets) on magnetic field spatial distribution in working area of new structure design magnetic separator with active front surface by numerical methods. **Methodology.** We have applied the magnetic field numerical simulation for permanent magnets system in absence of electrical current in magnetostatic approximation. We have solved the problem by using finite element method. Research of permanent magnets cross-sectional shape influence made in the two-dimensional formulation using software package Elcut. Research of magnetic field induction spatial (three-dimensional) distribution in new construction magnetic separator working area is conducted using software package COMSOL Multiphysics 3.5a. **Results.** Magnetic flux density maximum in the immediate vicinity of permanent magnet surface provide magnets with spherical and trapezoidal cross-sectional shape. At a distance from pole surface, where the separation process working, magnetic field density produced by trapezoidal and spherical cross section magnets, substantially lower in comparison with rectangular magnets. Rectangular and rectangular with beveled corners cross-section shape magnets create approximately same magnetic field intensity not significantly different in weight. Analysis of the spatial distribution of magnetic field induction in the working area of a new construction magnetic separator has shown that a strong magnetic field with high magnetic flux density gradient value is formed in the inter-polar working volume. **Originality.** For the first time research of magnetic flux density distribution in working area of new construction magnetic separator is conducted. Developed device feature is complex spatial distribution of magnetic field. **Practical value.** Results of research can be used for selection of rational parameters of separator magnetic system. Received results also can be used for determination of separator force characteristics. References 11, figures 8.

Key words: magnetic separator, permanent magnet, magnetic field, finite element method.

В.Ф. Болух, А.И. Кочерга, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Розроблено методику експериментальних досліджень, яка полягає у одночасному реєструванні електричних та механічних параметрів лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача. При роботі в якості ударно-силового пристрою силові показники реєструються з використанням п'єзодатчика, системи тензодатчиків, датчика пульсації тиску та швидкісної відео зйомки. При роботі перетворювача в якості електромеханічного прискорювача швидкісні показники реєструються з використанням резистивного датчика переміщень. Показано, що електромеханічні процеси в перетворювачі носять складний просторово-часовий характер. Результати експериментальних досліджень задовільно узгоджуються з розрахунковими показниками, які отримані за допомогою математичної моделі, що описує швидкоплинні електромагнітні, теплові та механічні процеси, що виникають при переміщенні якоря відносно індуктора. Бібл. 13, рис. 18.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, ударно-силовий пристрій, електромеханічний прискорювач, методика експериментальних досліджень, математична модель.

Разработана методика экспериментальных исследований, которая состоит в одновременной регистрации электрических и механических силовых и скоростных параметров линейного импульсного электромеханического преобразователя. При работе преобразователя в качестве ударно-силового устройства силовые показатели регистрируются с использованием пьезодатчика, системы тензодатчиков, датчика пульсации давления и скоростной видеосъемки. При работе преобразователя в качестве электромеханического ускорителя скоростные показатели регистрируются с использованием резистивного датчика перемещений. Показано, что электромеханические процессы в преобразователе носят сложный пространственно-временной характер. Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с расчетными показателями, полученными при помощи математической модели, которая описывает быстротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, возникающие при перемещении якоря относительно индуктора. Библ. 13, рис. 18.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, ударно-силовое устройство, электромеханический ускоритель, методика экспериментальных исследований, математическая модель.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) предназначены для создания ударно-механических импульсов на объект воздействия при незначительном перемещении исполнительного элемента (ИЭ) или для его ускорения на коротком активном участке [1]. Эти преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве ударно-силовых устройств и электромеханических ускорителей.

В строительстве применяются электромагнитные молоты и устройства для забивания свай, в горной промышленности – бутобои и вибраторы, в геолого-разведке – вибросейсмоисточники, в машиностроении – прессы и молоты с большим диапазоном энергии удара, в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы.

ЛИЭП также применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на ударные нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. [2-4].

ЛИЭП индукционного типа обеспечивают бесконтактное перемещение электропроводящего якоря относительно неподвижного индуктора, возбуждаемого от импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) с электронной системой формирования токового импульса [5]. В нем возникают быстротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, которые проявляются при быстром перемещении якоря в условиях окру-

жающей среды.

Математические модели ЛИЭП реализуются, как правило, с использованием либо цепных, либо полевых представлений [6, 7]. При этом возникает вопрос о соответствии параметров ЛИЭП, полученных расчетными методами при помощи математических моделей, и параметров, полученных экспериментально.

Поскольку рабочий цикл рассматриваемых преобразователей длится 1...2 мс с быстрым перемещением якоря, то это накладывает особенности на проведение экспериментальных исследований [8].

Целью статьи является обоснование методики экспериментальных исследований ЛИЭП, которые используются в качестве ударно-силовых устройств и электромеханических ускорителей, и сравнение экспериментальных результатов с расчетными показателями, полученными при помощи математической модели.

Математическая модель. В ЛИЭП индукционного типа при возбуждении от ЕНЭ возникают быстротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, происходящие при быстром перемещении якоря относительно обмотки индуктора (ОИ). Реализация математической модели ЛИЭП с использованием цепного подхода, основанного на теории электрических цепей, не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [7]. Исходя из этого, разработана математическая модель ЛИЭП, которая основана на полевом подходе, использующем метод конечных элементов [9]. Для определения электромагнитных параметров ЛИЭП в цилиндрической системе коор-

© В.Ф. Болух, А.И. Кочерга, С.В. Олексенко, И.С. Щукин

динат $\{r, z\}$ рассчитывается векторный магнитный потенциал A

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля B ферромагнитного материала; σ – электропроводность якоря.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}; \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничными условиями системы выступает уравнение $n \times A = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали к поверхности. Для ферромагнитных материалов используется нелинейная кривая намагничивания $B = f(H)$

Ток в индукторе определяется с использованием уравнения:

$$(R_e + R_1) i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{dt} dv = U_0, \quad (3)$$

где R_e – активное сопротивление внешней цепи; R_1 – активное сопротивление ОИ; i_1 – ток ОИ; L_e – индуктивность внешней цепи; U_0 – зарядное напряжение ЕНЭ; C – емкость ЕНЭ; N_1 – число витков индуктора; s – площадь поперечного сечения ОИ, пронизываемая магнитным потоком; A_l – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем индуктора.

Электродинамические усилия (ЭДУ), действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжений Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

где S – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря; n – единичный вектор нормали к поверхности якоря.

Импульс ЭДУ, определяющий интегральное силовое воздействие на якорь, описывается выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

Механические процессы ЛИЭП при аксиальном перемещении якоря описываются уравнением

$$(m_e + m_2) \frac{dv_z}{dt} = f_z', \quad (6)$$

где $f_z' = f_z - k_\mu v_z - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_m^2 v_z^2$; m_e – масса ИЭ; m_2 – масса якоря; v_z – скорость якоря; k_μ – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность воздуха; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_m – внешний диаметр ИЭ.

Аксиальные перемещение Δz и скорость v_z якоря на каждом расчетном шаге Δt можно представить в виде рекуррентных соотношений [5]

$$\Delta z(t_{k+1}) = \Delta z(t_k) + v_z(t_k) \Delta t + f_z' \Delta t^2 (m_e + m_2)^{-1}; \quad (7)$$

$$v_z(t_{k+1}) = v_z(t_k) + f_z' \Delta t (m_e + m_2)^{-1}. \quad (8)$$

Уравнения (1) – (8) описывают электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях: $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$; $\Delta z(0)=0$; $v_z(0)=0$, где u_c – напряжение ЕНЭ. При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещения якоря относительно индуктора.

Для определения температуры нагрева ОИ и якоря ЛИЭП используем полевую модель, которая позволяет на каждом временном шаге учесть пространственное распределение температур в активных (ОИ и якорь) и пассивных (каркас индуктора, силовой диск якоря) элементах ЛИЭП [10].

Решение системы уравнений (1) – (8) получено с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка. Для решения поставленной цели была разработана математическая модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [11].

Моделирование электрических процессов осуществлялось физическими модулями «Electrical circuit», который рассчитывал переходные процессы, и «Magnetic fields», который рассчитывал параметры на основе магнитного поля с учетом перемещения электропроводящего якоря. Моделирование магнитных процессов осуществлялось физическим модулем «Magnetic fields», в котором электромагнитный процесс описывается системой дифференциальных уравнений для каждого узла сеточного разбиения. Моделирование тепловых процессов осуществлялось физическим модулем «Heat transfer in solid».

Математическая модель ЛИЭП реализуется в следующей последовательности:

- выбираются физические модули («Magnetic fields», «Electrical circuit», «Heat transfer in solid», «Fluid structure interaction»), размерность задачи (2D), тип модели (time-dependent) и метод расчета;
- формируется геометрия ЛИЭП и определяются расчетные области физических задач;
- задаются исходные данные в виде величин и функций, описывающих взаимосвязи между параметрами, например, зависимость удельного сопротивления материала от температуры;
- задаются начальные и граничные условия рассматриваемых физических задач;
- выполняется дискретизация расчетных областей с учетом геометрической модели ЛИЭП;
- выбираются методы решения, как правило, *MUMPS*, *PARDISO* и проводятся численные расчеты.

Решение мультифизической математической модели ЛИЭП производится методом *BDF* (backward differentiation formula) или методом *Generalized alpha* с плавающим шагом и ограничениями по времени. Это обусловлено изменением величины погрешности расчета в зависимости от выбранного шага. Решение задачи начинается с шага по времени на 6 порядков

меньшего, чем максимально установленный шаг. Этот шаг автоматически варьируется в зависимости от условий сходимости и показателей относительной погрешности полученных решений.

Электроμηанические процессы ЛИЭП. Рассмотрим ЛИЭП индукционного типа коаксиальной дисковой конфигурации [12]. Данный ЛИЭП состоит из неподвижной ОИ с внешним диаметром $D_{ex1} = 100$ мм, внутренним диаметром $D_{in1} = 10$ мм, высотой $H_1 = 10$ мм и количеством витков $N_1 = 46$ шт. медной шины сечением $a \times b = 1,8 \times 4,8$ мм². Якорь выполнен в виде медного диска с параметрами: внешний диаметр $D_{ex2} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2} = 10$ мм, высота $H_2 = 3$ мм. К якорю присоединен ударный ИЭ массой $m_e = 0,275$ кг. ЕНЭ имеет емкость $C = 2850$ мкФ и зарядное напряжение $U_0 = 400$ В. Электронная система обеспечивает формирование полярного аperiodического тока в ОИ, для чего последняя шунтирована обратным диодом.

Электроμηанические процессы в ЛИЭП носят сложный пространственно-временной характер. На рис. 1 представлены: плотность тока в индукторе j_1 , усредненная по сечению плотность тока в якорь j_2 , величина ЭДУ f_z и импульс ЭДУ F_z , которые действуют на якорь, перемещаемый на расстояние z относительно индуктора со скоростью v_z . Через $t = 1,2$ мс после начала рабочего процесса ток в якорь меняет полярность, что обуславливает следующий характер силового воздействия: начальное отталкивание сменяется последующим притяжением.

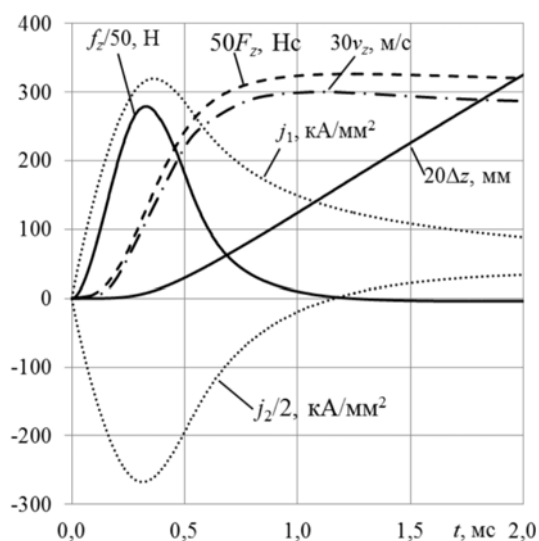


Рис. 1. Электроμηанические характеристики ЛИЭП

Процесс перемещения якоря начинается через определенное время после начала рабочего процесса. На каждом временном шаге наблюдается существенная неравномерность распределения индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП (рис. 2,а). Наибольшая концентрация поля наблюдается в области между ОИ и якорем. Однако это происходит только в определенные моменты времени, например, в момент действия максимальных ЭДУ. В последующем максимальная индукция магнитного поля уменьшается и перемещается в центральную часть индуктора.

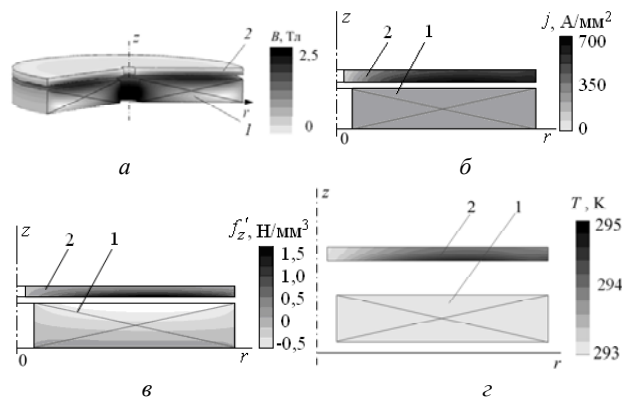


Рис. 2. Распределение магнитных полей (а) и плотностей тока (б) и удельных аксиальных усилий (в) в момент максимума ЭДУ и распределение теплового поля в конце рабочего цикла (з): 1 – ОИ; 2 – якорь

При работе ЛИЭП в каждый момент времени наблюдается существенная пространственная неравномерность плотности индуцированного тока в якорь (рис. 2,б). Удельные ЭДУ f'_z неравномерно воздействуют как на якорь, так и на ОИ (рис. 2,в). При этом градиенты температур T в якорь незначительны, а в ОИ практически отсутствуют через 1 мс после начала работы при одном рабочем цикле (рис. 2,з).

При работе ЛИЭП в качестве ускорителя необходимо, в первую очередь, контролировать перемещение якоря, а при работе в качестве ударно-силового устройства – величину силового воздействия на соответствующий объект.

В экспериментальных исследованиях использовались электролитические конденсаторы НЛ с номинальным напряжением $U_0 = 450$ В и емкостями $C = 150$ мкФ и $C = 330$ мкФ.

Методика проведения экспериментальных исследований ЛИЭП состоит в том, что одновременно регистрируются электрические параметры (ток в ОИ) и механические параметры, характеризующие силовые и скоростные показатели якоря с ИЭ. Силовые показатели, прежде всего, важны для ударно-силовых устройств, а скоростные – для электроμηанических ускорителей.

Силовые показатели исследовались с использованием пьезодатчиков, системы тензодатчиков, датчика пульсации давления и скоростной видеосъемки. Скоростные показатели исследовались при помощи резистивного датчика перемещений, позволяющего регистрировать характер движения якоря с ИЭ в каждый момент времени.

Исследования ЛИЭП в качестве ударно-силового устройства.

Исследование с использованием пьезодатчиков.

Для экспериментальных исследований ЛИЭП, работающего в качестве ударно-силового устройства была разработана установка, включающая индуктор 1, содержащий ОИ, которая при помощи эпоксидной смолы замоноличена в стеклотекстолитовом каркасе (рис. 3).

Индуктор прикреплен к опорной пластине 2. К якорю 3 присоединен стальной ударный диск 4, который воздействует на вертикально установленный боек 5, изготовленный из стали 70, совершающий удары по

верхней стальной плиты 6. Опорная пластина 2 прикреплена к нижней стальной плите 7. Плиты 6 и 7 соединены между собой посредством регулируемых опор 8, что позволяет изменять величину рабочего хода бойка Z_e . Пружины 9 обеспечивают заданную силу противодействия движению. На плите 6, ограничивающей рабочий ход бойка 5, сверху установлен пьезодатчик 10, который осуществляет преобразование механических колебаний, возникающих при ударе бойка, в электрические сигналы, передавая их на измеритель шума и вибрации ВШВ-003. Измеритель преобразует электрические сигналы пьезодатчика в величины виброускорения a_f и виброскорости v_f . При исследовании ЛИЭП одновременно измеряются ток в ОИ и вибрация плиты 6 при помощи двухканального электронного осциллографа *RIGOL DS 522M*.

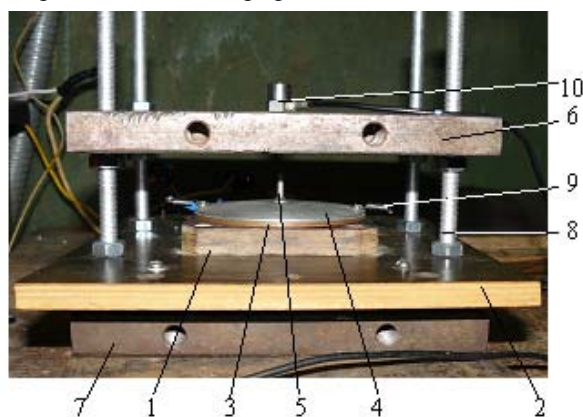
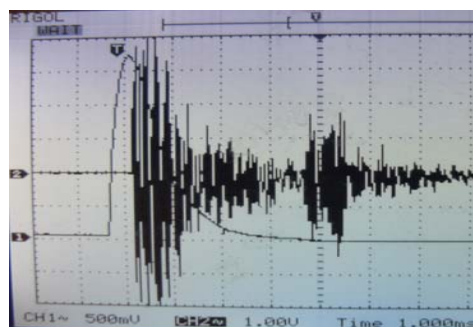
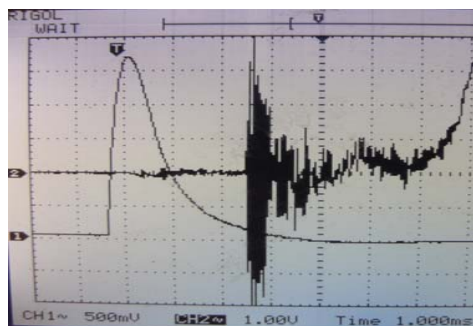


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования ЛИЭП с использованием пьезодатчика

На рис. 4 представлены осциллограммы токов ОИ i_1 и виброускорений a_f при различной величине рабочего хода якоря Z_e .



а



б

Рис. 4. Осциллограммы тока в ОИ (канал CH1) и виброускорения (канал CH2) при величине рабочего хода Z_e : 0 мм (а); 10 мм (б)

При отсутствии рабочего хода якоря вибрация верхней плиты, регистрируемая датчиком, возникает с некоторым запаздыванием t_0 по отношению к моменту возникновения тока в ОИ. При увеличении величины рабочего хода Z_e возрастает и время запаздывания вибрационных процессов верхней плиты по отношению к моменту возникновения тока в ОИ t_z .

На основе экспериментальных исследований определяются:

- форма i_1 и амплитудное значение I_{1m} тока ОИ;
- длительность фронта импульса тока ОИ t_{fr} ;
- длительность импульса тока ОИ t_{pul} ;
- время запаздывания вибрации верхней плиты по отношению к моменту возникновения тока ОИ t_z ;
- средняя скорость якоря с ИЭ $V_0 = Z_e(t_z - t_0)^{-1}$;
- величина виброускорения $a_f(t)$, пропорциональная мгновенной силе $f_z(z, t)$, действующей на верхнюю плиту;
- величина виброскорости $v_f(t)$, пропорциональная импульсу силы F_z , действующему на верхнюю плиту.

Измеренные значения средней скорости якоря с ИЭ V_0 при различной величине рабочего хода якоря Z_e на 8 – 15 % меньше расчетных, что можно объяснить не полным учетом всех противодействующих и тормозных сил. Аналогичные зависимости проявляются между расчетными и экспериментальными значениями импульса ЭДУ F_z (рис. 5).

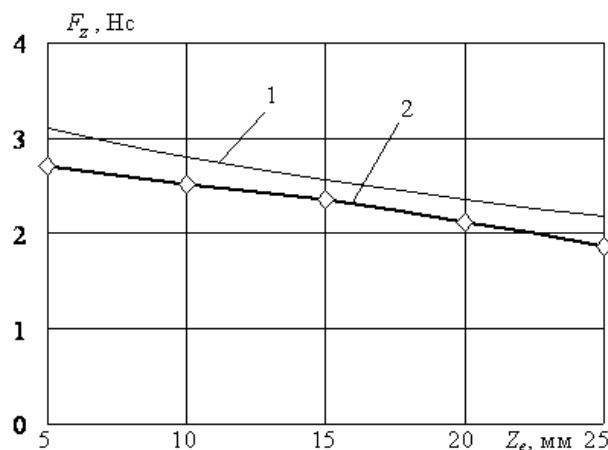


Рис. 5. Зависимости рассчитанных (1) и измеренных (2) значений импульса ЭДУ от величины рабочего хода якоря

Таким образом, наибольшие значения импульса ЭДУ F_z возникают при заторможенном якоре, затем они уменьшаются практически линейно с увеличением рабочего хода якоря Z_e . Как экспериментальные, так и расчетные зависимости практически линейно возрастают при увеличении напряжения U_0 , причем амплитуды тока ОИ I_{1m} при наличии якоря возрастают.

Экспериментально было исследовано влияние формы якоря, параметров ЕНЭ, рабочего хода Z_e , начального зазора ΔZ_0 между якром и индуктором и ускоряемой массы на показатели ЛИЭП. Установлено, что при использовании круглого якоря по сравнению с якром прямоугольной формы процессы изменяются следующим образом: максимальная величина ЭДУ f_z возрастает на 25 %, амплитуда тока ОИ I_{1m} возрастает на 5 %, а длительность импульса тока ОИ

t_{pul} и время запаздывания t_z уменьшаются на 10 %. Это свидетельствует о большей эффективности круглого якоря по сравнению с прямоугольным.

С увеличением напряжения ЕНЭ в 2 раза амплитуда тока ОИ возрастает более чем в 2 раза, практически в 5 раз увеличивается амплитуда виброускорения a_{vib} , а значит и мгновенное значение ЭДУ f_z , действующих на верхнюю плиту. Время запаздывания t_z при этом уменьшается от 0,7 до 0,5 мс.

С увеличением рабочего хода Z_e растет время запаздывания t_z вибрации верхней плиты по отношению к началу токового импульса ОИ, что приводит к уменьшению амплитуды ЭДУ f_z . На осциллограммах незначительная вибрация верхней плиты, возникающая до удара по ней бойка, обусловлена отдачей индуктора, передаваемой через регулируемые опоры (рис. 4,б).

На рис. 6,а показано влияние емкости C при различных напряжениях U_0 ЕНЭ на амплитуду тока ОИ I_{1m} ЛИЭП. Экспериментальные и расчетные значения амплитуды тока возрастают при увеличении емкости C : при увеличении емкости в 2 раза (от 2000 до 4000 мкФ), величина тока возрастает на 17 %. Причем амплитуда тока ОИ I_{1m} тем выше, чем больше напряжение U_0 . Рост значений I_{1m} более существенный в интервале емкостей $C = 2000 \dots 3000$ мкФ.

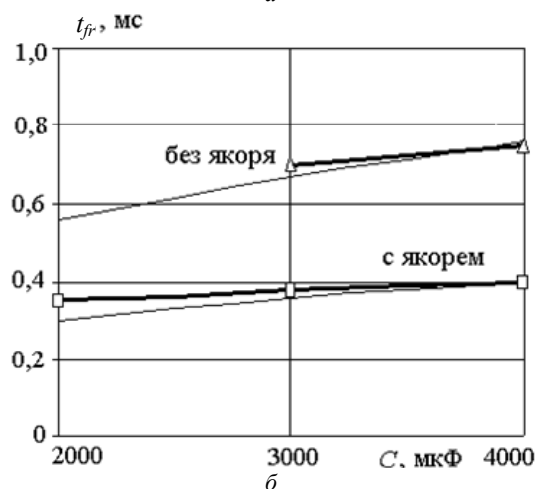
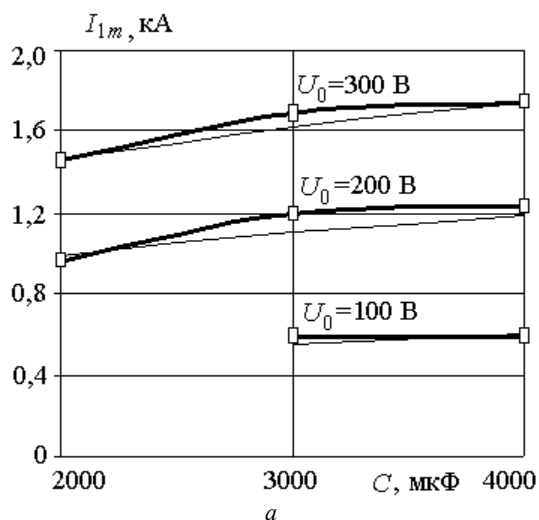


Рис. 6. Зависимость экспериментальных (жирные линии) и расчетных (тонкие линии) значений амплитуды (а) и длительности фронта (б) тока ОИ ЛИЭП от емкости ЕНЭ

Величина напряжения U_0 ЕНЭ незначительно влияет на длительность фронта импульса тока ОИ t_{fr} . Длительность фронта остается практически неизменной при разных U_0 и фиксированных значениях емкости C ЕНЭ. На рис. 6,б приведены кривые, отображающие влияние емкости ЕНЭ C на длительность фронта импульса тока ОИ t_{fr} при наличии и отсутствии якоря в ЛИЭП. Как экспериментальные, так и расчетные значения длительности фронта тока ОИ растут при увеличении емкости ЕНЭ C , имея практически одинаковую закономерность. Причем длительность фронта тока ОИ t_{fr} выше в ЛИЭП без якоря.

На эффективность ЛИЭП существенно влияет начальный зазор между якорем и индуктором ΔZ_0 (рис. 7). При увеличении зазора ΔZ_0 уменьшается магнитная связь между якорем и ОИ, а значит, влияние якоря на ток ОИ i_1 снижается, что приводит к уменьшению амплитуды тока I_{1m} .

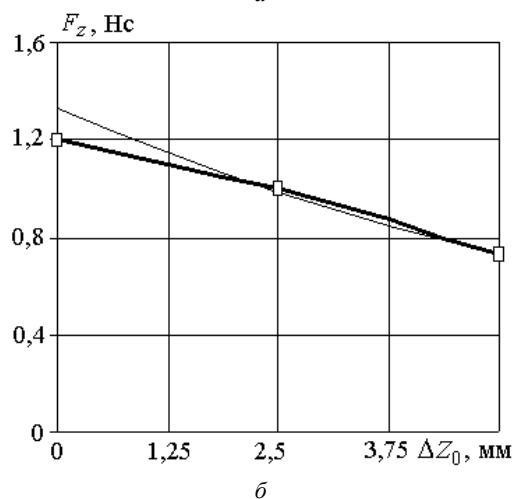
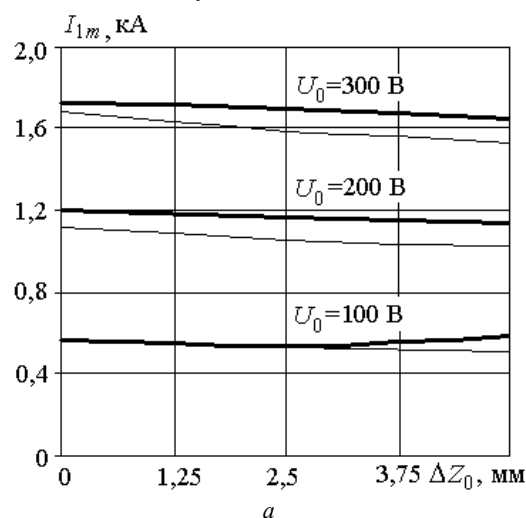


Рис. 7. Зависимость экспериментальных (жирные линии) и расчетных (тонкие линии) значений амплитуды тока в ОИ (а) и импульса ЭДУ (б) от величины начального зазора между индуктором и якорем

Чем больше начальный зазор, тем больше кривая тока ОИ становится подобной кривой тока ОИ при отсутствии якоря (магнитная связь индуктора с якорем равна нулю). Увеличение начального зазора ΔZ_0 приводит к существенному уменьшению импульса ЭДУ. На рис. 7,б показана зависимость эксперимен-

тального и расчетного значений импульса ЭДУ от начального зазора при использовании ЕНЭ с параметрами $C = 3000$ В, $U_0 = 200$ В.

С увеличением начального зазора ΔZ_0 между якорем и индуктором в 2 раза с 2,5 до 5 мм амплитуда тока в ОИ I_m уменьшается на 8 %, длительность импульса тока ОИ t_{pul} увеличивается на 6 %, а фронт импульса тока ОИ t_{fr} – на 8 %. При этом величина виброускорения a_{vib} , а значит и ЭДУ f_z уменьшаются на 25 %, время запаздывания t_z увеличивается почти в 2 раза. При увеличении ΔZ_0 от 0 до 5 мм величина импульса силы уменьшается на 54 %. Это свидетельствует о том, что начальный зазор между индуктором и якорем необходимо выбирать минимально возможным.

На рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные значения средней скорости якоря V_0 на участке рабочего хода Z_e при $C=7000$ мкФ, но разных напряжениях U_0 ЕНЭ. Расчетная скорость несколько выше экспериментальной, что можно объяснить более сложным характером реального аэродинамического сопротивления, по сравнению с заложенным в математическую модель, не полным учетом всех противодействующих сил и наличием отдачи индуктора.

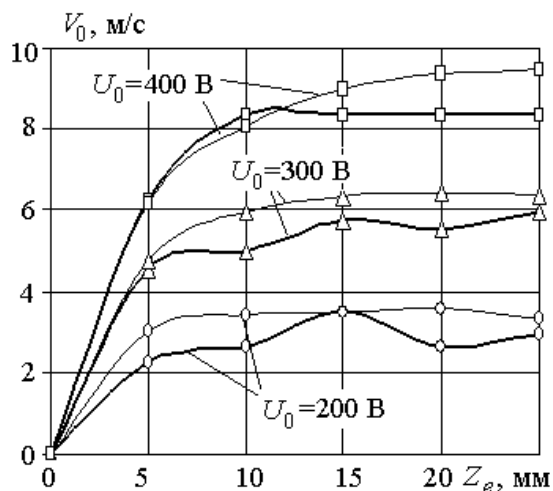


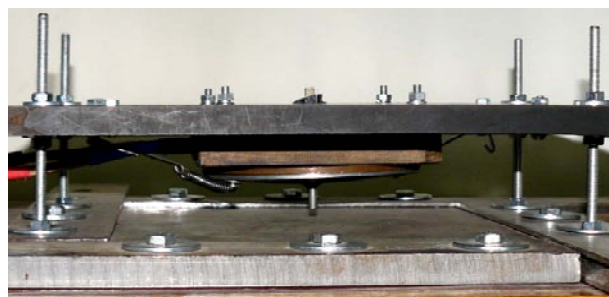
Рис. 8. Экспериментальные (жирные линии) и расчетные (тонкие линии) зависимость средней скорости от перемещения якоря ЛИЭП

С уменьшением емкости ЕНЭ C в 2,2 раза (от 6270 до 2859 мкФ) электрические процессы изменяются следующим образом: амплитуда тока в ОИ I_m уменьшается на 28 %, длительность импульса тока в ОИ t_{pul} – на 71 %, фронт импульса тока ОИ t_{fr} – на 43 %. Вследствие этого время запаздывания t_z уменьшается на 14 %, а величина импульса ЭДУ F_z – в 3,12 раза.

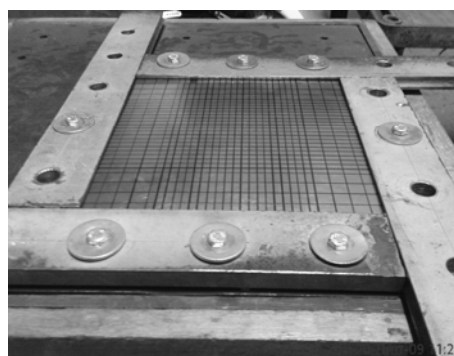
В целом, проведенные экспериментальные исследования с использованием пьезодатчиков удовлетворительно согласуются с теоретическими результатами. Они показали, что можно эффективно регистрировать показатели силового воздействия ЛИЭП на объект, что важно для ударно-силовых устройств.

Исследование с использованием тензодатчиков. Рассмотрим эффективность применения тензодатчиков для регистрации силового воздействия на объект. Экспериментальный стенд для исследования ЛИЭП, работающего в качестве ударно-силового

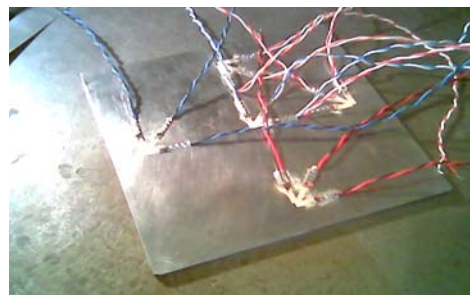
устройства, представлен на рис. 9,а. ЛИЭП крепится к изоляционной опорной плите, которая устанавливается на вертикальных регулируемых опорах. При помощи этих опор можно изменять высоту подъема опорной плиты, устанавливая таким образом величину рабочего хода якоря с бойком Z_e .



а



б



в

Рис. 9. Экспериментальная установка для исследования ЛИЭП с использованием тензодатчиков (а) и объект воздействия – стальная пластина с тензодатчиками: вид сверху (б) и снизу (в)

ЛИЭП обеспечивает перемещение якоря с бойком вертикально вниз до соударения с объектом воздействия – ударной стальной пластиной с размерами $0,18 \times 0,18 \times 0,006$ м³ (рис. 9,б). Ударная пластина с обратной стороны покрыта сетью тензодатчиков, объединенных в розетки. Провода от датчиков выводятся сквозь отверстия в плите, которая закреплена на опорной раме. Эти датчики образуют пять групп, симметрично расположенных относительно точки удара, причем в каждой группе содержится три датчика, одна сторона которых образует узел, а другие стороны – лучи под углом 45° друг к другу (рис. 9,в). Стенд содержит сменный держатель ударной пластины, что позволяет реализовать различные виды крепления: шарнирное, жесткое и свободное опирание.

Для измерения сопротивления тензорезисторов применена мостовая схема. Для измерения падения

напряжения использован дифференциальный приемник сигнала.

При проведении экспериментов использован информационно-измерительный комплекс, предназначенный для регистрации деформационных процессов в объекте воздействия [13]. Комплекс содержит блок формирования сигналов тензодатчиков, стабилизированный блок питания, блок сопряжения и защиты, АЦП ADA-1406 и персональный компьютер. Цифровые данные, полученные с платы АЦП, поступают на компьютер, где обрабатываются при помощи специального программного обеспечения. Оно позволяет записать сигнал, определить значения измеренных параметров, спектров сигналов и время затухания колебаний. В качестве приемника в блоке формирования сигналов датчиков применен прецизионный инструментальный усилитель AD623, позволяющий подавлять синфазную помеху, попадающую на вход вместе с полезным сигналом. Запуск испытательной установки происходит дистанционно одновременно с началом испытаний.

При работе ЛИЭП возбуждаются интенсивные магнитные поля, которые генерирует сигналы тензодатчиков, пропорциональные аксиальной составляющей поля в их месте расположения. Таким образом, при отсутствии деформационных процессов в ударной пластине магнитное поле ЛИЭП формирует фоновые сигналы тензодатчиков, амплитуды которых увеличиваются с повышением напряжения U_0 (рис. 10).

Опытным путем было установлено, что воздействие бояка по центру ударной пластины не вызывает в ней пластических деформаций. Была проведена серия ударных воздействий, на основании которых определено среднее значение амплитуды сигнала, снимаемого с центральной «розетки» тензодатчиков ударной пластины. Вычитая из значений сигналов фоновый уровень, получаем величину деформации ударной пластины. На рис. 11 кружками обведены всплески сигналов тензодатчиков на осциллограммах, которые соответствуют деформационным процессам, вызванным ударными воздействиями бояка ЛИЭП на пластину.

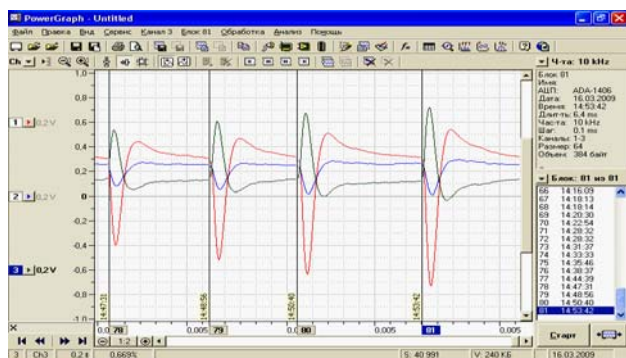
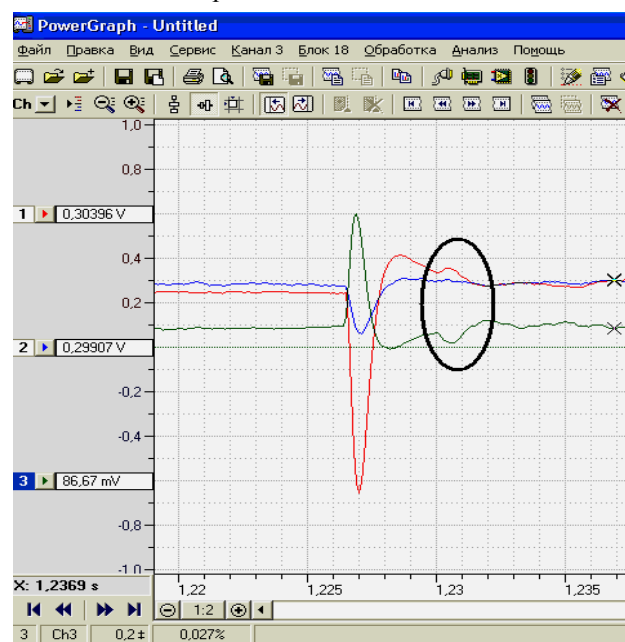


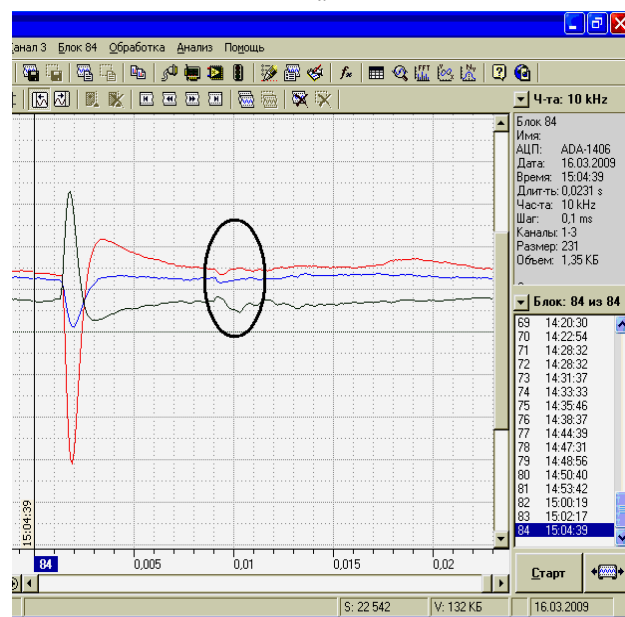
Рис. 10. Фоновые сигналы тензодатчиков, наводимые магнитным полем при напряжениях U_0 : 250; 300; 350; 400 В (слева направо)

Усредненная величина максимальных значений этих всплесков сигналов соответствует максимальной величине ЭДУ f_z , действующих на ударную пластину

(1 мВ сигнала эквивалентен силовой нагрузке 8,936 Н). Длительность ударного импульса t_{pul} определяется длительностью первого всплеска сигнала.



а



б

Рис. 11. Сигналы тензодатчиков при $U_0 = 350$ В, $C = 2850$ мкФ, $Z_e = 10$ мм (а), $Z_e = 25$ мм (б)

При увеличении напряжения U_0 ЕНЭ в данных экспериментах, так же, как и при использовании пьезодатчика, увеличиваются амплитуды токов ОИ и якоря (фоновые сигналы магнитного поля), величина деформации ударной пластины и уменьшается время задержки между электрическими и деформационными процессами t_z .

Экспериментально установлено, что импульс ЭДУ F_z уменьшается при увеличении рабочего хода Z_e при $U_0 = \text{const}$ и растет при увеличении напряжения ЕНЭ U_0 при $Z_e = \text{const}$. У ЛИЭП от начала импульса тока ОИ (электромагнитные процессы) до взаимодействия бояка, ускоряемого якорем, с ударной пласти-

ной (механические процессы) существует запаздывание, составляющее $t_0 = 0,5$ мс при $C = 2850$ мкФ и $U_0 = 300 \dots 350$ В и $Z_e = 0$.

Были проведены экспериментальные исследования по определению средних скоростей якоря V_0 на участке рабочего хода Z_e при разных напряжениях U_0 . Полученная в результате измерений средняя скорость якоря при напряжении 200 В составила 5,1 м/с, что удовлетворительно совпадает с результатами расчета.

Таким образом, тензодатчики позволяют регистрировать не только начало и величину силового воздействия, а и его продолжительность. В целом экспериментальные результаты, полученные с использованием пьезо- и тензодатчиков, хорошо согласуются между собой.

Исследование циклического ударного воздействия ЛИЭП на тонкую стальную пластину. Были проведены эксперименты по пробиванию тонкой (1,5 мм) пластины из нержавеющей стали. При напряжении ЕНЭ $U_0 = 200$ В в этой пластине значение механических напряжений составляет 93,4 МПа, а при $U_0 = 400$ В – 186,8 МПа. Для тонкого листа из стали 12Х18Н10Т предел текучести составляет $\sigma_T = 205$ МПа. Таким образом, при напряжении ЕНЭ $U_0 = 400$ В механические напряжения в пластине находятся на границе предела текучести. Для исследования ударного воздействия ЛИЭП на эту пластину использовалось малоцикловое ударное нагружение и было определено среднее значение числа циклов N до пробивания пластины бойком.

Для первой группы опытов, в которых реализовывалась нагрузка с величиной механических напряжений 400 МПа, $N = 146$ циклов, а для второй группы, при напряжении 457 МПа, $N = 39$ циклов. При пробивании образовалась выпуклость (пробка) диаметром 4 мм и толщиной 1,1 мм с ровными краями.

На рис. 12,а приведены экспериментальная кривая малоциклового ударной прочности и фотографии тонкой стальной пластины, деформированной при соответствующих величинах механических напряжений. На рис. 12,б приведена фотография пробитой бойком ЛИЭП пластины. В результате нескольких экспериментов при циклической работе ЛИЭП было установлено, что среднее число циклов до пробивания пластины $N = 79$.

Исследование с использованием видеосъемки.

На стенде для исследования ЛИЭП с использованием тензодатчиков были проведены измерения мгновенной скорости якоря с бойком при помощи видеосъемки цифровым фотоаппаратом. После съемки осуществлялась обработка записи и разложение ее на отдельные кадры (рис. 13). При этом определялось время, за которое якорь с бойком проходит расстояние до ударной пластины. В среднем время от отрыва якоря до контакта бойка с ударной пластиной составило 9,65 мс. Расстояние от конца бойка до ударной пластины в этом эксперименте – 5 мм. Следовательно, средняя скорость на участке рабочего хода составила 5,18 м/с, что удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов, описанных выше.

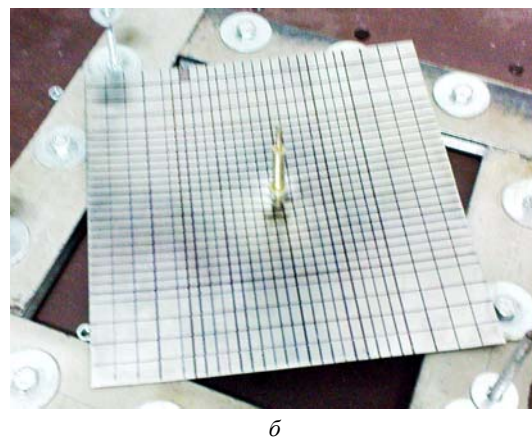
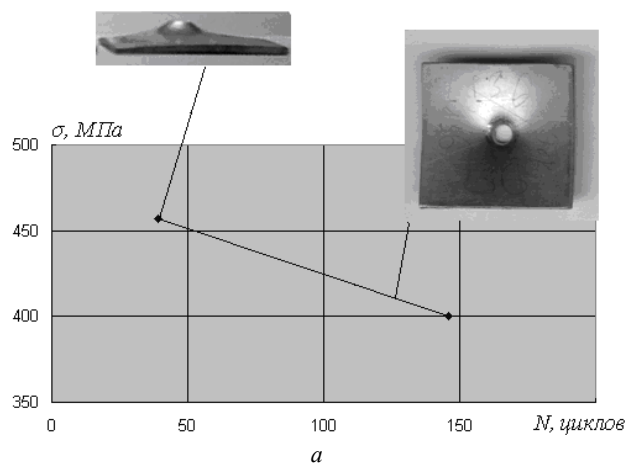


Рис. 12. Кривая малоциклового ударной прочности (а) и пробитая бойком ЛИЭП тонкая стальная пластина (б)



Рис. 13. Результаты видеосъемки в начале (а) и в конце (б) рабочего процесса

Исследование с использованием датчика пульсации давления. Для измерения динамического давления, которое оказывает боек на ударную пластину, был использован пьезоэлектрический датчик пульсаций давления M101A06 фирмы PCB (США) (рис. 14).



Рис. 14. Внешний вид пьезоэлектрического датчика пульсаций давления M101A06 фирмы PCB

Датчик снабжен встроенным усилителем, имеет динамический диапазон 0,68-3450 кПа, чувствительность 1,45 мВ/кПа и частотный диапазон 0,01-130000 Гц. Датчик, выдерживающий максимальное давление 34,5 МПа, содержит встроенный ICP-усилитель (ICP – *Integrated Circuit Piezoelectric*). Показания датчика фиксировались с помощью электронного осциллографа RIGOL (рис. 15).

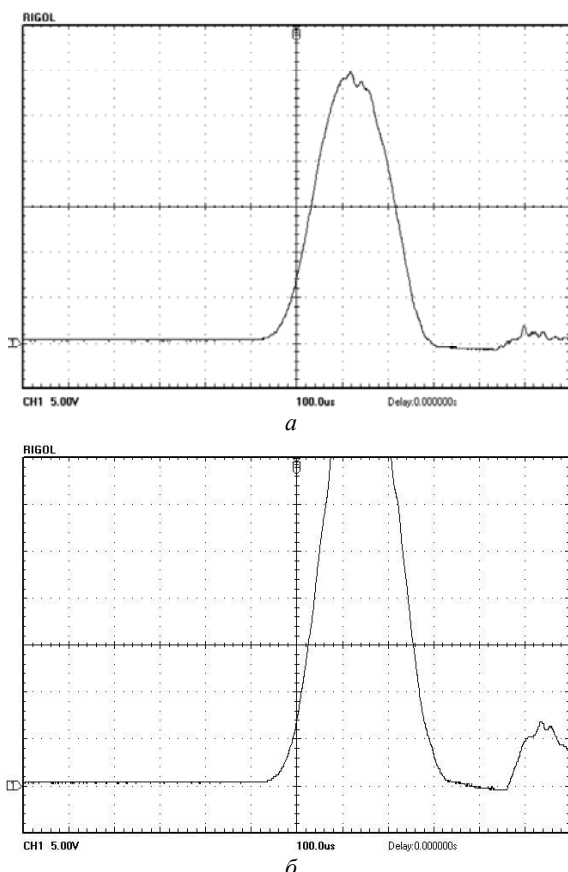


Рис. 15. Осциллограммы динамического давления на ударную пластину при напряжении ЕНЭ 300 В (а) и 400 В (б)

В данных экспериментах определялись форма, величина и длительность силового импульса в ударной пластине при воздействии на нее бойка ЛИЭП. Результаты данных исследований удовле-

творительно согласуются как с расчетными значениями ЭДУ (рис. 1), так и результатами экспериментов, описанных выше.

Исследование ЛИЭП в качестве электромеханического ускорителя. Для исследования ЛИЭП, работающего в качестве электромеханического ускорителя необходимо измерять перемещения якоря в каждый момент времени на рабочем участке. Для этого была разработана установка, представленная на рис. 16. Индуктор 1 ЛИЭП состоит из многовитковой обмотки, намотанной из медной шины в два слоя и заизолированной при помощи эпоксидной смолы. К якору 2 прикреплен стальной ударный диск 3. Индуктор посредством токовводов 4 соединяется с ЕНЭ. Для измерения вертикальных перемещений используется резистивный датчик 5, закрепленный на С-образном каркасе 6.

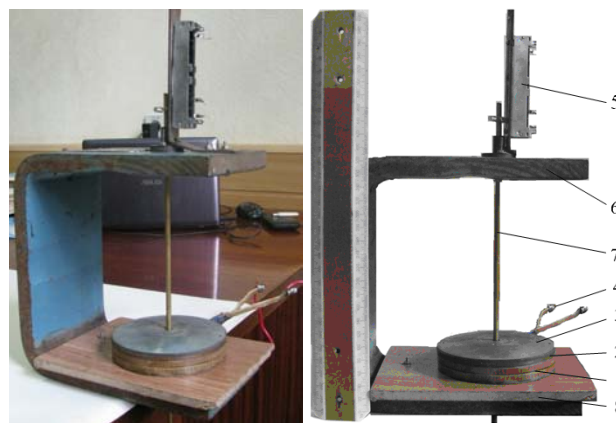
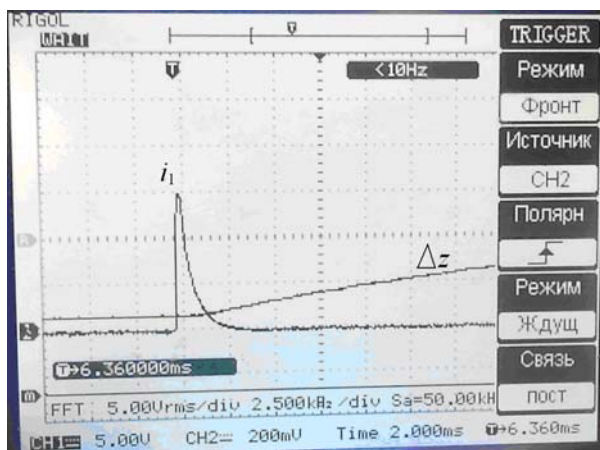


Рис. 16. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИЭП, работающего в качестве ускорителя со стальным силовым диском

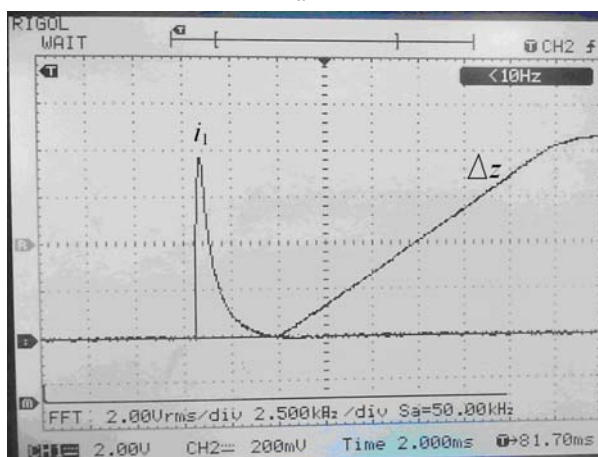
Между горизонтальными стенками каркаса 6 подвижно установлен направляющий стержень 7, проходящий через центральные отверстия индуктора и якоря. Индуктор установлен на неметаллическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 5. К верхней стенке каркаса крепится демпферная пружина (на фото отсутствует). Направляющий стержень соединен с ударным диском и подвижным контактом датчика перемещений, сигнал от которого подается на электронный осциллограф. Таким образом, одновременно измеряются ток в индукторе i_1 и перемещение Δz якоря со стальным ударным диском и направляющим стержнем (рис. 17).

Экспериментально установлено, что перемещение якоря начинается с задержкой по отношению к моменту возникновения токового импульса и носит практически линейный характер на начальном участке разгона. При повышенном напряжении ЕНЭ $U_0 = 400$ В перемещение якоря после прохождения начального участка замедляется, что связано с взаимодействием его с демпферной пружиной.

Были проведены исследования влияния материала ударного диска на показатели работы электромеханического ускорителя. В экспериментах использовались стальной (рис. 16) и керамический (рис. 18) ударные диски.



a



b

Рис. 17. Осциллограммы тока индуктора i_1 и перемещения якоря Δz при напряжении ЕНЭ U_0 : 300 В (a) и 400 В (b) с использованием стального силового диска

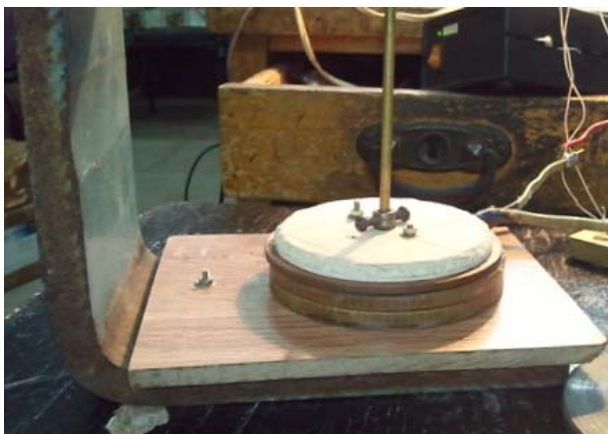


Рис. 18. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИЭП, работающего в качестве ускорителя с керамическим силовым диском

Как показали исследования при использовании керамического силового диска длительность импульса тока ОИ возрастает на 11 %, а его величина – на 15 %. При этом скорость якоря через 1,5 мс возрастает на 3 %, а через 5 мс – на 7 %. Таким образом, керамический силовой диск является более эффективным, чем стальной, хотя технология его изготовления и условия эксплуатации более сложны.

В целом результаты исследований ЛИЭП в качестве электромеханического ускорителя удовлетвори-

тельно согласуются с расчетными показателями: электрические показатели (ток в ОИ) – с точностью до 4 %, а механические показатели (скорость якоря) – с точностью до 9 %.

Выводы. Разработана методика экспериментальных исследований, которая состоит в одновременной регистрации электрических и механических параметров, характеризующих силовые и скоростные показатели ЛИЭП.

Разработана математическая модель ЛИЭП индукционного типа, в которой описываются быстропротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора.

Показано, что электромеханические процессы в ЛИЭП носят сложный пространственно-временной характер, причем в каждый момент времени наблюдается существенная пространственная неравномерность плотности тока, индуцированного в якоре.

Силовые показатели регистрируются с использованием пьезодатчика, системы тензодатчиков, датчика пульсации давления и скоростной видеосъемки, а скоростные показатели – с использованием резистивного датчика перемещений.

Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с результатами расчетов, полученными при помощи математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical. – Stockholm, Sweden. – 2013. – 120 p.
2. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – vol.49. – no.12. – pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.
3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. – 2014. – vol.56. – iss.10. – pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.
4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
5. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
6. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
7. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – vol.39. – no.1. – pp. 382-389. doi: 10.1109/tps.2010.2047276.
8. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №5. – С. 13-18. doi: 10.20998/2074-272X.2014.5.02.
9. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol.86. – no.7. – pp. 425-431. doi: 10.3103/s1068371215070044.

10. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // *Russian electrical engineering*. – 2012. – vol.83. – no.10. – pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
11. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.
12. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // *Russian electrical engineering*. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
13. Наумов И.В., Болюх В.Ф., Бреславский Д.В. Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником // *Механіка та машинобудування*. – 2010. – №1. – С. 207-216.

REFERENCES

1. Bissal A. *Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical*. Stockholm, Sweden. 2013. 120 p.
2. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol.49, no.12, pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.
3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, iss.10, pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.
4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
6. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. *Mul'tifizicheskoe modelirovanie v elektrotehnike* [Multiphysical modeling in electrical engineering]. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus).
7. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol.39, no.1, pp. 382-389. doi: 10.1109/tps.2010.2047276.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Experimental study of ferromagnetic core parameters influence on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter. *Electrical engineering and electromechanics*, 2014, no.5, pp. 13-18. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.5.02.
9. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol.86, no.7, pp. 425-431. doi: 10.3103/s1068371215070044.
10. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*, 2012, vol.83, no.10, pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
11. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. Available at: <http://www.comsol.com> (accessed 05 May 2015).
12. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
13. Naumov I.V., Bolyukh V.F., Breslavskiy D.V. Deformation and fracture of the plates during loading cylindrical drummer. *Mechanics and engineer*, 2010, no.1, pp. 207-216. (Rus).

Поступила (received) 30.11.2016

Болюх Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Кочерга Александр Иванович¹, аспирант,
Олексенко Сергей Владимирович², к.т.н.,
Щукін Ігорь Сергеевич^{1,3}, к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076427,
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

²Акционерная компания «Харьковоблэнерго»,

61037, Харьков, ул. Плехановская, 149,
тел/phone +38 057 7312486, e-mail: oleksenko_sergii@mail.ru

³ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, A.I. Kocherga¹, S.V. Oleksenko², I.S. Schukin^{1,3}

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Joint-stock company «Kharkivoblenergo»,
149, Plekhanovskaia Str., Kharkiv, 61037, Ukraine.

³Firm Tetra, LTD,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A technique of experimental investigations of linear impulse electromechanical converters.

Purpose. Development of a technique of experimental studies linear pulse electromechanical converters parameters, which are used as shock-power devices and electromechanical accelerators, and comparing the experimental results with the calculated indices obtained using the mathematical model. **Methodology.** Method of experimental investigations of linear electromechanical converter is that the electrical parameters are recorded simultaneously (inductor winding current) and mechanical parameters characterizing the power and speed indicators of the yoke with actuator. Power indicators are primarily important for shock-power devices, and high velocity - for electromechanical accelerators. Power indices were investigated using piezoelectric sensors, a system of strain sensors, pressure pulsation sensor and high-speed videorecording. Velocity indicators were investigated using a resistive movement sensor which allows to record character of the armature movement with actuating element in each moment. **Results.** The technique of experimental research, which is the simultaneous recording of electrical and mechanical power and velocity parameters of the linear electromechanical converter pulse, is developed. In the converter as a shock-power device power indicators are recorded using a piezoelectric transducer, strain sensors system, pressure pulsation sensor and high-speed video. The parameters of the inductor winding current pulse, the time lag of mechanical processes in relation to the time of occurrence of the inductor winding current, the average speed of the yoke, the magnitude and momentum of electrodynamics forces acting on the plate strikes are experimentally determined. In the converter as an electromechanical accelerator velocity performance recorded using resistive displacement sensors. It is shown that electromechanical converter processes have complex spatial-temporal character. The experimental results are in good agreement with the calculated figures obtained by means of a mathematical model that describes the ultrafast electromagnetic, thermal and mechanical processes that occur when the yoke moves relative to the inductor. **Originality.** For the first time offered during experimental studies of impulse linear electromechanical converter to both to measure the electrical parameters, namely the inductor winding current, and mechanical parameters characterizing the power and velocity performance with yoke actuator. **Practical value.** The technique of experimental investigations the parameters of the linear pulse electromechanical converter that can be used to investigate the shock-power devices and electromechanical accelerators is proposed. References 13, figures 18.

Key words: linear impulse electromechanical converter, shock-power device, electromechanical accelerator, experimental investigations technique, mathematical model.

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, А.В. Волошко, И.В. Бовдуй, Е.В. Виниченко, Б.Б. Кобылянский

СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ РАЗЛИЧНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проведено аналіз просторово-часового розподілу техногенного магнітного поля, що створюється різними повітряними лініями електропередачі (ПЛ ЛЕП) всередині заданої області простору. Наведено рекомендації з проектування систем активного екранування магнітного поля ЛЕП. Наведені результати синтезу системи активного екранування магнітного поля, яке створюється одноколовою ЛЕП ПЛ 110 кВ «трикутник» магнітного поля з повною поляризацією в житловому п'ятиповерховому будинку, розташованому поблизу ЛЕП. Система містить три компенсаційні обмотки і дозволяє знизити рівень індукції вихідного магнітного поля до санітарних норм практично в усьому просторі житлового будинку. Ефективність системи активного захисту, становить близько 8. Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: повітряні лінії електропередачі, просторово-часовий розподіл магнітного поля промислової частоти, система активного екранування.

Проведен анализ пространственно-временного распределения техногенного магнитного поля, создаваемого различными воздушными линиями электропередачи (ВЛ ЛЭП) внутри заданной области пространства. Приведены рекомендации по проектированию систем активного экранирования магнитного поля ЛЭП. Приведены результаты синтеза системы активного экранирования магнитного поля, создаваемого одноцепной ЛЭП ВЛ 110 кВ с опорой типа «треугольник» вращающегося магнитного поля с полной поляризацией в жилом пятиэтажном доме, расположенном вблизи ЛЭП. Система содержит три компенсационные обмотки и позволяет снизить уровень индукции исходного магнитного поля до санитарных норм практически во всем рассматриваемом пространстве жилого дома. Эффективность системы активного экранирования составляет около 8. Библ. 8, рис. 5.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, пространственно-временное распределение магнитного поля промышленной частоты, система активного экранирования.

Введение. Наиболее опасным для населения источником техногенного магнитного поля (МП) промышленной частоты, являются высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП) [2]. Без принятия специальных мер, они создают интенсивное МП, имеющее канцерогенные свойства на расстояниях до 100 м от ЛЭП. Поэтому в мире ужесточаются санитарные нормы [3] по предельно допустимому уровню индукции магнитного поля 50-60 Гц (менее 1 мкТл) и проводятся интенсивные работы по их обеспечению для населения. В настоящее время жесткие санитарные нормы по индукции МП (0,5 мкТл) вводятся и в нормативные документы Минэнерго Украины [7]. Однако на данный момент в Украине эти нормы повсеместно превышаются, что создает угрозу для здоровья миллионов людей, проживающих ближе 100 м от высоковольтных ЛЭП.

Постановка задачи исследования. Проведенные в институте технических проблем магнетизма НАН Украины комплексные экспериментальные исследования МП действующих воздушных ЛЭП 10-330 кВ показали [8], что их МП в 3-5 раз превышает нормативный уровень на границе ранее сформированных санитарных зон по электрическому полю.

Такое положение требует срочного принятия мер по снижению в 3-5 раз МП действующих ЛЭП в черте городов Украины. Аналогичное положение является типичным для большинства промышленных стран мира, однако в этих странах уже созданы и широко используются технологии нормализации МП действующих ЛЭП [1-5].

Наиболее эффективной технологией является реконструкция ЛЭП путем ее удаления на безопасное расстояние от жилых домов, либо замены воздушной ЛЭП на кабельную линию. Однако такая реконструкция требует огромных материальных средств. Поэтому более приемлемыми для Украины являются менее дорогостоящие методы экранирования МП действующих ЛЭП, из которых необходимую эффективность обеспечивают методы активного контурного экранирования магнитного поля.

Технология активного контурного экранирования МП действующих ЛЭП разработана и используется в развитых странах мира более 10 лет, например в США и Израиле [1-5]. В Украине же в настоящее время, как такая технология, так и научные основы ее создания, отсутствуют. Это не позволяет относительно недорогими методами осуществлять защиту населения от техногенного МП промышленной частоты, создаваемого ЛЭП. Поэтому создание научных основ отечественной технологии активного экранирования МП промышленной частоты в домах до безопасного уровня является актуальной научно-технической проблемой.

Целью работы является анализ пространственно-временного распределения МП ЛЭП различного конструктивного исполнения и разработка рекомендаций по проектированию систем активного экранирования МП ЛЭП.

Анализ пространственно-временного распределения магнитного поля ЛЭП различного конструктивного исполнения. В качестве первого примера

рассмотрим ЛЭП с опорой ЛБ 330 – 3, у которой токопроводы расположены в горизонтальной плоскости, фотография которой показана рис. 1,а. Схема расположения токопроводов и точки, в которых будут рассматриваться годографы МП показаны на рис. 1,б, а на рис. 1,в показаны годографы векторов МП в трех рассматриваемых точках.

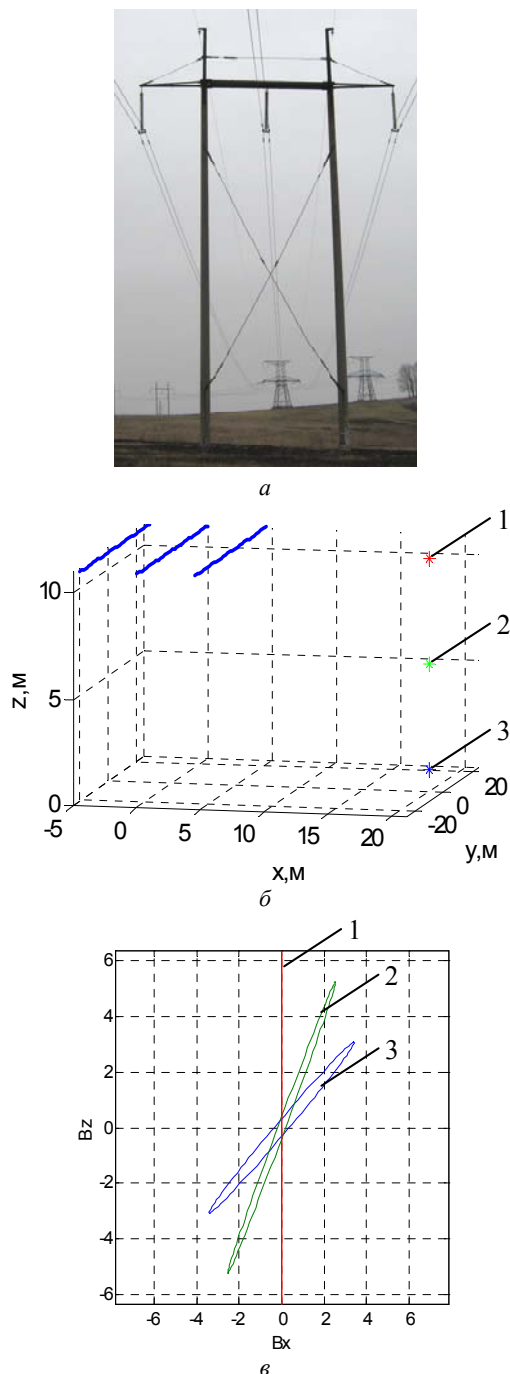


Рис. 1. Одноцепная ЛЭП с опорой ЛБ 330 – 3

Как видно из рис. 1, годографы МП представляют сильно вытянутые эллипсы, а в точке 1 коэффициент эллипсности (отношение меньшей полуоси эллипса к большей полуоси) вообще равен нулю, так что годограф вектора МП вытягивается в вертикальную линию.

В качестве второго примера рассмотрим одноцепную ЛЭП с опорой У 330, у которой токопроводы

расположены один под другим в вертикальной плоскости, как это показано рис. 2,а. Схема расположения токопроводов и точек, в которых будут рассматриваться годографы МП, показаны на рис. 2,б, а на рис. 2,в показаны годографы вектора МП в рассматриваемых точках.

Как видно из рис. 2, годографы МП этой ЛЭП также представляют сильно вытянутые эллипсы, а в точке 1 большая ось эллипса находится в горизонтальной плоскости. В целом, годографы этой ЛЭП развернуты относительно годографов, показанных на рис. 1,в, на угол $\pi/2$.

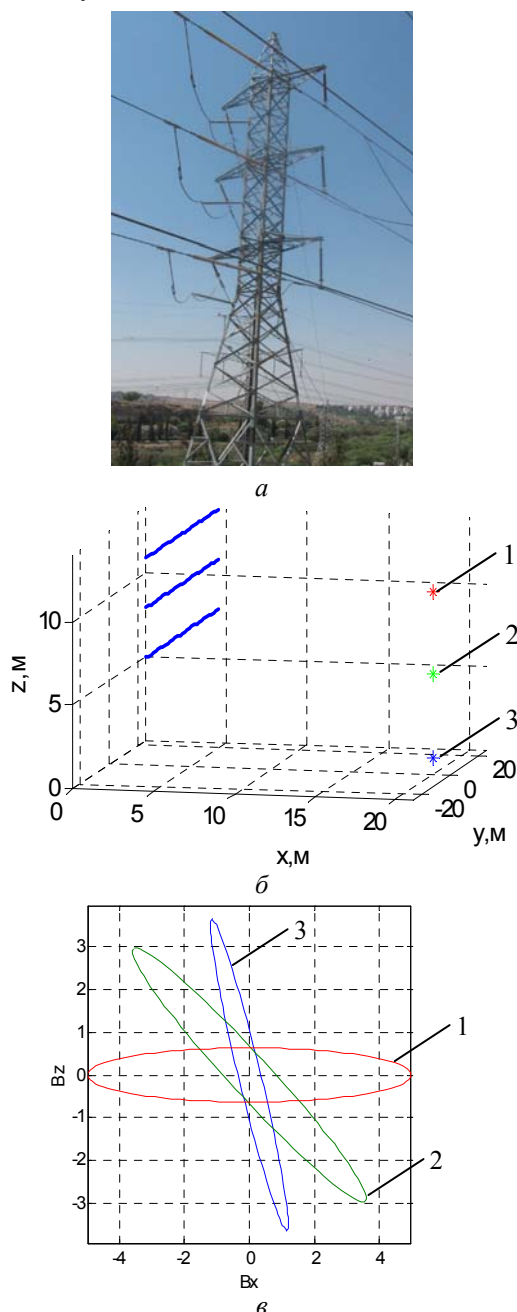


Рис. 2. Одноцепная ЛЭП с опорой У 330

В качестве третьего примера рассмотрим наиболее распространенный вариант двухцепной ЛЭП с опорами типа У 330 – 2 типа «бочка», у которой токопроводы расположены в форме, напоминающей бочку, фотография которой показана рис. 3,а.

Схема расположения токопроводов и точки, в которых будут рассматриваться годографы МП, показаны на рис. 3,б, а сами годографы вектора МП в трех рассматриваемых точках показаны на рис. 3,в. Как видно из рис. 3, годографы этого МП представляют менее вытянутые эллипсы, по сравнению с годографами МП, создаваемого ЛЭП с опорами: ЛБ 330 – 3 и У 330, которые показаны на рис. 1,в и рис. 2,в соответственно.

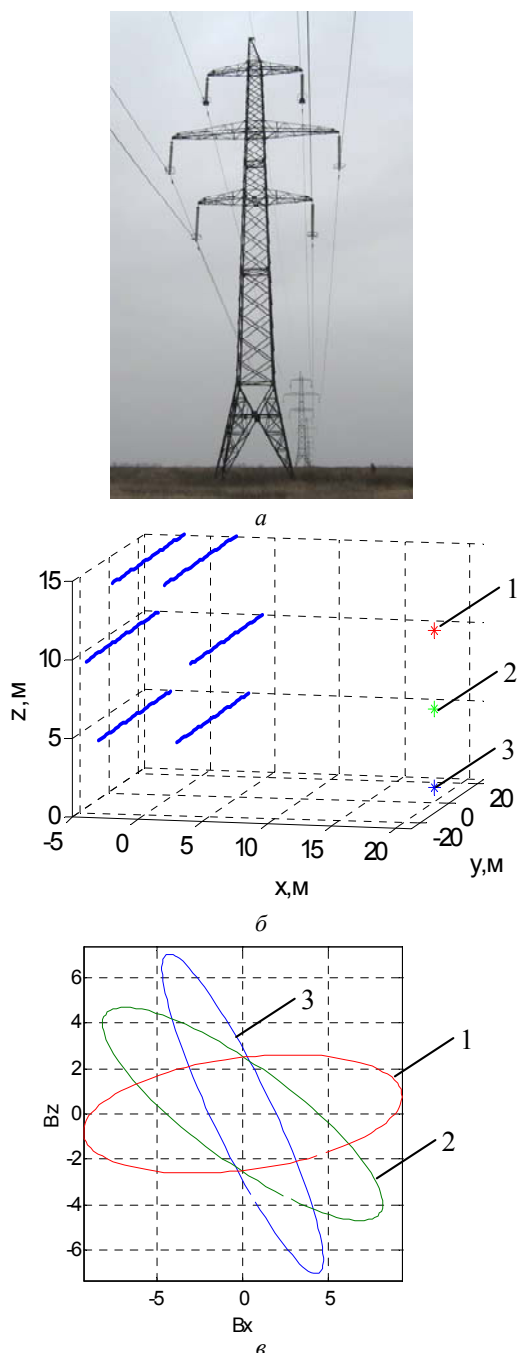


Рис. 3. Двухцепная ЛЭП с опорами типа У 330 – 2 типа «бочка»

В качестве четвертого примера рассмотрим наиболее распространенный вариант одноцепной ЛЭП с опорой У 330 – 1Т типа «треугольник», фотография которой показана рис. 4,а, а на рис. 4,б показана схема расположения токопроводов и точки, в которых будут рассматриваться годографы МП, а на рис. 4,в показаны

сами годографы вектора МП. Как видно из рис. 4, годографы этого магнитного поля близки к окружности, так что коэффициенты эллипсности почти равны единице и, следовательно, такое МП является сильно поляризованным.

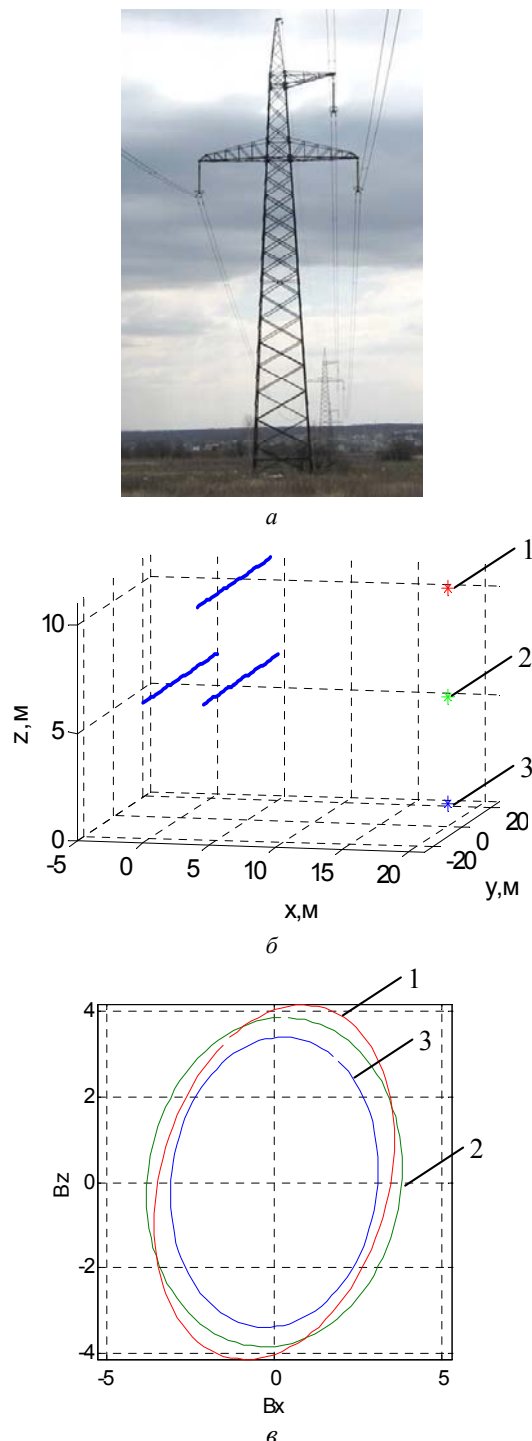


Рис. 4. Одноцепная ЛЭП с опорой У 330 – 1Т типа «треугольник»

Принцип построения систем активного экранирования. Сущность метода активного экранирования МП ЛЭП состоит в формировании компенсирующего МП с такой пространственно-временной структурой, суперпозиция которого с МП ЛЭП в зоне защиты минимизируется до уровня санитарных норм. Метод реализуется с помощью системы активного эк-

ранирования, которая состоит из компенсационных обмоток, с помощью которых формируется компенсирующее МП. Токи в компенсационных обмотках автоматически формируются по определенному алгоритму в функции сигнала с датчиков МП, установленных в зоне защиты. Система содержит источник тока, получающий энергию от внешнего источника.

При использовании в системе активного экранирования только одной компенсационной обмотки можно создать компенсирующее МП, вектор индукции которого ортогонален плоскости обмотки и не изменяет своего положения со временем. Поэтому с помощью такой системы можно скомпенсировать большую полуось эллипса годографа вектора индукции магнитного поля и получить достаточно высокую эффективность экранирования слабо поляризованного МП. Такие системы можно рекомендовать для компенсации слабо поляризованного МП, создаваемого ЛЭП с опорами ЛБ 330 – 3, У 330 и У 330 – 2 «бочка». Именно для ЛЭП с такими типами опор и получили наибольшее распространение в мире системы активного экранирования МП с одной компенсационной обмоткой [1, 2, 4].

Для компенсации сильно поляризованного МП, создаваемого ЛЭП с опорами У 330 – 1Т «треугольник» необходимо, по меньшей мере, две компенсационные обмотки.

Метод синтеза эффективных замкнутых систем активного экранирования МП промышленной частоты, создаваемого воздушными ЛЭП в помещениях жилых домов разработан в [6]. Метод основан на решении задачи многокритериальной оптимизации, в которой вычисления векторов целевой функции и ограничений выполняются на основании уравнений Максвелла в квазистационарном приближении, а задача оптимизации решается методом мультироевой стохастической мультиагентной оптимизации на основе Парето-оптимальных решений.

Результаты моделирования на ЭВМ. В качестве примера рассмотрим синтез системы активного экранирования МП одноцепной ЛЭП ВЛ 110 кВ «треугольник», создающей вращающееся МП с полной поляризацией в жилом пятиэтажном доме, расположенном вблизи ЛЭП, схема которой показана на рис. 5,а. При токе ЛЭП 1000 А исходная индукция МП в рассматриваемом пространстве составляет 4 мкТл, что в 8 раз превышает санитарные нормы [7]. Для компенсации этого техногенного МП в рассматриваемом пространстве потребовалось три компенсационные обмотки, пространственное расположение которых показано на рис. 5,а. Расчетное количество ампер-витков компенсационных обмоток составляет 177, 195 и 199. Распределение результирующего МП при включенной системе активного экранирования показано на рис. 5,б. Как видно из рис. 5, с помощью системы активного экранирования удалось снизить уровень индукции исходного МП до санитарных норм практически во всем рассматриваемом пространстве жилого дома. При этом эффективность системы активного экранирования составляет около 8.

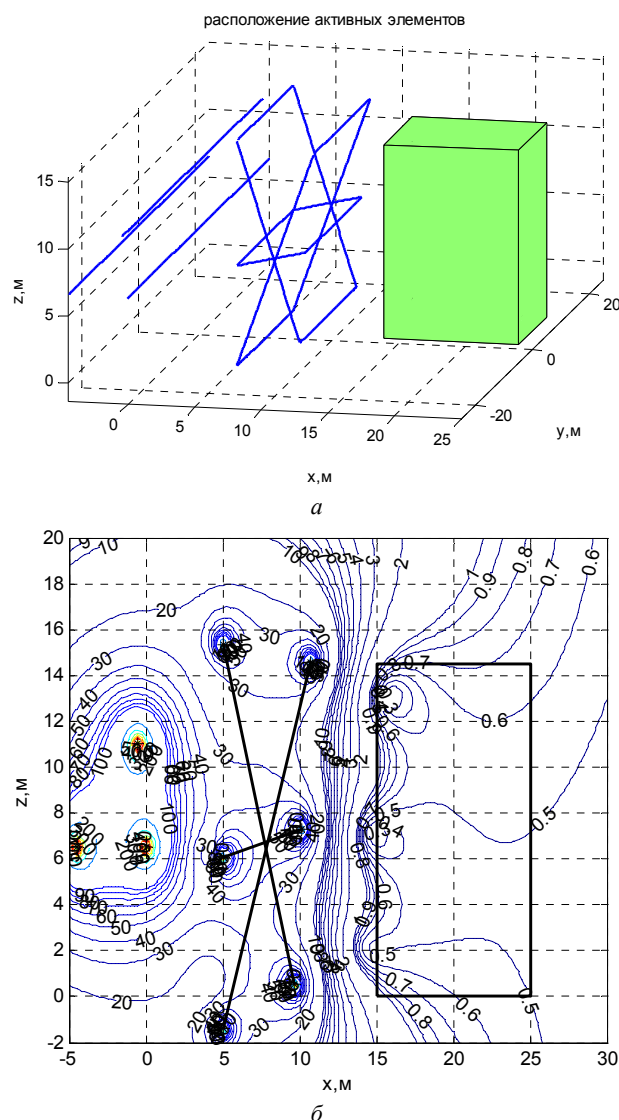


Рис. 5. Схема расположения ЛЭП, компенсирующих обмоток и защищаемой области (а) и распределение суммарного магнитного поля с включенной системой активного экранирования (б)

Выводы. Проведен анализ пространственно-временного распределения МП, создаваемого ЛЭП различного конструктивного исполнения с опорами типа ЛБ 330 – 3, У 330, У 330 – 2 «бочка», и У 330 – 1Т «треугольник». Разработаны рекомендации по проектированию компенсационных обмоток систем активного экранирования МП ЛЭП. Приведены результаты синтеза системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты, создаваемого одноцепной ЛЭП ВЛ 110 кВ с опорами У 330 – 1Т «треугольник» вращающегося МП с полной поляризацией в жилом пятиэтажном доме, расположенном вблизи ЛЭП. Система содержит три компенсационные обмотки и позволяет снизить уровень индукции исходного МП до санитарных норм в 0,5 мкТл практически во всем рассматриваемом пространстве жилого дома. Эффективность системы активного экранирования составляет около 8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.

2. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications // 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE), Marbella (Málaga). – 2005. – pp. 84-99.
3. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms // *Measurement Science and Technology*. – 1993. – Vol. 4. – Issue 12. – pp. 1370-1375. doi: 10.1088/0957-0233/4/12/010.
4. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization // *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*. – 2004. – Vol. 151. – № 1. – pp. 2-7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002.
5. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line // *HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering*. – Vol. 2. – Issues 1-2, pp. 254-265.
6. Кузнецов Б.И., Туренко А.Н., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Коломиец В.В. Метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – №4. – С. 8-10.
7. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
8. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – №3. – С. 6-8.

REFERENCES

1. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
2. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. 9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE), Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84-99.
3. Ter Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. *Measurement Science and Technology*, 1993, Vol. 4, Issue 12, pp. 1370-1375. doi: 10.1088/0957-0233/4/12/010.
4. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, Vol.151, no.1, pp. 2-7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002.
5. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering. Series B: Applied Sciences and Engineering*, Vol. 2, Issues 1-2, pp. 254-265.
6. Kuznetsov B.I., Turenko A.N., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Kolomiets V.V. Method of synthesis of closed-loop systems of active shielding magnetic field of power transmission lines. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2016, no.4, pp. 8-10. (Rus).
7. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok. Vyd. 3, pererob. i dop* [Electrical Installation Regulations. 3rd edition, revised and enlarged]. Kyiv, Minpalyvenergo of Ukraine Publ., 2010. 736 p. (Ukr).
8. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2016, no.3, pp. 6-8. (Rus).

Поступила (received) 15.09.2016

Кузнецов Борис Иванович¹, д.т.н., проф.,
Никитина Татьяна Борисовна², д.т.н., проф.,
Волошко Александр Валерьевич¹, к.т.н., н.с.,
Бовдуй Игорь Валентинович¹, к.т.н., н.с.,
Виниченко Елена Владимировна¹, к.т.н., м.н.с.,
Кобылянский Борис Борисович¹, к.т.н. доц.

¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,

тел/phone +38 050 5766900, e-mail: bikuznetsov@mail.ru

² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

61002, Харьков, ул. Петровского, 25,

e-mail: tatjana55555@gmail.com

B.I. Kuznetsov¹, T.B. Nikitina², A.V. Voloshko¹, I.V. Bovydyj¹,
E.V. Vinichenko¹, B.B. Kobilyanskiy¹

¹ State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,

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

² Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Synthesis of active screening system of magnetic field of high voltage power lines of different design taking into account spatial and temporal distribution of magnetic field.

Purpose. Analyze the spatial and temporal distribution of the magnetic field of high voltage power lines with different design allowing and development of recommendations for the design of active screening systems by magnetic field of high voltage power lines. **Methodology.** Analysis of the spatial and temporal distribution of the magnetic field of high voltage power lines of different design allowing is made on the basis of Maxwell's equations solutions in the quasi-stationary approximation. Determination of the number, configuration, spatial arrangement and the compensation coil currents is formulated in the form of multiobjective optimization problem that is solved by multi-agent multiswarm stochastic optimization based on Pareto optimal solutions. **Results** of active screening system for the synthesis of various types of transmission lines with different numbers of windings controlled. The possibility of a significant reduction in the level of the flux density of the magnetic field source within a given region of space. **Originality.** For the first time an analysis of the spatial and temporal distribution of the magnetic field of power lines with different types and based on findings developed recommendations for the design of active screening system by magnetic field of high voltage power lines. **Practical value.** Practical recommendations on reasonable choice of the number and spatial arrangement of compensating windings of active screening system by magnetic field of high voltage power lines of different design allowing for the spatial and temporal distribution of the magnetic field. Results of active screening system synthesis of the magnetic field of industrial frequency generated by single-circuit 110 kV high voltage power lines with the supports have 330 - 1T «triangle» rotating magnetic field with full polarization in a residential five-storey building, located near the power lines. The system contains three compensating coil and reduces the level of induction of the magnetic field source to the sanitary standards of 0.5 μT in almost of all the house space. References 8, figures 5.

Key words: high voltage power lines, spatial and temporal distribution of the power frequency technogenic magnetic field, active screening system.

ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ МНОГОМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОРОЕВОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Удосконалено метод багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі побудови Парето-оптимальних рішень та з урахуванням бінарних відношень локальних критеріїв за допомогою алгоритмів багатороевої стохастичної мультиагентної оптимізації, що дозволяє істотно скоротити час вирішення задачі і задовольнити різноманітним вимогам, які пред'являються до роботи систем в різних режимах. Наведені результати порівнянь динамічних характеристик електромеханічних систем з синтезованими регуляторами. Бібл. 9, рис. 3.

Ключові слова: багатомасова електромеханічна система, багатокритеріальний синтез, багатороева стохастична мультиагентна оптимізація, Парето-оптимальне рішення.

Усовершенствован метод многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе построения Парето-оптимальных решений и с учетом бинарных отношений предпочтения локальных критериев с помощью алгоритмов многороевой стохастической мультиагентной оптимизации, что позволяет существенно сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. Приведены результаты сравнений динамических характеристик электромеханических систем с синтезированными регуляторами. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, многокритериальный синтез, многороевая стохастическая мультиагентная оптимизация, 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. [8, 9], так что задача синтеза таких систем по своей постановке является многокритериальной.

Постановка задачи и цель работы. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми электромеханическими системами может быть сведен [8] к решению многокритериальной задачи нелинейного программирования, в которой векторная целевая функция

$$f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)]^T \quad (1)$$

и ограничения на управления и переменные

$$G(X) \leq G_{\max}, \quad H(X) = 0. \quad (2)$$

Компонентами $f_i(X)$ векторного критерия (1) являются локальные критерии оптимизации многомассовой электромеханической системы, такие как время первого согласования, время регулирования, перерегулирование и т.д.

Компонентами вектора искомых параметров X являются элементы весовых матриц, с помощью которых формируется вектор цели робастного управления [8].

Вычисление векторной целевой функции (1) и ограничений (2) носит алгоритмический характер и связан с решением задачи синтеза робастных регуля-

торов, с помощью которых минимизируется H_∞ норма вектора цели, и сводится к вычислению четырех алгебраических уравнений Риккати [8] для вычисления робастного регулятора и робастного наблюдателя в рамках четырех Риккати подхода к синтезу робастных систем. Решение задачи синтеза анизотропных регуляторов, с помощью которых минимизируется средняя анизотропия системы, сводится к вычислению четырех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и выражения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала [9].

Решение многокритериальной задачи оптимизации путем сворачивания векторного критерия в скалярный с помощью весовых множителей [4, 5] фактически заменяет исходную проблему решения многокритериальной оптимизации на проблему выбора весовых множителей. Часто проблема корректного определения весовых множителей по сложности многократно превышает исходную проблему решения задачи многокритериальной оптимизации, так как для определения весовых множителей приходится многократно решать полученную задачу скалярной оптимизации при рутинной нагрузке лица, принимающего решение. Кроме того, полученная в результате такого преобразования скалярная целевая функция имеет участки типа «плато» и «оврагов», что требует для ее решения специальных алгоритмов, в то время как скалярные компоненты векторной целевой функции исходной задачи многокритериальной оптимизации являются достаточно гладкими.

На сегодняшний день закончена разработка теории корректного решения исходной задачи многокритериальной оптимизации на основе построения

Парето-оптимальных решений без процедуры сворачивания локальных критериев. Для нахождения глобального оптимума кроме задания векторной целевой функции и ограничений требуется еще задание бинарных отношений предпочтения локальных критериев оптимизации, являющихся компонентами исходного векторного критерия оптимизации. Для решения такой задачи на основе Парето-оптимальных решений в настоящее время наиболее успешно применяются алгоритмы многороевой стохастической мультиагентной оптимизации [1-3]. Наибольшую сложность при этом имеют задачи многокритериальной оптимизации с учетом ограничений [6, 7]. Рассмотрим один из вариантов построения такого алгоритма на основе нелинейных законов управления.

Целью работы является усовершенствование метода решения задачи многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе построения Парето-оптимальных решений и с учетом бинарных отношений предпочтения локальных критериев оптимизации с помощью многороевой стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц, что позволяет сократить время определения параметров робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе таких систем в различных режимах.

Поиск множества Парето на основе многороевой стохастической мультиагентной оптимизации. Для корректного решения задачи многокритериальной оптимизации кроме векторного критерия оптимизации (1) и ограничений (2) необходимо еще иметь информацию о бинарных отношениях предпочтения локальных решений относительно друг друга [5]. Основой такого формального подхода является построение областей Парето-оптимальных решений. Такой подход позволяет существенно сузить область возможных оптимальных решений исходной задачи многокритериальной оптимизации и, следовательно, уменьшить трудоемкость лица, принимающего решение по выбору единственного варианта оптимального решения.

Задача нахождения минимума локального критерия $f_i(X)$ в рассматриваемом пространстве, как правило, является многоэкстремальной, содержащей локальные минимумы и максимумы, поэтому, для ее решения целесообразно использовать алгоритмы стохастической мультиагентной оптимизации [2]. 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 [6]. Применение стохастических мультиагентных методов оптимизации для решения многокритериальных задач на сегодняшний день вызывает определенные трудности и это направление продолжает интенсивно развиваться [7]. Для решения исходной многокритериальной

задачи нелинейного программирования (1) с ограничениями (2) построим алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации на основе множества роев частиц, количество которых равно количеству компонент векторного критерия оптимизации. В стандартном алгоритме оптимизации роем частиц изменение скоростей частиц осуществляется по линейным законам [6]. Для повышения скорости нахождения глобального решения в последнее время получили распространение специальные нелинейные алгоритмы стохастической мультиагентной оптимизации, предложенные в [1], в которых движение i -той частицы j -того роя описывается следующими выражениями

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) [y_{ij}^*(t) - x_{ij}(t)] + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)], \quad (3)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (4)$$

где $x_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ – положение и скорость i -той частицы j -того роя; 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 – lbest и глобальное – gbest положения i -той частицы, найденные соответственно только одной i -той частицей и всеми частицами j -того роя. Использование коэффициента инерции w_j позволяет улучшить качество процесса оптимизации.

В качестве функции переключения H движения частицы соответственно к локальному $y_{ij}(t)$ и глобальному $y_j^*(t)$ оптимуму используется функция Хевисайда. Параметры переключения когнитивной p_{1j} и социальной p_{2j} компонент скорости движения частицы соответственно к локальному и глобальному оптимуму; случайные числа $\varepsilon_{1j}(t)$ и $\varepsilon_{2j}(t)$, определяют параметры переключения движения частицы соответственно к локальному и глобальному оптимуму. Если $p_{1j} < \varepsilon_{1j}(t)$ и $p_{2j} < \varepsilon_{2j}(t)$, то скорость движения i -той частицы j -того роя на шаге t не изменяется и частица движется в том же направлении что и на предыдущем шаге оптимизации.

С помощью отдельных j -тых роев (3), (4) решаются задачи оптимизации скалярных критериев $f_i(X)$, которые являются компонентами векторного критерия оптимизации (1). Для нахождения глобального решения исходной многокритериальной задачи в ходе поисков оптимальных решений локальных критериев отдельные рои обмениваются информацией между собой. При этом для вычисления скорости движения частиц одного роя используется информация о глобальном оптимуме, найденным частицами другого роя, что позволяет выделить все потенциальные Парето-оптимальные решения. С этой целью на каждом шаге t движения i -той частицы j -того роя используются функции предпочтений локальных решений, полученных всеми роями. Решение $X_j^*(t)$, полученное в ходе оптимизации целевой функции $f_i(X)$ с помощью j -того роя, является предпочтительным по отношению

к решению $X_k^*(t)$, полученному в ходе оптимизации целевой функции $f(X)$ с помощью k -того роя, т.е. $X_j^*(t) > X_k^*(t)$, если выполняется условие бинарного предпочтения. При этом в качестве глобального оптимального решения $X_k^*(t)$ k -того роя используется глобальное решение $X_j^*(t)$, полученное j -тым роем, которое является более предпочтительным по отношению к глобальному решению $X_k^*(t)$ k -того роя на основании отношения предпочтения.

Фактически при таком подходе реализуется основная идея метода последовательного сужения области компромиссов – из исходного множества возможных решений на основании информации об относительной важности локальных решений последовательно удаляются все Парето-оптимальные решения, которые не могут быть выбранными согласно имеющейся информации о бинарных отношениях предпочтения локальных критериев. Удаление осуществляется до тех пор, пока не будет получено глобально оптимальное решение. В результате применения такого подхода на каждом шаге сужения не будет удалено ни одно потенциально оптимальное решение.

Обычно начальное положение агентов роя задается случайным образом, а затем из этого положения 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 и то, что в них не требуется вычисления производных целевой функции, они практически нечувствительны к близости начального положения к искомому оптимальному решению, и позволяют легче учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума.

Результаты моделирования на ЭВМ. В качестве примера рассмотрим переходные процессы в электромеханической следящей системе [9] с синтезированными робастными регуляторами. Одним из характерных режимов работы рассматриваемой электромеханической следящей системы является отработка заданного линейно изменяющегося угла поворота рабо-

чего механизма. Для обеспечения нулевой установившейся ошибки системы в таком режиме требуется второй порядок астатизма системы по задающему воздействию. В существующей системе используются ПД регуляторы, так как введение интегральной составляющей приводит к возникновению незатухающих колебаний в режиме отработки заданных углов положения рабочего органа, обусловленных наличием сухого трения на валах приводного двигателя и рабочего органа. С помощью робастных регуляторов удалось обеспечить устойчивую работу системы с учетом всех существенных нелинейностей, присущих элементам этой системы, при введении в контур управления двух интегрирующих звеньев.

Выполним исследование чувствительности такой робастной системы с астатизмом 2-го порядка с учетом всех нелинейностей для трех различных значений момента инерции рабочего органа, изменяющегося в ходе работы системы.

На рис. 1 показаны переходные процессы: а) угла поворота $\varphi(t)$ и б) скорости вращения $\omega_m(t)$ рабочего механизма при наведении на перебросочных скоростях (35 град/с).

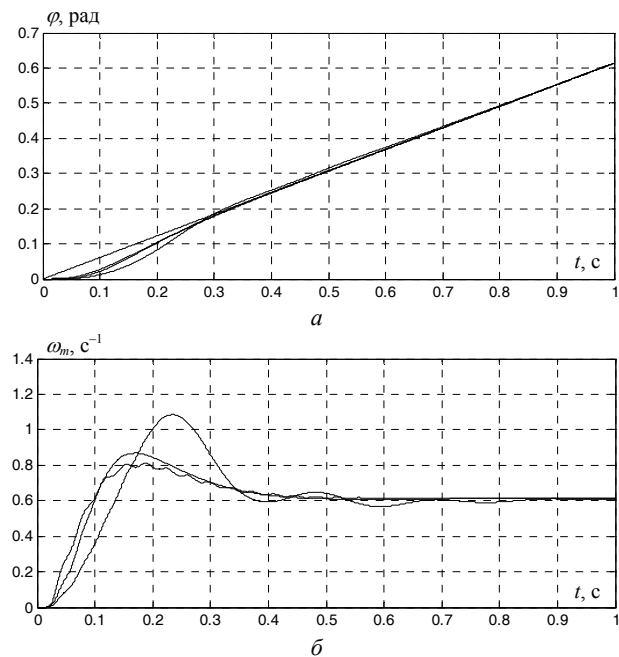


Рис. 1. Переходные процессы: а) угла поворота $\varphi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$ рабочего механизма при наведении на перебросочных скоростях (35 град/с)

Установившаяся ошибка отработки заданного линейно изменяющегося угла поворота рабочего механизма равна нулю и, следовательно, синтезированная система обладает астатизмом второго порядка. Заметим, что в течение первых 0,02 с. рабочий орган остается неподвижным, так как за это время происходит страгивание приводного двигателя, а затем закручивание вала, соединяющего приводной двигатель и рабочий орган на такой угол, при котором момент упругости становится больше момента сухого трения рабочего органа. При изменении момента инерции рабочего механизма переходные процессы изменяют-

ся незначительно, что подтверждает слабую чувствительность синтезируемой системы, а установившиеся скорости движения рабочего механизма совпадают.

На рис. 2 показаны переходные процессы тех же переменных состояния при наведении рабочего механизма на малых скоростях (0,5 град/с). При этом рабочий механизм движется рывками и с остановками, однако установившаяся ошибка системы практически равна нулю. Заметим, что в этом режиме рабочий орган остается неподвижным в течение первых 0,08 с, что в четыре раза дольше, чем при движении рабочего органа с перебросочной скоростью, как это показано на рис. 1.

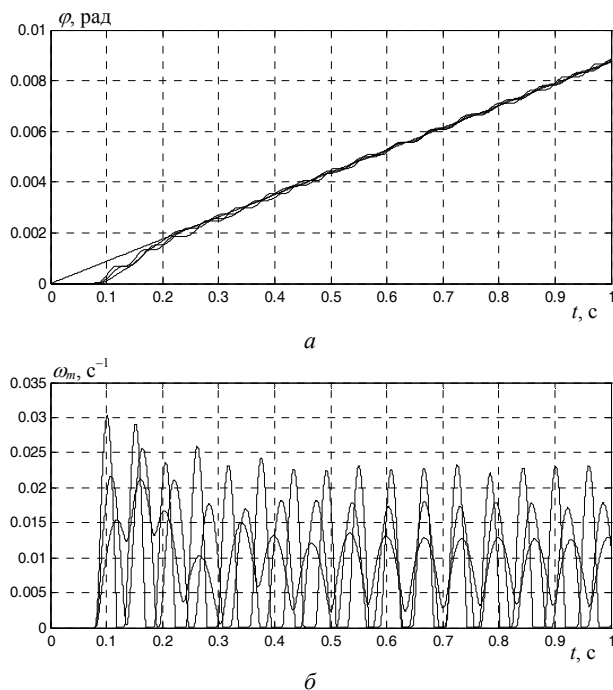


Рис. 2. Переходные процессы: а) угла поворота $\phi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$ рабочего механизма при наведении на малых скоростях (0,5 град/с)

На рис. 3 показаны переходные процессы тех же переменных состояния при наведении рабочего механизма на сверх малых – ползучих скоростях (0,02 град/с). Заметим, что такой режим работы определяет потенциальную точность рассматриваемой электромеханической следящей системы и, в основном, характеризует ее тактико-технические характеристики [9]. В этом режиме рабочий орган остается неподвижным в течение первых 0,3 с, что в 15 раз дольше, чем при движении рабочего органа с перебросочной скоростью. Такая длительная задержка начала движения рабочего органа обусловлена требуемым временем, необходимым для появления ошибки отработки заданного угла положения рабочего органа и выработки соответствующих моментов двигателя и момента упругости вала, соединяющего приводной двигатель с рабочим органом, необходимых для страгивания, вначале приводного двигателя, а затем, и рабочего органа электромеханической следящей системы. При этом рабочий механизм движется рывками и содержит участки типа остановка, движение вперед, остановка, движение назад, а ошибка системы в уста-

новившемся режиме колеблется относительно нулевого значения с амплитудой $5 \cdot 10^{-4}$ рад.

Результаты сравнений динамических характеристик следящей электромеханической системы показали, что применение синтезированных робастных регуляторов позволило уменьшить ошибку наведения рабочего механизма и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с существующей системой с типовыми регуляторами.

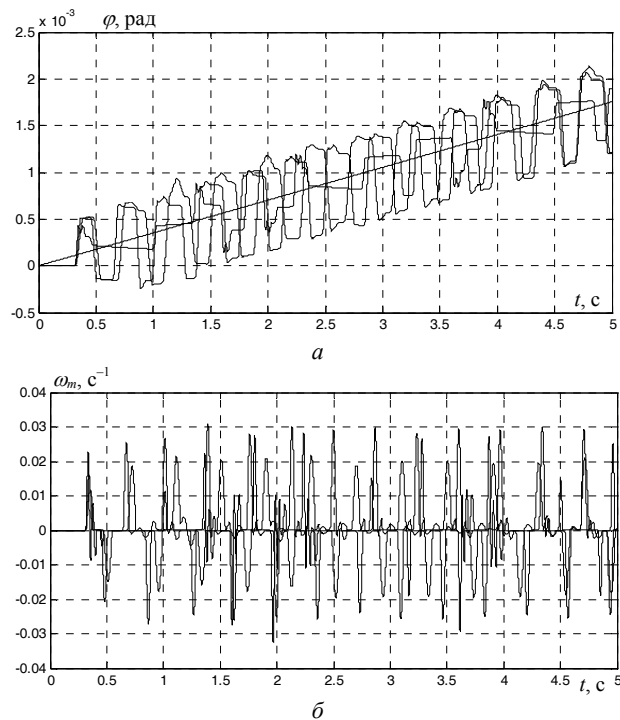


Рис. 3. Переходные процессы: а) угла поворота $\phi(t)$; б) скорости вращения $\omega_m(t)$ рабочего механизма при наведении на сверх малых – ползучих скоростях (0,02 град/с)

Выводы. На основе построения Парето-оптимальных решений и с учетом бинарных отношений предпочтения локальных критериев с помощью алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц усовершенствован метод решения сформулированной многокритериальной многоэкстремальной задачи нелинейного программирования с ограничениями, к которой сводится задача многокритериального синтеза робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем, что позволяет существенно сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах. Показано, что применение синтезированных робастных регуляторов позволило уменьшить ошибку наведения рабочего механизма и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abido M.A. Two-level of nondominated solutions approach to multiobjective particle swarm optimization // Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation – GECCO'07. – 2007. – pp. 726-733. doi: 10.1145/1276958.1277109.

2. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London, ISTE Ltd., 2006. – 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.
3. Fieldsend Jonathan E., Singh Sameer. A multi-objective algorithm based upon particle swarm optimization, an efficient data structure and turbulence // *Proceedings of the 2002 U.K. Workshop on Computational Intelligence*. – 2002. – pp. 37-44.
4. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. – Springer, 2011. – 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.
5. Hu Xiaohui, Eberhart R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization // *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02* (Cat. No.02TH8600). doi: 10.1109/cec.2002.1004494.
6. Nor Azlina Ab. Aziz, Mohamad Yusoff Alias, Ammar W. Mohemmed, Kamarulzaman Ab. Aziz. Particle Swarm Optimization for constrained and multiobjective problems: a brief review // *International Conference on Management and Artificial Intelligence IPEDR*. – Bali, Indonesia. – №6. – pp. 146-150.
7. Zizler Eckart. Evolutionary algorithms for multiobjective optimizations: methods and applications. Ph.D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1999. – 122 p.
8. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. – Харьков: ХНАДУ, 2013. – 432 с.
9. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе Парето-оптимального решения // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №1. – С. 29-35.

REFERENCES

1. Abido M.A. Two-level of nondominated solutions approach to multiobjective particle swarm optimization. *Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation – GECCO'07*. 2007, pp. 726-733. doi: 10.1145/1276958.1277109.
2. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.
3. Fieldsend Jonathan E., Singh Sameer. A multi-objective algorithm based upon particle swarm optimization, an efficient data structure and turbulence. *Proceedings of the 2002 U.K. Workshop on Computational Intelligence*, 2002, pp. 37-44.
4. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. Springer, 2011. 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.
5. Hu Xiaohui, Eberhart R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization. *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02* (Cat. No.02TH8600). doi: 10.1109/cec.2002.1004494.
6. Nor Azlina Ab. Aziz, Mohamad Yusoff Alias, Ammar W. Mohemmed, Kamarulzaman Ab. Aziz. Particle Swarm Optimization for constrained and multiobjective problems: a brief review. *International Conference on Management and Artificial Intelligence IPEDR*. Bali, Indonesia, no.6, pp. 146-150.
7. Zizler Eckart. Evolutionary algorithms for multiobjective optimizations: methods and applications. Ph.D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1999. 122 p.
8. Nikitina T.B. *Mnogokriterial'nyj sintez robastnogo upravlenija mnogomassovymi sistemami* [Multicriterion synthesis of robust control by multimass systems]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University Publ., 2013. 432 p. (Rus).
9. Nikitina T.B. Multiobjective synthesis of robust control by multimass electromechanical systems based on Pareto-optimal solution. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 29-35. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.06.

Поступила (received) 20.11.2016

Никитина Татьяна Борисовна, д.т.н., проф.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
e-mail: tatjana55555@gmail.com

T.B. Nikitina

Kharkov National Automobile and Highway University,
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Pareto optimal solution of multiobjective synthesis of robust controllers of multimass electromechanical systems based on multiswarm stochastic multiagent optimization.

Purpose. Developed the method for solving the problem of multiobjective synthesis of robust control by multimass electromechanical systems based on the construction of the Pareto optimal solutions using multiswarm stochastic multi-agent optimization of particles swarm, which reduces the time of determining the parameters of robust controls multimass electromechanical systems and satisfy a variety of requirements that apply to the work of such systems in different modes. **Methodology.** Multiobjective synthesis of robust control of multimass electromechanical systems is reduced to the solution of solving the problem of multiobjective optimization. To correct the above problem solving multiobjective optimization in addition to the vector optimization criteria and constraints must also be aware of the binary preference relations of local solutions against each other. The basis for such a formal approach is to build areas of Pareto-optimal solutions. This approach can significantly narrow down the range of possible solutions of the problem of optimal initial multiobjective optimization and, consequently, reduce the complexity of the person making the decision on the selection of a single version of the optimal solution. **Results.** The results of the synthesis of multi-criteria electromechanical servo system and a comparison of dynamic characteristics, and it is shown that the use of synthesized robust controllers reduced the error guidance working mechanism and reduced the system sensitivity to changes in the control parameters of the object compared to the existing system with standard controls. **Originality.** For the first time, based on the construction of the Pareto optimal solutions using a multiswarm stochastic multi-agent optimization particle algorithms improved method for solving formulated multiobjective multiextremal nonlinear programming problem with constraints, to which the problem of multiobjective synthesis of robust controls by multimass electromechanical systems that can significantly reduce the time to solve problems and meet a variety of requirements that apply to the multimass electromechanical systems in different modes. **Practical value.** Practical recommendations on reasonable selection of the target vector of robust control by multimass electromechanical systems. Results of synthesis of electromechanical servo system shown that the use of synthesized robust controllers reduced the error guidance of working mechanism and reduce the system sensitivity to changes of plant parameters compared to a system with standard controls. References 9, figures 3.

Key words: multimass electromechanical system, multiobjective synthesis, multiswarm stochastic multiagent optimization, Pareto optimal solution.

В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко, Н.В. Гринченко

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ В ЭКРАНАХ КАБЕЛЕЙ ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ЗАЗЕМЛЕНИИ ТРЕХФАЗНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

В роботі розглянуто задачу розрахунку струмів в екранах одножильних кабелів при двосторонньому заземленні трифазної кабельної лінії. Для випадків прокладання кабелів у площині та трикутником отримано аналітичні вирази для діючих значень струмів в екранах, що дозволяють обмежити похибку розрахунку на рівні 5 %. Проведено аналіз наближених виразів для струмів в екранах кабелів. Представлені графіки залежностей похибки наближених виразів від похідних безрозмірних параметрів кабельної лінії, які визначаються відстанню між осями кабелів, радіусом екранів та їх активним опором. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: кабельна лінія, екран кабелю, струм в екрані, двостороннє заземлення.

В работе рассмотрена задача расчета токов в экранах одножильных кабелей при двустороннем заземлении трехфазной кабельной линии. Для случаев прокладки кабелей в плоскости и треугольником получены аналитические выражения для действующих значений токов в экранах, позволяющие ограничить погрешность расчета на уровне 5 %. Проведен анализ приближенных выражений для токов в экранах кабелей. Представлены графики зависимостей погрешности приближенных выражений от производных безразмерных параметров кабельной линии, которые определяют расстоянием между осями кабелей, радиусом экранов и их активным сопротивлением. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: кабельная линия, экран кабеля, ток в экране, двустороннее заземление.

Введение. При прокладке высоковольтных кабельных линий электропередачи (КЛ) необходимым условием является заземление электропроводящих экранов кабелей, одностороннее или двустороннее. Главное преимущество одностороннего заземления – отсутствие продольных токов в экранах, что не нарушает тепловой режим КЛ и обеспечивает максимальную пропускную способность КЛ. Недостатком является наведенный потенциал на экране и, соответственно, необходимость установки защитных устройств от перенапряжения [1]. При заземлении экранов с обоих концов с транспозицией экранов продольные токи также отсутствуют. Однако сложность и дороговизна выполнения транспозиции ограничивают её повсеместное применение. Более простым является двустороннее заземление экранов кабелей, которое обеспечивает отсутствие импульсных перенапряжений и не требует установки дополнительных защитных устройств [1]. При этом экраны кабелей образуют замкнутые контуры, по которым протекают индуцированные продольные токи [2-4]. С одной стороны это приводит к снижению магнитного поля КЛ и способствует решению задач магнитной экологии, с другой – токи в экранах кабелей могут нарушать тепловой режим КЛ и приводить к уменьшению пропускной способности линии [5, 6]. Поэтому расчет токов в экранах является актуальной задачей.

Анализ литературных источников показал, что для расчета наведенных токов в экранах при их двустороннем заземлении используют различные приближенные выражения. В нормативном документе [7] представлены выражения для расчета токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости и треугольником. Эти приближенные выражения имеют простой вид и используются на практике при проектировании КЛ. В [8] рассматривается задача о тепловых потерях в экранах кабелей, и приводятся выражения для действующих значений токов. Для случая прокладки кабелей треугольником приведенное выражение компактно, но для случая прокладки в плоскости выражения имеют достаточно громоздкий вид. Поэтому для оценки величины токов в экранах при прокладке ка-

белей в плоскости используют компактное выражение для прокладки треугольником, полагая расстояние между кабелями равным среднему геометрическому межфазных расстояний КЛ. В [9] этот подход использовался для анализа индуктивностей трехфазных КЛ при произвольном расположении кабелей.

Приближенные выражения удобны при инженерных расчетах. Однако, как показано ниже, погрешность расчета токов в экранах при помощи приближенных выражений может составлять более 30 %.

Цель статьи – получение выражений для действующих значений токов в экранах кабелей при их двустороннем заземлении, позволяющих ограничить погрешность расчета на уровне 5 % при реальном разбросе параметров КЛ.

Расчет токов в экранах кабелей. В [10] разработана аналитическая модель магнитного поля трехфазной КЛ с двусторонне заземленными экранами одножильных кабелей. Она применима при следующих естественных допущениях: распределение индуцированного тока в экране каждого кабеля равномерно, а толщина экрана много меньше его радиуса. Модель позволяет рассчитывать токи в экранах и распределение магнитной индукции поля, создаваемого КЛ при произвольном расположении её кабелей. Разброс результатов расчета магнитной индукции и экспериментальных данных [3, 4] не превышает 5 %.

В [10] приведены аналитические выражения для комплексных амплитуд токов, индуцируемых в экранах кабелей при их двустороннем заземлении. Вычислив модуль этих выражений, приведя подобные слагаемые и разделив на $\sqrt{2}$, получаем выражения для действующих значений токов в экранах. В качестве переменных удобно использовать следующие безразмерные параметры КЛ:

$$Q = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*}, \quad \Delta = \frac{s}{r},$$

где $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ с}^{-1}$ – частота тока; R^* – сопротивление единицы длины экрана кабеля, Ом/м; s – расстояние

между осями соседних кабелей, м; r – радиус сечения экрана, м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Если кабели проложены в плоскости, а токи в жилах образуют систему прямой последовательности, то выражения для действующих значений токов в экранах при их двустороннем заземлении принимают следующий вид:

$$I_1^{\text{sh}} = I \cdot \sqrt{\frac{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \sqrt{3} \cdot \ln 2\right)^2 + \ln^2 4\Delta^3}{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q}\right)^2 + 4 \cdot \ln^2 2\Delta^3}},$$

$$I_2^{\text{sh}} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \cdot \ln^2 \frac{\Delta^3}{2}}{9 + Q^2 \cdot \ln^2 \frac{\Delta^3}{2}}},$$

$$I_3^{\text{sh}} = I \cdot \sqrt{\frac{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \sqrt{3} \cdot \ln 2\right)^2 + \ln^2 4\Delta^3}{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q}\right)^2 + 4 \cdot \ln^2 2\Delta^3}},$$

где I – действующее значение тока в жилах кабелей.

В случае обратной последовательности токов в жилах в (1) поменяются местами выражения для токов в экранах первого и третьего кабелей.

В случае прокладки кабелей треугольником действующие значения токов в экранах при их двустороннем заземлении равны между собой [8, 10]:

$$I^{\text{sh}} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \ln^2 \Delta}{1 + Q^2 \ln^2 \Delta}}. \quad (2)$$

В [7-9] приведены различные приближенные выражения для расчета действующих значений токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости. Для определения погрешности этих выражений воспользуемся (1). Количественно погрешность определим следующим образом:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^3 \sqrt{\frac{1}{3} \left(1 - \frac{I_k^{\text{approx}}}{I_k^{\text{sh}}}\right)^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где I_k^{sh} – действующее значение тока в экране k -го кабеля, рассчитанное при помощи (1); I_k^{approx} – действующее значение тока в экране, рассчитанное при помощи приближенных выражений из [7-9].

Анализ погрешностей приближенных выражений для токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости. В нормативном документе [7, С. 297] представлено приближенное выражение для расчета токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости. Записывая его через Q , получаем:

$$I_k^{\text{approx}} = I \cdot \sqrt{0,75 \cdot \frac{42,5 \cdot Q^2}{\pi^2 + 42,5 \cdot Q^2} + 0,25 \cdot \frac{25 \cdot Q^2}{\pi^2 + 25 \cdot Q^2}}. \quad (4)$$

Воспользуемся (3) для нахождения погрешности расчета токов при помощи (4). На рис. 1 приведены

графики зависимостей относительного отклонения ε от производных параметров КЛ. Кривые построены для интервалов значений Q и Δ , являющихся характерными для КЛ, рассчитанных на напряжения 45÷330 кВ. Отметим, что значения Q равные 0,15 и 0,35 достигаются при значениях сопротивления R^* равных $0,42 \cdot 10^{-3}$ Ом/м и $0,18 \cdot 10^{-3}$ Ом/м, которые в свою очередь характерны для экранов с поперечными сечениями 45 мм² и 105 мм², соответственно.

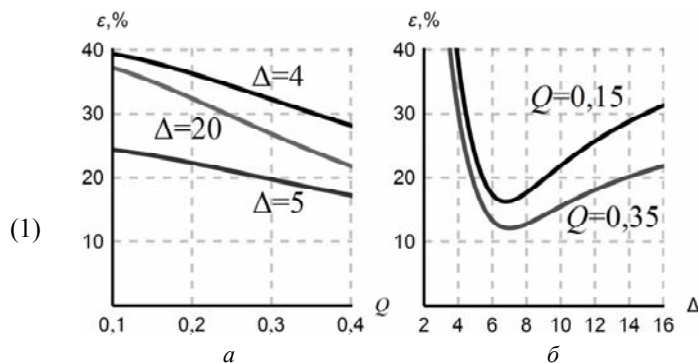


Рис. 1

Из представленных графиков видно, что погрешность ε в целом определяется значением Δ (рис. 1, б), а зависимость ε от Q , т.е. от активного сопротивления экрана, можно не учитывать (рис. 1, а). Из рис. 1, б следует, что погрешность меньше 20 % достигается в достаточно узком интервале при значениях Δ больших 5 и меньших 10-12. Если расстояние между осями соседних кабелей меньше 4 или более 20 радиусов экранов, то погрешность применения (4) для расчета токов в экранах при их двустороннем заземлении может превышать 30 %.

Используя подход, изложенный в [9, С. 180], для расчета токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости можно воспользоваться выражением (2) с заменой Δ на $\bar{\Delta} = \bar{s}/r$, где $\bar{s} = s \cdot \sqrt[3]{2}$ – среднее геометрическое расстояние между осями кабелей. Тогда в терминах Q и Δ выражение для определения действующего значения тока в экране каждого кабеля будет иметь следующий вид:

$$I_k^{\text{approx}} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \cdot \ln^2 \Delta \sqrt[3]{2}}{1 + Q^2 \cdot \ln^2 \Delta \sqrt[3]{2}}}. \quad (5)$$

Погрешность применения этого выражения может быть рассчитана при помощи (3). Результаты расчета представлены на рис. 2.

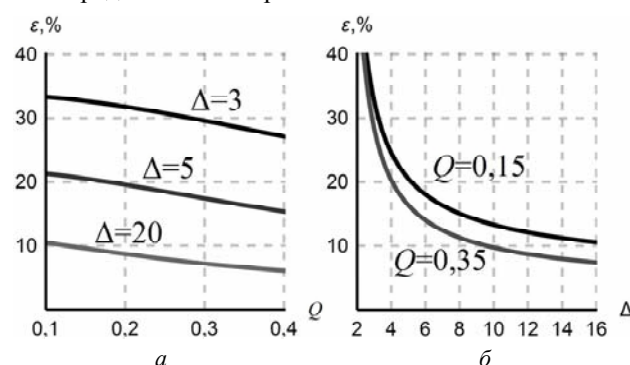


Рис. 2

Как и в предыдущем случае, погрешность слабо зависит от параметра Q (рис. 2,а) и существенно зависит от значения Δ (рис. 2,б). Погрешность 20 % достигается при $\Delta > 5$. При $\Delta < 3$ погрешность применения выражения (5) превышает 30 %.

Выражения для расчета действующих значений токов в двусторонне заземленных экранах при прокладке кабелей в плоскости также приведены в [8, С. 227]. В терминах Q и Δ их можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1^{approx} &= I \cdot \sqrt{0,75 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 2\Delta}{1 + Q^2 \ln^2 2\Delta} + 0,25 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}{1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Q^3 \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}} \cdot \ln 2}{(1 + Q^2 \ln^2 2\Delta) \cdot (1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}})}}, \\ I_2^{approx} &= I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}{1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}}, \\ I_3^{approx} &= I \cdot \sqrt{0,75 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 2\Delta}{1 + Q^2 \ln^2 2\Delta} + 0,25 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}{1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Q^3 \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}} \cdot \ln 2}{(1 + Q^2 \ln^2 2\Delta) \cdot (1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}})}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Исследуем погрешность расчета токов при помощи (6). На рис. 3 представлены зависимости погрешности ε от Q и Δ , рассчитанной согласно (3).

Наибольшая погрешность достигается при $\Delta = 4$, и она не превышает 15 %. В то же время, при $Q > 0,25$ погрешность превышает допустимое при инженерных расчетах значение 10 %.

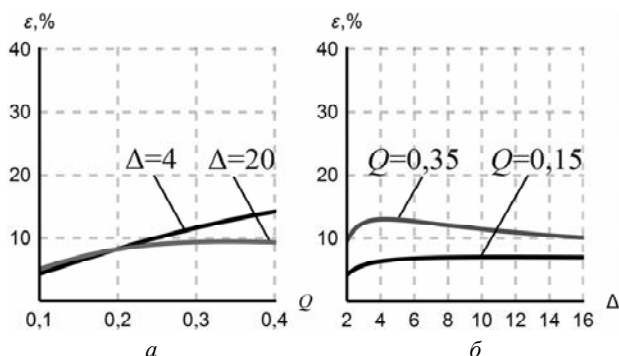


Рис. 3

Анализ погрешности приближенного выражения для токов в экранах при прокладке кабелей треугольником. Отдельно рассмотрим случай прокладки кабелей треугольником. В нормативном документе [7, С. 296] для расчета действующих токов в двусторонне заземленных экранах вместо (2) рекомендуется использовать следующее выражение:

$$I^{approx} = I \cdot \sqrt{\frac{0,0019}{R_{70}^2 + 0,0019}},$$

где R_{70} – сопротивление экрана 1 км кабеля, Ом/км.

Перепишывая его через безразмерный параметр Q , получаем:

$$I^{approx} = I \cdot \sqrt{\frac{4,75 \cdot Q^2}{\pi^2 + 4,75 \cdot Q^2}}. \quad (7)$$

Поскольку действующие значения токов в экранах при прокладке треугольником равны, то погрешность применения приближенного выражения (7) определим следующим образом:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{I^{approx}}{I^{sh}} \right| \cdot 100\%,$$

где I^{sh} рассчитывается согласно (2), а I^{approx} рассчитывается согласно (7).

Графики зависимостей ε от Q и Δ представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4,а, погрешность слабо меняется при варьировании Q , что говорит о несущественном влиянии активного сопротивления. Из зависимости, представленной на рис. 4,б, можно сделать вывод, что погрешность приближенной формулы (7) не превышает 20 % только при $\Delta < 2,4$. В то же время, при $\Delta > 5$ погрешность ε превышает 50 %.

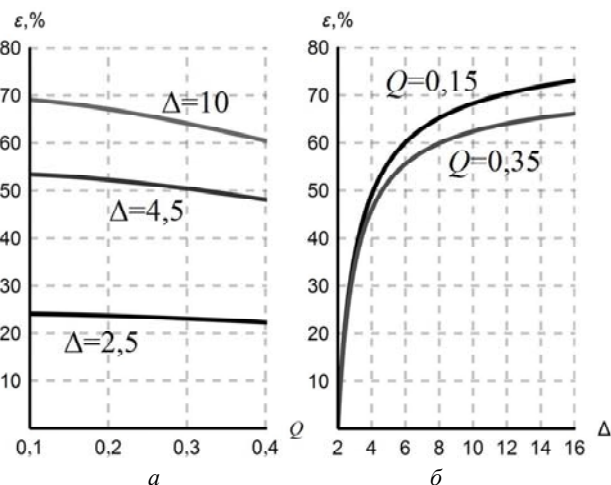


Рис. 4

Таким образом, при расчете действующих значений токов в экранах кабелей при двустороннем заземлении рекомендуется использовать выражения (1) в случае прокладки кабелей в плоскости и выражение (2) в случае прокладки треугольником.

Выводы.

1. Получены аналитические выражения, которые для случаев прокладки кабелей в плоскости и треугольником позволяют с погрешностью 5 % проводить расчет

действующих значений токов в экранах кабелей при их двустороннем заземлении.

2. Установлено, что погрешность расчета действующих значений токов в экранах при помощи приближенных выражений, известных из литературных источников, превышает 30 % в широком диапазоне параметров кабельной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров А.В. Разработка методики выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-500 кВ: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / А.В. Быстров. – Москва, 2014. – 20 с.
2. Гринченко В.С. Підвищення ефективності екранування техногенного магнітного поля високовольтних кабельних ліній // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – №8. – С. 71-76.
3. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Повышение эффективности контурного экранирования магнитного поля высоковольтных кабельных линий // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 5-7.
4. Розов В.Ю., Квицинский А.А., Добродеев П.Н., Гринченко В.С., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С. 56-61. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
5. Антонетс Т.Ю., Веприк Ю.М., Щебенюк Л.А. Дослідження нагрівання силових кабелів із зшитого поліетиленовою ізоляцією на напругу до 110 кВ // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 43-46. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.07.
6. Щебенюк Л.А., Антонетс Т.Ю. Дослідження втрат в ізоляції високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 58-62. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
7. Правила улаштування електроустановок. Вид. 5-те, перероб. й доп. – Х.: Мінерговугілля України, 2014. – 793 с.
8. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справ. кн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.
10. Розов В.Ю., Ткаченко А.О., Ерисов А.В., Гринченко В.С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей // Технічна електродинаміка. – 2017. – №2. – С. 13-18.

REFERENCES

1. Bystrov A.V. *Razrabotka metodiki vybora energoeffektivnoi sistemy zazemleniia ekranov odnozhil'nykh silovykh kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena na napriazhenie 6-500 kV*. Autoref. diss. kand. techn. nauk [The development of selection methodology of energy efficient grounding systems of 6-500 kV XLPE insulated single-core power cable shields. Abstracts cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2014. 20 p. (Rus).
2. Grinchenko V.S. Increase of screening efficiency of technogenic magnetic field of underground high-voltage power cables. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini – Herald of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2014, no.8, pp. 71-76. (Ukr).
3. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Increasing the efficiency of contour shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no.4, pp. 5-7. (Rus).

4. Rozov V.Yu., Kvytsynskyi A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 56-61. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
5. Antonets T.Yu., Veprik Yu.M., Shchebeniuk L.A. Heat tests of power cables with XLPE insulation at direct voltages up to 110 Kv. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 43-46. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.07.
6. Shchebeniuk L.A., Antonets T.Yu. Investigation of losses in insulation of high-voltage power cables with XLPE insulation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.4, pp. 58-62. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
7. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Minenergovugillya of Ukraine Publ., 2014. 793 p. (Ukr).
8. Larina E.T. *Silovye kabeli i vysokovoltnye kabelnye linii* [Power cables and high-voltage cable lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 464 p. (Rus).
9. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).
10. Rozov V.Yu., Tkachenko A.O., Erisov A.V., Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no.2, pp. 13-18. (Rus).

Поступила (received) 18.01.2017

Гринченко Владимир Сергеевич¹, к.т.н.,
Ткаченко Александр Олегович¹, аспирант,
Гринченко Наталья Валерьевна², к.т.н.

¹Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +380 572 992162, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com, oleksandr.tk7@gmail.com
²Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, тел/phone +380 57 7301055

V.S. Grinchenko¹, O.O. Tkachenko¹, N.V. Grinchenko²

¹State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

²Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine.

Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line.

This paper deals with the calculation of currents in shields of single-core cables at double-sided grounding of three-phase cable lines. We consider flat and trefoil cable lines and receive the analytical expressions for RMS currents in the shields of cables. These expressions allow reducing the shield current calculation error to value of 5 %. We analyze the known approximate expressions for RMS currents in the shields of cables and represent dependencies of corresponding calculation errors on cable line dimensionless parameters. These dimensionless parameters are determined by the distance between the axes of the cables, the radius and the resistance of shields. References 10, figures 4.

Key words: cable line, shield of a cable, shield current, double-sided grounding.

This work was supported by the State Fund for Fundamental Research of Ukraine under grant Ф70/18937.

Е.В. Чулеева, В.М. Золотарев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИГИДРАТА ОКСИДА МАГНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ГОРЮЧЕСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА ЭТИЛЕНА С ВИНИЛАЦЕТАТОМ

Мета. Метою статті є визначення впливу дигідрату оксиду магнію на показники горючості полімерних композицій на основі кополімеру етилену з вінілацетатом для розробки складу полімерних композицій, що використовуються під час виготовлення кабелів з підвищеними вимогами з пожежної безпеки. **Методика.** Для проведення досліджень використовували метод диференційної скануючої калориметрії (ДСК) та визначили зміну теплового потоку в залежності від тривалості іспиту кожного з складів за значень температур від 20 °С до 600 °С та різних швидкостях підвищення температури: 50 °С/хв, 75 °С/хв, 100 °С/хв. Використовуючи модель вільної кінетики визначали залежність енергії активації від ступеню перетворення, залежність ступеню перетворення від тривалості випробування, залежність тривалості перетворення від температури для кожної концентрації. З метою порівняння цих показників кожної з композицій будували графіки залежності тривалості перетворення від температури та залежності ступеню перетворення від терміну впливу температури під час згоряння кожної композиції. **Результати.** Отримано кінетичні характеристики, які дозволяють визначити склад, що забезпечує кращі результати зі зниження кінетичних показників горючості полімерних композицій. **Наукова новизна.** Вперше використано ДСК та модель вільної кінетики з метою визначення впливу властивостей компонентів полімерних композицій на показники горючості. **Практичне значення.** Результати досліджень доцільно використовувати для розробки складу полімерних композицій, що використовуються під час виготовлення кабелів. Бібл. 18, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: кополімер етилену з вінілацетатом, дигідрат оксиду магнію, горючість, полімерна композиція, кінетика.

Цель. Целью статьи является определение влияния дигидрата оксида магния на показатели горючести полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом для разработки составов полимерных композиций для кабельной продукции с повышенными требованиями по пожарной безопасности. **Методика.** Мы применили метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и определили зависимость теплового потока от времени испытания для каждого состава при температурах от 20 °С до 600 °С и разной скорости подъема температуры: 50 °С/мин, 75 °С/мин, 100 °С/мин. Используя модель свободной кинетики определили зависимость энергии активации от степени превращения, зависимость степени превращения от времени испытания, зависимость времени превращения от температуры для каждой концентрации. Для сравнения этих показателей для каждой композиции строили графики зависимости времени превращения от температуры и зависимости степени превращения от времени воздействия температуры при сгорании каждой из композиций. **Результаты.** Получены кинетические характеристики, позволяющие определить состав, обеспечивающий лучшие результаты по снижению кинетических показателей горючести полимерных композиций. **Научная новизна.** Впервые мы использовали ДСК и модель свободной кинетики для определения влияния свойств ингредиентов полимерных композиций на показатели горючести. **Практическое применение.** Результаты исследований могут быть использованы при разработке полимерных композиций для кабельной продукции. Библ. 18, табл. 3, рис. 9.

Ключевые слова: сополимер этилена с винилацетатом, дигидрат оксида магния, горючесть, полимерная композиция, кинетика.

Введение. Повышению требований пожарной безопасности к полимерным композициям для изготовления кабельной продукции придается все большее значение из-за возрастающего применения последних в самых различных областях техники и народного хозяйства и ужесточающимися требованиями к пожарной безопасности в строительстве, энергетической отрасли, атомной энергетике, железнодорожном транспорте [1-4].

Одним из способов снижения горючести полимерных материалов на основе полиолефинов является введение в полимерную композицию наполнителей-антипиренов. Применение получили неорганические наполнители-антипирены, в частности гидроксиды магния. Эти материалы не только увеличивают огнестойкость за счет поглощения большого количества тепла, но и нейтрализуют кислые газы, что приводит к снижению дымообразования [5-9].

Нагревание полимерных материалов до температуры, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций окисления, закан-

чивается возникновением тления. Тление – это беспламенное горение твердого материала при сравнительно низких температурах (400-600) °С, часто сопровождающееся выделением дыма.

К кабельной продукции предъявляются требования по показателям горения: экзотермической реакции с окислителем, теплоте сгорания, температуре сгорания, энергии тепловыделения, скорости горения. Данные по этим показателям для полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом и оксида магния отсутствуют [10, 11]. Поэтому эти процессы целесообразно исследовать при разработке и оценке пожарной опасности полимерных материалов для кабельной продукции.

Целью исследований являлось изучение влияния дигидратов магния на показатели горючести полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом.

Экспериментальная часть. При проведении исследований использовали сополимеры этилена

© Е.В. Чулеева, В.М. Золотарев

с винилацетатом (СЭВ), характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики СЭВ

Наименование показателя	СЭВ 1	СЭВ 2
Плотность, кг/м ³	939	951
Показатель текучести расплава, 2,16 кг, г/10 мин	2,5	5
Содержание винилацетата, %	18	28

В качестве наполнителей-антипиренов использовали дигидраты магния, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики наполнителей-антипиренов

Наименование показателя	Mg(OH) ₂	
	Образец № 1	Образец № 2
Массовая доля, %		
Mg(OH) ₂	> 93	> 93,2
SiO ₂	< 0,05	2,2 ± 0,2
Fe ₂ O ₃	< 0,3	0,12 ± 0,02
Na ₂ O	< 0,05	–
CaO	–	2,2 ± 0,2
Медианный диаметр частиц, мкм:		
средний (D ₅₀)	3,0	3,7
максимальный (D ₉₈)	20,0	12,5
минимальный (D ₁₀)	1,0	1,1

Состав полимерных композиций приведен в табл. 3.

Таблица 3

Состав полимерных композиций

Полимерная композиция	Компоненты, %			
	СЭВ 1	СЭВ 2	Mg(OH) ₂	Mg(OH) ₂
			Образец № 1	Образец № 2
1а	60		40	
2а		60	40	
3а	60			40
4а		60		40
1в	50		50	
2в		50	50	
3в	50			50
4в		50		50
1с	40		60	
2с		40	60	
3с	40			60
4с		40		60

Тепловые, температурные и кинетические характеристики определяли по полученным данным на приборе термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей колориметрии TGA/DSC 1/1100 SF компании METTLER TOLEDO при температуре от 20 °С до 650 °С и скорости нагрева (β) 50 °С/мин, 75 °С/мин и 100 °С/мин.

Дифференциальная сканирующая калориметрия базируется на известном принципе Бозрса, или принципе теплового потока, в соответствии с которым осуществляется сравнение тепловых потоков образца и контрольного измерения.

TGA/DSC 1 – это высокочувствительный измерительный прибор термогравиметрического анализа

(TGA). Главный узел TGA/DSC 1 – измерительная ячейка, в состав которой входят печь и весы. Помимо массы образца, которая измеряется с помощью встроенных высокоточных весов, TGA/DSC 1 обеспечивает измерение температуры образца. Вместе со значением опорной температуры, эти значения составляют основу термогравиметрического анализа образца. Кроме того, TGA/DSC 1 позволяет измерять сигнал теплового потока, тем самым обеспечивает применение дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Температуру образца и сигнал теплового потока определяют на основе показаний датчиков температуры, которая измеряется непосредственно с помощью термодпары, установленной в держателе тигля.

Тепловой поток вычисляется по сигналу ДТА (дифференциальный термический анализ), который представляет собой разность между температурой образца и значением температуры, заданным в температурной программе. Данные измерений модуль передает в программное обеспечение, которое определяет величину теплового потока исходя из формул:

$$\varphi = E_{(T)}SDTA,$$

$$SDTA = T_s - T_{set},$$

где φ – тепловой поток, $E_{(T)}$ – калориметрическая чувствительность, T_s – измеренная температура образца, T_{set} – значение температуры, заданное в температурной программе [12].

Кинетические расчеты проводились по модели свободной кинетики [13–18]. Модель свободной кинетики основана на зависимости температуры и степени превращения. Каждое превращение дает расчетное значение энергии активации. Скорость реакции при фиксированной степени превращения зависит только от температуры. Используется температурная функция Аррениуса.

Для расчёта использовали анализ трех динамических температурных кривых для каждой полимерной композиции (рис. 1). Использовали динамические, изотермические и комбинированные температурные программы.

Обработка кинетических экспериментов основана на теоретическом уравнении С. Вязовкина:

$$\frac{d\alpha}{dt} = ke^{-E/RT}f(\alpha),$$

где, $\frac{d\alpha}{dt}$ – скорость реакции, с⁻¹; k – постоянная скорости; E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль×К); T – температура, К; α – степень превращения, %.

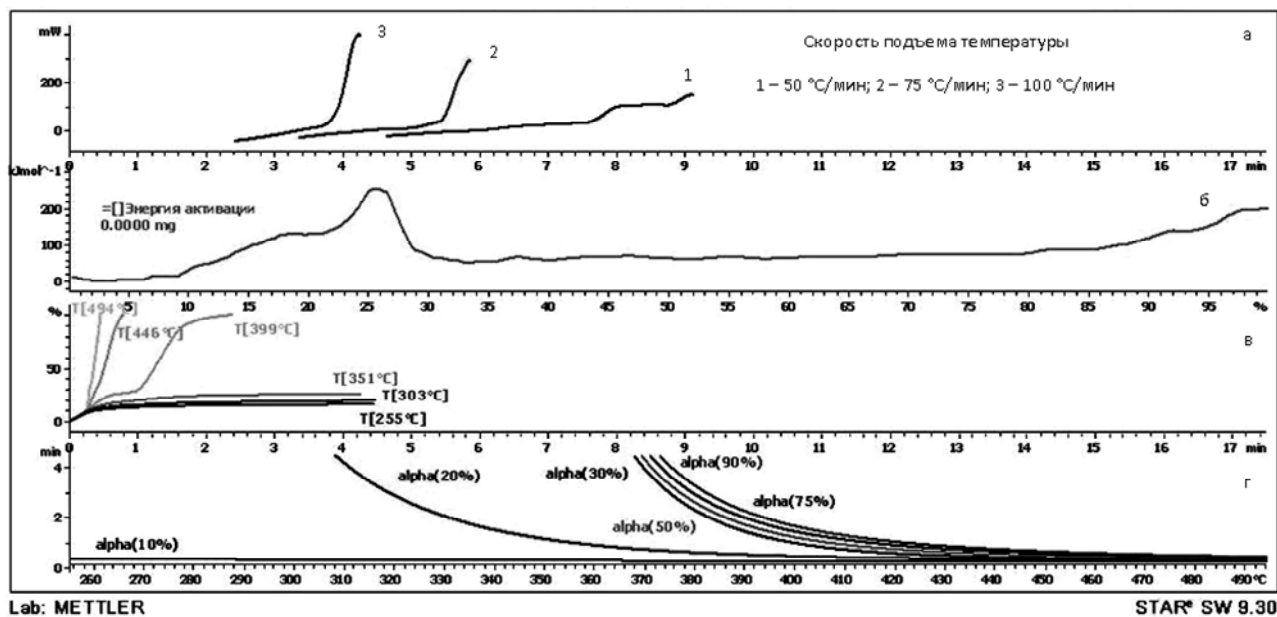
Энергия активации $E(\alpha)$ постоянна для определенной степени превращения (изоконверсионный метод).

Скорость химической реакции зависит от степени превращения (α), температуры (T) и времени (t). Скорость реакции зависит от степени превращения $f(\alpha)$. Для каждого процесса скорость своя и определяется экспериментально.

На основании полученных DSC с использованием вышеуказанных программ получаем графические данные зависимости энергии активации $E(\alpha)$

от степени превращения (в нашем случае степени сгорания); зависимость степени превращения (α) от времени испытания (t) при фиксированной темпера-

туре (T) и зависимость времени превращения (t) от температуры при фиксированной степени превращения (α) (рис. 1).



Lab: METTLER

STAR® SW 9.30

Рис. 1. Тепловые, температурные и кинетические характеристики: а – зависимость теплового потока от времени испытания; б – зависимость энергии активации от степени превращения; в – зависимость степени превращения от времени испытания; г – зависимость времени превращения от температуры

Для определения влияния ингредиентов полимерных композиций на кинетические характеристики строили графики зависимости времени превращения от температуры при постоянной степени превращения ($\alpha = 75\%$). Результаты представлены на рис. 2-5.

Из анализа полученных данных следует, что кинетические характеристики полимерных композиций существенно зависят от свойств, как СЭВ 1 и СЭВ 2, так и наполнителей.

Время превращения снижается при воздействии повышенных температур. При этом в области температур близких к температурам сгорания (430 °C) время превращения выше для полимерной композиции

на основе СЭВ 1 и антипирена (образец №1). С повышением температуры до 520 °C время превращения снижается.

Аналогичная зависимость наблюдается для полимерных композиций на основе СЭВ 2. Однако время превращения имеет большее значение, чем для полимерных композиций на основе СЭВ 1.

Изучали зависимость степени превращения от времени воздействия повышенной температуры близкой к температуре сгорания полимерных композиций.

Для этого строили графические зависимости этих характеристик при температуре 440 °C (рис. 6-9).

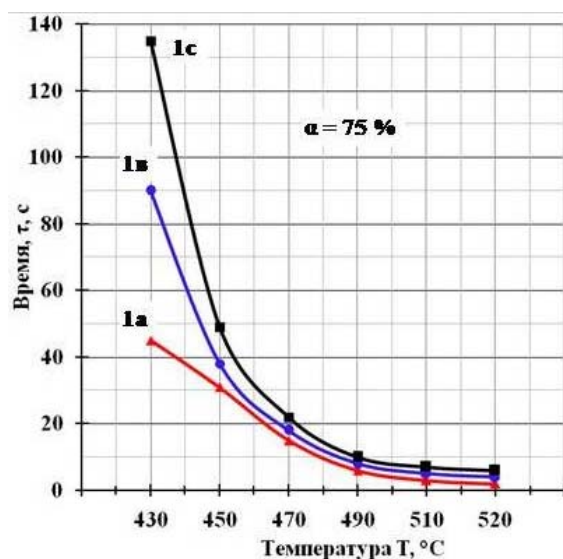


Рис. 2. Зависимость времени превращения от температуры для полимерных композиций 1а, 1в, 1с

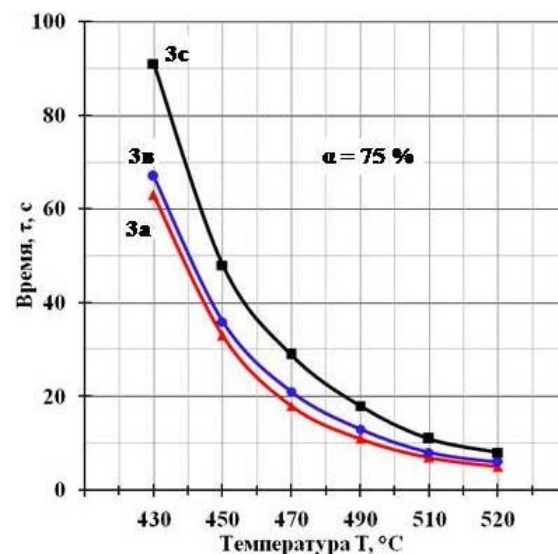


Рис. 3. Зависимость времени превращения от температуры для полимерных композиций 3а, 3в, 3с

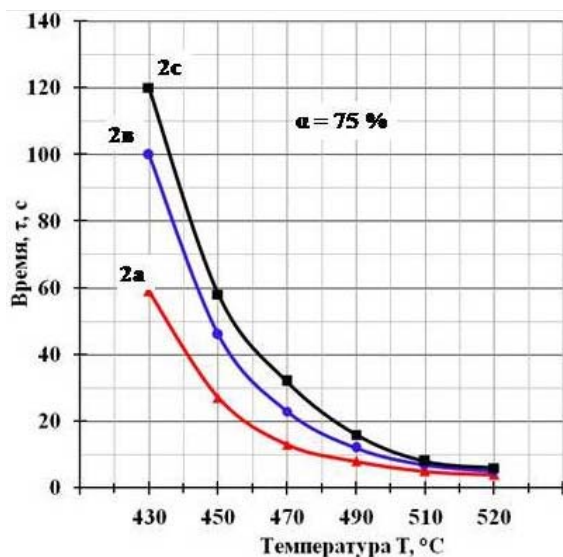


Рис. 4. Зависимость времени превращения от температуры для полимерных композиций 2a, 2b, 2c

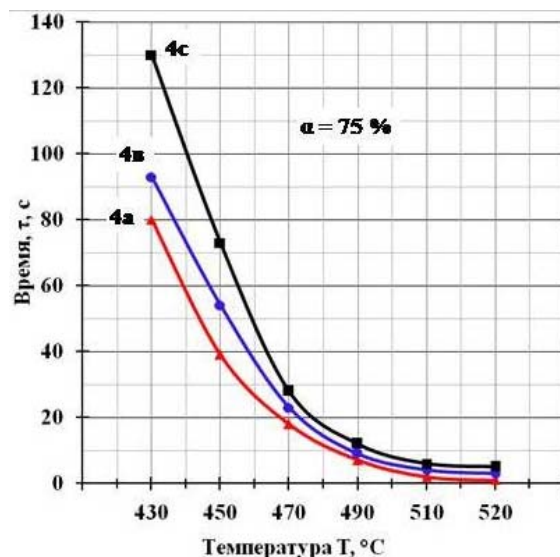


Рис. 5. Зависимость времени превращения от температуры для полимерных композиций 4a, 4b, 4c

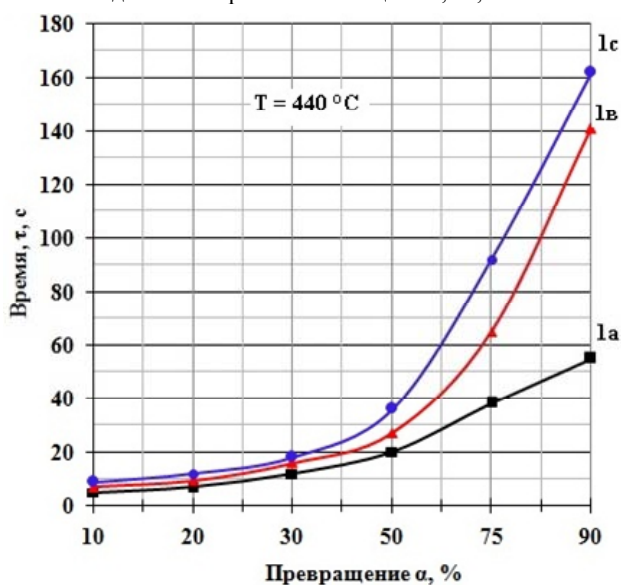


Рис. 6. Зависимость степени превращения от времени воздействия температуры для композиций 1a, 1b, 1c

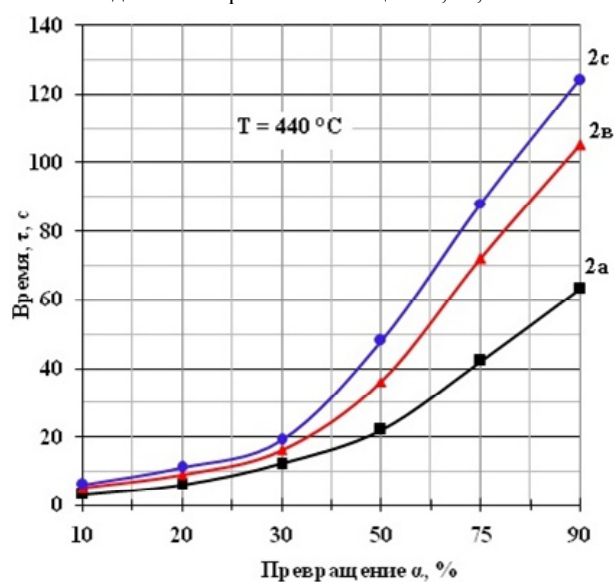


Рис. 7. Зависимость степени превращения от времени воздействия температуры для композиций 2a, 2b, 2c

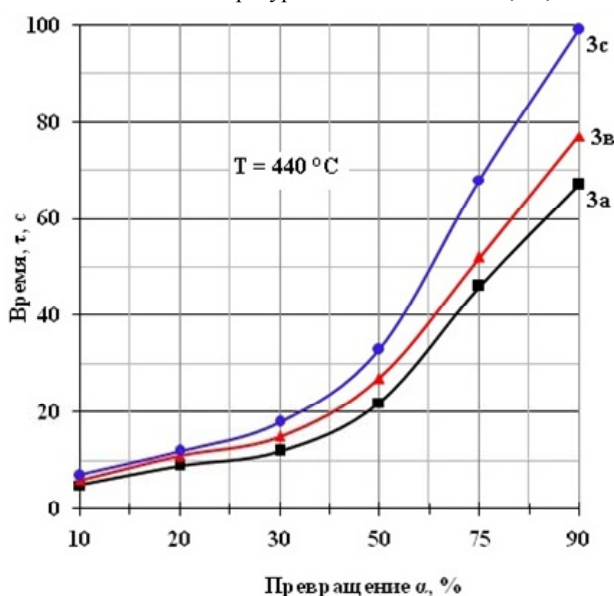


Рис. 8. Зависимость степени превращения от времени воздействия температуры для композиций 3a, 3b, 3c

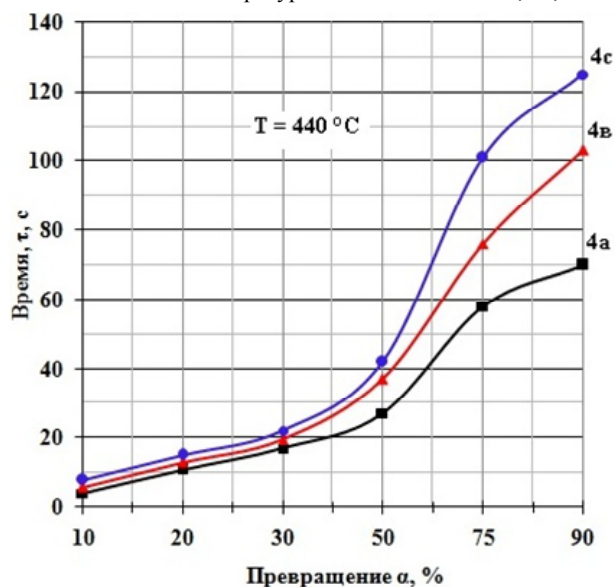


Рис. 9. Зависимость степени превращения от времени воздействия температуры для композиций 4a, 4b, 4c

Из представленных данных следует, что степень превращения α возрастает с увеличением времени воздействия повышенной температуры. При этом время воздействия необходимо значительно увеличивать для полимерных композиций на основе СЭВ 2 и наполнителя (образец № 2).

Выводы.

1. Получены кинетические характеристики, для полимерных композиций на основе СЭВ с использованием в качестве наполнителя антипирена дигидрата оксида магния.

2. Лучшие результаты по снижению показателей горючести обеспечивает композиция на основе СЭВ 2 (с большим содержанием винилацетата и большим показателем текучести расплава) с наполнителем (образец № 2) с меньшим максимальным диаметром частиц и большим содержанием SiO_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДСТУ EN 50363-7:2010 Матеріали для ізоляції, оболонки і зовнішніх покриттів низьконапружних силових кабелів. Частина 7. Безгалогенні термопластичні ізоляційні композиції (EN 50363-7:2005, IDT).
2. ДСТУ EN 50363-5:2010 Матеріали для ізоляції, оболонки і зовнішніх покриттів низьконапружних силових кабелів. Частина 5. Безгалогенні вулканізовані ізоляційні композиції (EN 50363-5:2005, IDT).
3. ДСТУ EN 50363-6:2010 Матеріали для ізоляції, оболонки і зовнішніх покриттів низьконапружних силових кабелів. Частина 6. Безгалогенні вулканізовані композиції оболонки (EN 50363-6:2005, IDT).
4. Пешков И.Б. Материалы кабельного производства. – М.: Машиностроение, 2013. – 456 с.
5. Диего Тирелли Антипирены для композитов // The Chemical Journal. – 2013. – №1-2. – С. 42-45.
6. Обзор минеральных антипиренов-гидроксидов для безгалогенных кабельных композиций // Кабель-news. – 2009. – №8. – С. 41-43.
7. Михайлин Ю.А. Показатели огнестойкости полимерных материалов и методы их определения // Полимерные материалы. – 2011. – №7. – С. 26-31.
8. Herbiet R. Mineral Flame Retardants: Market Outlook and Latest Developments // High Performance Filler. – 2005, pap. 4. – p. 20.
9. Innes J., Innes A. Plastic Flame Retardants: Technology and Current Developments // Rapra Review Reports. – 2004. – vol.14. – no.12. – report 168. – p. 148.
10. EN 13501-6:2014 (E) Fire classification of construction products and building elements – Part 6: Classification using data from reaction to fire tests on electric cables.
11. EN 50399:2011 Common test methods for cables under fire conditions –Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test –Test apparatus, procedures, results.
12. Система термического анализа STAR[®], руководство по эксплуатации TGA/DSC 1. – Швейцария, Mettler Toledo AG, 2007.
13. Tips on model free kinetics // METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom 8. – 1998. – pp. 1-3.
14. Vyazovkin S., Wight C.A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data // Thermochimica Acta. – 1999. – no.340-341. – pp. 53-68. doi: 10.1016/S0040-6031(99)00253-1.
15. Vyazovkin S. What can model free kinetics tell us about reaction mechanisms? // METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom.10. – 1999. – pp. 9-10.
16. Schawe J. Kinetic studies of complex reactions. Part 1: model free kinetics // METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom 18. – 2003. – pp. 13-16.
17. Varankina G.S., Vysotskii A.V. Effective low toxic aluminosilicate fillers for phenol formaldehyde adhesives for plywood and particleboard // Adhesives in woodworking Industry. – 1997. – pp. 114-120.
18. Vyazovkin S. Evaluation of activation energy of thermally stimulated solid-state reactions under arbitrary variation of temperature // Journal of Computational Chemistry. – 1997. – vol.18. – no.3. – pp. 393-402. doi: 10.1002/(SICI)1096-987X(199702)18:3<393::AID-JCC9>3.0.CO;2-P.

REFERENCES

1. DSTU EN 50363-7:2010. Materialy dlya izolyatsiyi, obolonok i zovnishnikh pokryviv nyz'konapruznykh sylovykh kabeliv. Chastyna 7. Bez-halohenni termoplastychni izolyatsiyini kompozytsiyi [State Standard of Ukraine EN 50363-7:2005. Insulating, sheathing and covering materials for low voltage energy cables. Part 7: Halogen-free, thermoplastic insulating compounds]. Kyiv, 2013. p. 4. (Ukr).
2. DSTU EN 50363-5:2010. Materialy dlya izolyatsiyi, obolonok i zovnishnikh pokryviv nyz'konapruznykh sylovykh kabeliv. Chastyna 5. Bez-halohenni vulkanizovani izolyatsiyini kompozytsiyi [State Standard of Ukraine EN 50363-5:2005. Insulating, sheathing and covering materials for low voltage energy cables. Part 5: Halogen-free, cross-linked insulating compounds]. Kyiv, 2013. p. 4. (Ukr).
3. DSTU EN 50363-6:2010. Materialy dlya izolyatsiyi, obolonok i zovnishnikh pokryviv nyz'konapruznykh sylovykh kabeliv. Chastyna 6. Bez-halohenni vulkanizovani kompozytsiyi obolonok [State Standard of Ukraine EN 50363-6:2005. Insulating, sheathing and covering materials for low voltage energy cables. Part 6: Halogen-free, cross-linked sheathing compounds]. Kyiv, 2013. p. 4. (Ukr).
4. Peshkov I.B. Materialy kabel'nogo proizvodstva [Materials of cable production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 456 p. (Rus).
5. Tirelli D. Flame retardants for composites. The Chemical Journal, 2013, no.1-2, pp. 42-45. (Rus).
6. Overview mineral flame retardants, halogen-free cable for hydroxide compositions. Kabel-News, 2009, no.8, pp. 41-43. (Rus).
7. Mikhailin Y.A. Criteria of plastics fire resistance and methods of their testing. Polimernye materialy, 2011, no.7, pp. 26-31. (Rus).
8. Herbiet R. Mineral Flame Retardants: Market Outlook and Latest Developments. High Performance Filler, 2005, pap. 4, p. 20.
9. Innes J., Innes A. Plastic Flame Retardants: Technology and Current Developments. Rapra Review Reports, 2004, vol.14, no.12, report 168, p. 148.
10. EN 13501-6:2014 (E) Fire classification of construction products and building elements – Part 6: Classification using data from reaction to fire tests on electric cables.
11. EN 50399:2011 Common test methods for cables under fire conditions –Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test –Test apparatus, procedures, results.
12. STAR[®] thermal analysis system, operating instructions to the TGA/DSC 1. Switzerland, Mettler Toledo AG, 2007.

13. Tips on model free kinetics. *METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom* 8, 1998, pp. 1-3.
14. Vyazovkin S., Wight C.A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica Acta*, 1999, no.340-341, pp. 53-68. doi: 10.1016/S0040-6031(99)00253-1.
15. Vyazovkin S. What can model free kinetics tell us about reaction mechanisms? *METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom* 10, 1999, pp. 9-10.
16. Schawe J. Kinetic studies of complex reactions. Part 1: model free kinetics. *METTLER TOLEDO Thermal Analysis UserCom* 18, 2003, pp. 13-16.
17. Varankina G.S., Vysotskii A.V. Effective low toxic aluminosilicate fillers for phenol formaldehyde adhesives for plywood and particleboard. *Adhesives in woodworking Industry*, 1997, pp. 114-120.
18. Vyazovkin S. Evaluation of activation energy of thermally stimulated solid-state reactions under arbitrary variation of temperature. *Journal of Computational Chemistry*, 1997, vol.18, no.3, pp. 393-402. doi: 10.1002/(SICI)1096-987X(199702)18:3<393::AID-JCC9>3.0.CO;2-P.

Поступила (received) 10.01.2017

Чулеева Елена Владимировна¹, к.т.н., главный специалист по полимерным материалам,
 Золотарев Владимир Михайлович¹, д.т.н., ген. директор,
¹ ПАО «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ»,
 61099, Харьков, ул. Автогенная, 7,
 тел/phone +380 57 7545312; e-mail: echuleeva@mail.ru

E.V. Chuleyeva¹, V.M. Zolotaryov¹

¹ Private Joint-stock company Yuzhcable works,
 7, Avtogenayaya Str., Kharkiv, 61099, Ukraine.

Study of the influence of magnesium hydroxide on the combustibility performance of polymer compositions based on ethylene vinyl acetate copolymer.

Purpose. To obtain the flame retardants polymer compositions for cables tested the effect of use EVA compositions with magnesium hydroxide, on indicators combustibility polymer.

Methodology. We used the method of differential scanning calorimetry and defined heat flux dependence on the test time for each composition at temperatures from 20 °C to 600 °C rate of temperature rise: 50 °C/min, 75 °C/min, 100 °C/min. Using the model of free kinetics we determined dependence of the activation energy from the conversion, a dependence of the conversion on the time of the test, the dependence of the time of the conversion from the temperature for each concentration. To comparison of these parameters for each composition we plotted the dependence of the time of the conversion from the temperature and the dependence the degree of conversion from the time of temperature exposure during the combustion of each of the compositions. **Results.** We obtained the kinetic characteristics, allowing to determine the composition, which provided the best results to reducing the kinetic parameters of flammability of polymeric compositions. **Originality.** For the first time we used the DSC and model-free kinetics to determine the effect properties of ingredients of the polymer compositions on the combustibility performance. **Practical use.** The research results can be used to develop polymer compositions for cable products. References 18, tables 3, figures 9.

Key words: ethylene vinyl acetate copolymer, magnesium hydroxide, combustibility, polymeric composition, kinetics.

В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ

Розроблена і навчена нечітка нейронна мережа для інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів. Запропоновано визначати функції приналежності лінгвістичних термів з урахуванням функцій щільності розподілу концентрацій газів для трансформаторів з різним станом. Виконано тестування навченої мережі на незалежній вибірці. Проаналізовано можливості нейронних мереж розпізнавати дефекти на ранній стадії їх розвитку, або зростання концентрацій газів в справних трансформаторах, після аварійних впливів з боку електричних мереж. Бібл. 16, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: діагностика трансформаторів, аналіз розчинених у маслі газів, особливості вмісту газів, рівні концентрацій, нечіткі нейронні мережі, функції приналежності, розподіл Вейбулла, навчання мережі, нечіткий висновок, помилкові рішення.

Разработана и обучена нечеткая нейронная сеть для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов. Предложено определять функции принадлежности лингвистических термов с учетом функций плотностей распределения концентраций газов для трансформаторов с различным состоянием. Выполнено тестирование обученной сети на независимой выборке. Проанализированы возможности нейронных сетей распознавать развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития, или рост концентраций газов в исправных трансформаторах, после аварийных воздействий со стороны электрических сетей. Библ. 16, табл. 3, рис. 9.

Ключевые слова: диагностика трансформаторов, анализ растворенных в масле газов, особенности газосодержания, уровни концентраций, нечеткие нейронные сети, функции принадлежности, распределение Вейбулла, обучение сети, нечеткий вывод, ошибочные решения.

Введение. Одним из путей повышения эксплуатационной надежности высоковольтного электроэнергетического оборудования, особенно того, что эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, является усовершенствование существующих методов и средств контроля для получения диагностической информации, разработка математических моделей и алгоритмов оценки технического состояния электрооборудования. Наиболее перспективным, по мнению авторов, направлением такого усовершенствования является разработка компьютерных систем технической диагностики с использованием аппарата нечеткой логики и нейронных сетей, которые способны обеспечить повышение достоверности распознавания и прогнозирования технического состояния и ресурса объекта.

Анализ публикаций. В настоящее время для обнаружения развивающихся дефектов и распознавания их типа как отечественными [1-6], так и зарубежными [7-11] исследователями широко используются математический аппарат нечеткой логики и нейронных сетей. В большинстве из опубликованных работ в качестве решающего правила используются международные, национальные или ведомственные стандарты или методики по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ). При использовании аппарата нечеткой логики вид функции принадлежности, а также их численные характеристики задаются исходя из экспертных оценок или же из действующих стандартов. Как правило, при обучении и тестировании разработанных систем нечеткого вывода или нейронных сетей использовались либо результаты ХАРГ соответствующие исправному либо дефектному состоянию оборудования. Но при этом не учитывались особенности газосодержания масел в исправных трансформаторах, которые обусловлены особенностями конструктивно-

го исполнения, условиями эксплуатации и рядом других факторов. Кроме того, несмотря на достаточно большое количество публикаций по использованию нейронных сетей для интерпретации результатов ХАРГ, ряд вопросов остается неосвещенными. В частности не рассмотрены, вопросы, связанные с возможностью нейронных сетей распознавать развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития, или рост концентраций газов в исправных трансформаторах, после аварийных воздействий со стороны электрических сетей. Последние обстоятельства и послужили поводом для написания данной статьи.

Целью данной работы является разработка, обучение и тестирование нечеткой нейронной сети, для диагностики силовых трансформаторов по результатам ХАРГ, а также анализ возможности данной сети распознавать развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития и рост концентраций газов в исправных трансформаторах, в результате внешних воздействий.

Исходные данные для обучения сети. Для обучения сети использовались результаты ХАРГ по Донецкой, Луганской, Сумской и Харьковской областям, Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам напряжением 110 и 330 кВ, негерметичного исполнения. Анализируемые трансформаторы отличаются и по классу напряжения, и по номинальной мощности, и по конструкции, а самое главное – по условиям эксплуатации, т.е. по значениям загрузки, по частоте и уровню воздействия токов короткого замыкания, по кратности воздействий перенапряжений и т.д. Все это приводит к тому, что значения концентраций газов изменяются в достаточно широком диапазоне значений. Для удобства анализа значений концентраций газов были

использованы уровни концентраций, которые рекомендованы в [12], для диагностики состояния высоковольтного оборудования напряжением до 330 кВ. Значения концентраций газов соответствующие разным уровням приведены в табл. 1. Согласно [12] если значения концентраций газов соответствуют уровню 1, то это свидетельствует о нормальном, бездефектном состоянии оборудования. Если концентрация хотя бы одного из газов соответствует уровню 2, то решение о состоянии оборудования, принимается на основании анализа значений скоростей нарастания суммы газов углеводородного ряда (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сутки). Если значения концентраций хотя бы одного из газов соответствует уровню 3, то прогнозируется наличие дефекта без учета скорости нарастания концентраций газов.

Таблица 1

Уровни состояния маслonaполненного оборудования по значениям концентраций газов

Уровень концентрации	Растворенные в масле газы				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	<0,01	<0,005	<0,005	<0,0015	<0,00005
2	0,01-0,015	0,005-0,012	0,005-0,01	0,0015-0,01	0,00005-0,001
3	>0,015	>0,012	>0,005	>0,0015	>0,001

Выполненный анализ показал, что из 7393 результатов измерения концентраций водорода 5161 (H₂) значение или 69,81 % не превышало предела обнаружения хроматографа. Еще 2106 значений (28,49 %) концентраций, не превышали значения аналитического порога распознавания (0,005 % об.), регламентированного в [12]. Только 71 значение (0,96 %) соответствовало уровню 1 (менее 0,01 % об.). Уровню 2 (0,01-0,015 % об.), соответствовали 26 значений (0,35 %), а уровню 3 (более 0,015 % об.) – 29 значений (0,39 %).

Концентрации метана (CH₄) ниже предела обнаружения хроматографом выявлены в 2304 пробах масла, что составляет 31,6 % всех наблюдений по данному газу, еще 3342 (45,2 %) концентраций метана имели значения ниже аналитического порога распознавания (0,0015 % об.). Уровню 1 (до 0,005 % об.) соответствовали 1160 значений (15,69 %), уровню 2 (0,005-0,012 % об.) – 367 значений (4,96 %), а уровню 3 (более 0,012) – 220 значений (2,98 %).

Концентрации этана (C₂H₆) не превышают предела обнаружения хроматографа в 1957 пробах (26,47 %), еще в 4485 пробах масла (60,67 %), концентрации этана не превышали аналитического порога распознавания (0,0015 % об.). Уровню 1 (до 0,005 % об.) соответствовали 619 значений концентраций (8,37 %), уровню 2 (0,005-0,01 % об.) – 153 значения (4,96 %), а уровню 3 (более 0,01 % об.) – 179 значений (2,42 %).

Из 7393 значений концентраций этилена (C₂H₄), ниже предела обнаружения хроматографом выявлено 1090 значений (14,74 %), 3763 (50,90 %) не превышали аналитического порога распознавания (который составляет 0,0015 % об.). Здесь следует учесть, что для этилена значения аналитического уровня распознавания совпадают со значением верхней границы уровня 1. В связи с этим, в дальнейшем

для этилена все значения соответствующие уровню 1 отнесены к значениям, не превышающим аналитического порога распознавания. В 1914 пробах, значения концентраций этилена (25,89 %) соответствуют уровню 2 (0,0015-0,01 % об.), а 626 значений этилена (8,47 %) соответствуют уровню 3 (более 0,01 % об.).

Концентрации ацетилена (C₂H₂) не превышающие предела обнаружения хроматографом выявлены в 4551 пробе масла, что составляет 61,56 % всех наблюдений по данному газу еще 1602 значения (21,67 %) концентраций ацетилена имели значения ниже аналитического порога распознавания. В связи тем, что для ацетилена уровень распознавания (0,0003 % об.) превышает верхнюю границу уровня 1 (0,00005 % об.) значения ацетилена с концентрациями выше аналитического порога распознавания, но ниже уровня 3 отнесены к уровню 2 (от 0,00005 до 0,001 % об.). Уровню 2 соответствовали 982 значения (13,28 %), а уровню 3 (более 0,001 % об.) – 258 значений (3,49 %).

Таким образом, на основании анализа установлено, что, в исправных трансформаторах негерметичного исполнения возможно превышение концентрациями газов, верхних граничных значений уровня 2, что может быть интерпретировано как наличие дефекта. Наибольшую вероятность превышения граничного значения уровня 2 выявлено у этилена, потом ацетилена, метана, этана и меньше всего у водорода.

В тоже время, наибольшую вероятность реализации концентраций газов ниже аналитического порога распознавания имеет водород, далее ацетилен, этан и метан. Для этилена данная вероятность является самой низкой. Максимальное количество значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания имеет C₂H₄ (2540 значений или 34,36 %). Далее следует CH₄ (1747 значений или 23,63 %), потом C₂H₂ (1240 значений или 16,77 %). Меньше всего значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания выявлено у C₂H₆ (951 значение или 12,86 %) и H₂ (126 значений или 1,70 %).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в исправных трансформаторах, значения концентраций могут соответствовать значениям характерным для дефектного состояния (уровень 3). Как показал анализ, выполненный в работах [13-14] одной из основных причин превышения концентраций газов граничных значений, в бездефектных трансформаторах являются аварийные воздействия со стороны электрических сетей (короткие замыкания, перенапряжения, перегрузки и т.д.).

Для обучения нейронной сети были использованы результаты ХАРГ, для дефектного оборудования, которые получены как в результате сотрудничества авторов с энергетическими компаниями Украины, так и из открытых отечественных и зарубежных литературных источников. Общий объем выборочных значений составил 1103 измерения. Распределение выборочных значений по типам дефектов приведено в табл. 2. Как видно из таблицы в представленной к анализу выборке, разные типы дефекта имеют разный объем выборочных значений, т.е. разную вероятность их появления. Наибольшее число дефектов связано с перегревами в диапазоне температур выше 700 °C

(в таблице обозначен как перегрев высоких температур) и перегревами в области высоких температур, которые сопровождаются электрическими разрядами. Меньше всего наблюдений приходится на электрические разряды низкой энергии и перегревы, переходящие в дуговой разряд. Выполненный анализ показал, что в дефектном оборудовании значения концентраций газов, существенно зависят от стадии развития дефекта, при этом на начальных стадиях значения концентраций могут и не превышать граничных значений, соответствующих уровню 3 [12], но по мере развития дефекта значения концентраций возрастают. Еще одним немаловажным фактором, влияющим на значения концентраций отдельных газов, является тип дефекта. Как правило, максимальные значения концентраций, наблюдаются у газов, характерных для данного типа дефектов. Для сопутствующих газов значения концентраций несколько меньше. В тоже время, значения концентраций газов, не характерных для данного типа дефекта имеют значения соответствующие либо уровням 1 или 2, либо же вообще не превышают предела обнаружения хроматографа.

Таблица 2
Распределение выборочных значений по типам дефектов

№	Тип дефект	Объем выборки
1	Частичные разряды	115
2	Частичные разряды высокой интенсивности	15
3	Искровые и ползучие разряды	81
4	Разряды низкой энергии	17
5	Дуговой разряд (H_2)	67
6	Дуговой разряд (C_2H_2)	43
7	Разряды большой энергии (C_2H_2)	53
8	Перегревы низких температур (CH_4)	48
9	Перегревы низких температур (C_2H_6)	57
10	Перегревы средних температур (CH_4)	68
11	Перегревы средних температур (C_2H_4)	81
12	Перегревы высоких температур (C_2H_4)	260
13	Перегревы низких температур и разряды	35
14	Перегревы переходящие в дугу (CH_4)	16
15	Перегревы переходящие в разряды (C_2H_6)	27
16	Перегревы высоких температур и разряды	120

Примечание: в скобках приведен газ с максимальной концентрацией.

Каждому результату измерений концентраций газов был присвоен код, соответствующий уровням концентраций из таблицы 1. Кодировка диагнозов трансформаторов приведена в табл. 3.

Таблица 3
Кодировка диагнозов трансформаторов

Код	Диагноз
1	Исправное состояние
2	Подозрительное состояние
3	Дефектное состояние

Обучение нечеткой нейронной сети. Далее была разработана нечеткая нейронная сеть топология, которой приведена на рис. 1. У созданной сети 15 входов, по три входа по каждому из газов. Количество циклов обучения созданной нечеткой нейронной сети составило 300 эпох.

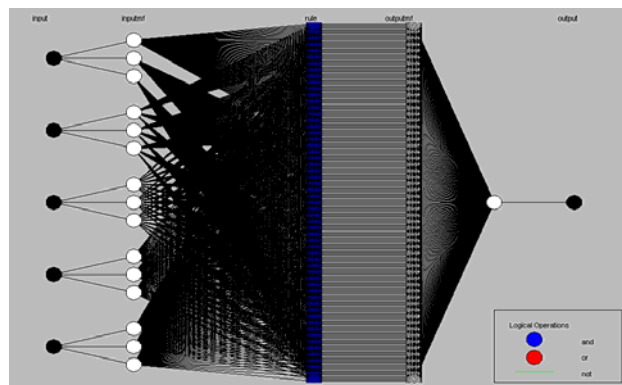


Рис. 1. Топология нечеткой нейронной сети

На рис. 2 показана зависимость ошибки обучения от количества циклов обучения.

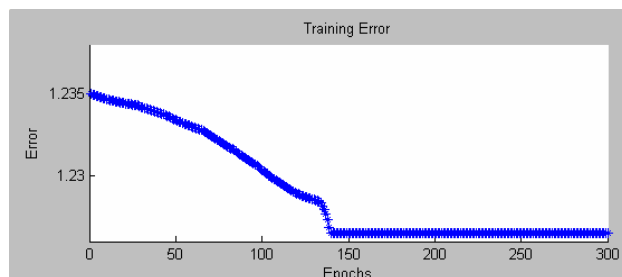


Рис. 2. Зависимость ошибки обучения нечеткой нейронной сети от количества циклов обучения

Как видно из рис. 2 снижение погрешности обучения наблюдается примерно до середины интервала обучения. Дальнейшее увеличение числа циклов обучения не приводит к повышению достоверности распознавания. Для снижения погрешности был использован аппарат нечеткой логики.

Этап фазификации. На данном этапе были выделены входные лингвистические переменные:

ЛП_{вх 1}: <концентрация водорода>

ЛП_{вх 2}: <концентрация метана>

ЛП_{вх 3}: <концентрация этана>

ЛП_{вх 4}: <концентрация этилена>

ЛП_{вх 5}: <концентрация ацетилена>

Далее ЛП_{вх i} делится на несколько лингвистических термов ЛТ_{ij} характеризующих особенности состояния данной переменной:

$$ЛТ_{ij}, j=1 \dots n,$$

где: j – номер терма ЛП_{вх i}, n – количество термов, на которое разбито – ЛП_{вх i}.

Разбиение на термы для каждого из газов проводилось следующим образом:

ЛП_{вх 1} разделена на три ЛТ

ЛТ₁₁: <концентрация в пределах нормы – 1>

ЛТ₁₂: <подозрительная концентрация – 2>

ЛТ₁₃: <дефектная концентрация – 3>

ЛП_{вх 2} разделена на три ЛТ

ЛТ₂₁: <концентрация в пределах нормы – 1>

ЛТ₂₂: <подозрительная концентрация – 2>

ЛТ₂₃: <дефектная концентрация – 3>

ЛП_{вх 3} разделена на три ЛТ

ЛТ₃₁: <концентрация в пределах нормы – 1>

ЛТ₃₂: <подозрительная концентрация – 2>

ЛТ₃₃: <дефектная концентрация – 3>

ЛП_{вх 4} разделена на три ЛТ

ЛТ₄₁: < концентрация в пределах нормы – 1>

ЛТ₄₂: < подозрительная концентрация – 2>

ЛТ₄₃: < дефектная концентрация – 3>

ЛП_{вх 5} разделена на три ЛТ

ЛТ₅₁: < концентрация в пределах нормы – 1>

ЛТ₅₂: < подозрительная концентрация – 2>

ЛТ₅₃: < дефектная концентрация – 3>

Определение функций принадлежности, является достаточно сложной задачей. Для того, чтобы выбранные функции принадлежности и их границы наиболее адекватно описывали результаты хроматографического анализа, использовались функции плотности распределения концентраций газов для исправного и дефектного состояний [15]. В качестве примера на рис. 3, приведены плотности теоретических распределений Вейбулла для концентраций метана, полученных для исправных трансформаторов (D_1), исправных трансформаторов после аварийных воздействий со стороны электрических сетей (D_{12}) и трансформаторов у которых выявлен дефект (D_2).

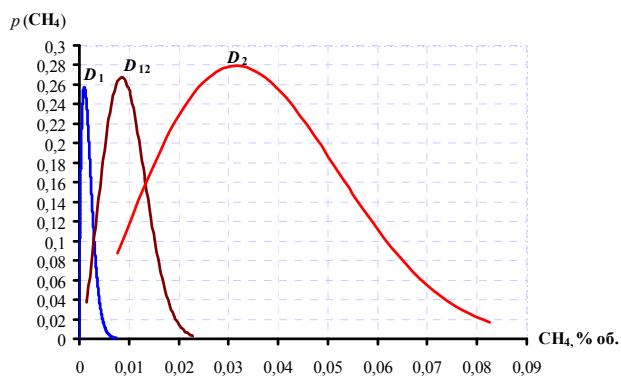


Рис. 3. Плотности теоретических распределений метана для трансформаторов с разным состоянием

В качестве функции принадлежности очень удобно использовать трапецидальную функцию, степень принадлежности которой имеет максимальное значение в середине интервала и снижается по его краям. В качестве границ для ЛТ₁ всех лингвистических переменных были выбраны границы соответствующие функциям плотностей распределения концентраций газов, для трансформаторов с разным состоянием (см. рис. 3). Значения границ для ЛТ₂ и ЛТ₃ всех лингвистических переменных выбирались на основе функций плотностей распределения. На рис. 4 приведены функции принадлежности метана для трех лингвистических термов. Как видно из рис. 4 функции принадлежности выбраны таким образом, чтобы учесть как рекомендации СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006, так и опыт эксплуатации отраженный в виде функций плотности распределения.

Выходные лингвистические переменные имеют вид:

ЛП_{вых 1}: <Значения концентраций в пределах нормы – 1>

ЛП_{вых 2}: <Значения концентраций выше нормы – 2>

ЛП_{вых 3}: <Значения концентраций соответствуют наличию дефекта – 3>

Разбиение на термы проводилось следующим образом:

ЛП_{вых 1} разделена на два ЛТ

ЛТ₁₁: <Соответствует – Y>

ЛТ₁₂: <Не соответствует – N>

ЛП_{вых 2} разделена на два ЛТ

ЛТ₂₁: <Соответствует – Y>

ЛТ₂₂: < Не соответствует – N>

ЛП_{вых 3} разделена на два ЛТ

ЛТ₃₁: <Соответствует – Y>

ЛТ₃₂: < Не соответствует – N>

В качестве функций принадлежности для каждого из термов была выбрана треугольная функция.

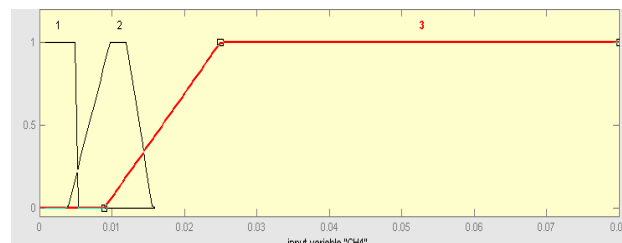


Рис. 4. Функции принадлежности трех лингвистических термов для лингвистической переменной содержание метана в масле

Этап вычисления правила. Система с нечеткой логикой должна иметь базу правил, которая, по сути представляет собой эмпирические знания эксперта о механизме управления. Для вычисления правил используются нечеткие входы, полученные от блока фаззификации, и правила, находящиеся в базе знаний. В левой части правил перебираются возможные ситуации на входе системы, а в правой части указывается, какая ЛП описывает правильную реакцию системы. В качестве решающего правила была реализована методика распознавания регламентированная в [9]. Сокращенно базу правил можно представить в виде:

Правило 1: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 1$];

Правило 2: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

Правило 3: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

Правило 6: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 2$] ТО [$D \in 2$];

Правило 7: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

Правило 17: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 2$] И [$C_2H_2 \in 2$] ТО [$D \in 2$];

Правило 18: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

Правило 27: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 2$] И [$C_2H_2 \in 2$] ТО [$D \in 2$];

Правило 28: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 2$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

...

Правило 48: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$ ИЛИ $H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 1$ ИЛИ $CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 1$ ИЛИ $C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 3$] И [$C_2H_2 \in 3$] ТО [$D \in 3$];

Правило 49: ЕСЛИ $[H_2 \in 3]$ И $[CH_4 \in 3]$ И $[C_2H_6 \in 3]$ И $[C_2H_4 \in 1]$ ИЛИ $C_2H_4 \in 2]$ И $[C_2H_2 \in 1]$ ИЛИ $C_2H_2 \in 2]$ ТО $[D \in 3]$;

...

Правило 63: ЕСЛИ $[H_2 \in 1]$ ИЛИ $H_2 \in 2]$ И $[CH_4 \in 3]$ И $[C_2H_6 \in 3]$ И $[C_2H_4 \in 3]$ И $[C_2H_2 \in 3]$ ТО $[D \in 3]$;

Правило 64: ЕСЛИ $[H_2 \in 3]$ И $[CH_4 \in 3]$ И $[C_2H_6 \in 3]$ И $[C_2H_4 \in 3]$ И $[C_2H_2 \in 3]$ ТО $[D \in 3]$;

Этап дефаззификации. На данном этапе происходит преобразование нечеткой информации, содержащейся в виде достоверности лингвистического термина, в четко определенное значение. Дефаззификация производится по фигуре, полученной путем сложения всех функций принадлежности термов входной переменной. В качестве метода дефаззификации был принят метод правого модального значения, который обеспечивает наибольшую достоверность при определении степени принадлежности выходных переменных.

Тестирование нечеткой нейронной сети. Обученная сеть была протестирована на независимой выборке (значения, которой не использовались при обучении). Для удобства анализа данные были разбиты согласно известным диагнозам на три группы. Результаты тестирования для исправных трансформаторов, значения концентраций которых не превышают значений для уровня 1, из табл. 1, приведены на рис. 5.

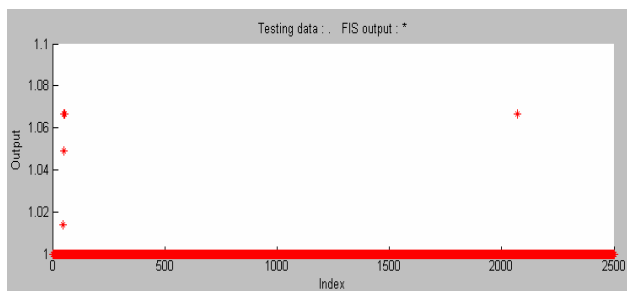


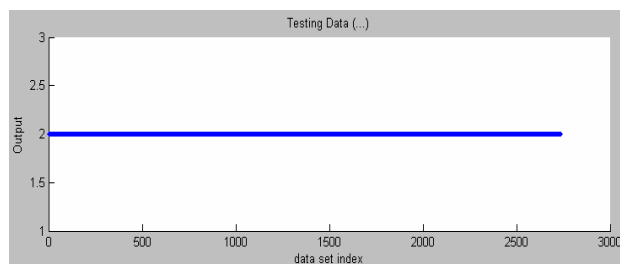
Рис. 5. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ трансформаторов не имеющих дефекта

Как видно из рис. 5, нечеткая нейронная сеть безошибочно отнесла представленные к распознаванию данные к уровню 1. Далее обученной нейронной сети были представлены к распознаванию значения концентраций растворенных газов, которые соответствуют уровню 2. Результаты тестирования приведены на рис. 6.

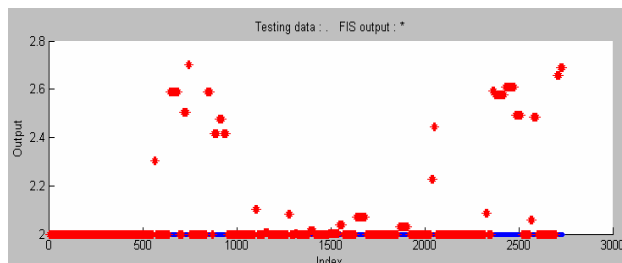
Из рис. 6 видно, что сеть безошибочно, но с разной степенью принадлежности отнесла все представленные на вход результаты ХАРГ к уровню 2. На последнем этапе тестирования на вход нечеткой нейронной сети были поданы результаты ХАРГ, для обнаружения в котором были выявлены дефекты различного типа. Следует отметить, что в подаваемой на вход сети выборки, значение концентрации как минимум одного из газов соответствовало уровню 3.

Результаты тестирования приведены на рис. 7.

Как видно из рисунка нечеткая нейронная сеть, безошибочно распознала и дефектное состояние трансформаторов.

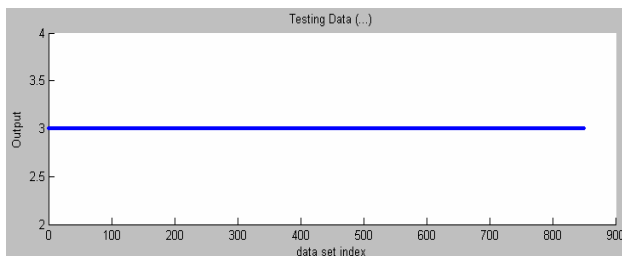


а

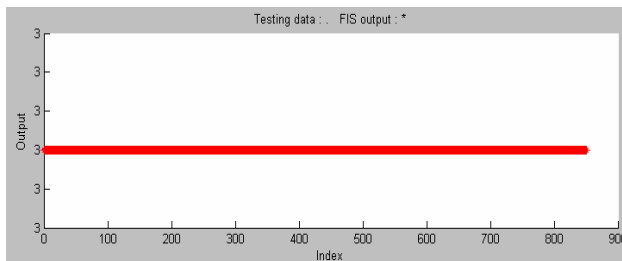


б

Рис. 6. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ трансформаторов, значения концентраций газов которых соответствуют уровню 2 (а – исходные данные; б – результаты тестирования)



а



б

Рис. 7. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ дефектных трансформаторов (а – исходные данные; б – результаты тестирования)

Анализ возможностей нечеткой нейронной сети. Далее на вход нечеткой нейронной сети были поданы результаты ХАРГ исправных трансформаторов, в которых концентрации газов соответствовали уровню 3. Причиной роста концентраций газов служили как аварийные режимы работы электрических сетей (воздействие токов короткого замыкания, перенапряжений, перегрузки трансформаторов [13, 14]), так и нарушения оперативным персоналом в процессе отбора, транспортировки и хранения проб масел, а также при проведении испытаний. Результаты работы сети приведены на рис. 8.

Как видно из рис. 8, из 541 поданного на вход результатов ХАРГ к бездефектному состоянию сеть отнесла только 5. Выполненный анализ показал, что в этих пяти пробах масел уровни 3 соответствовали

значения только одного из пяти газов. Значения концентраций остальных четырех не превышали предела обнаружения хроматографом (условно равнялись нулю). Подобное газосодержание не характерно для дефектного состояния, т.е. в обучающей выборке такие данные отсутствовали, что, наверное, и позволило сети поставить данный диагноз. Еще 27 результатов ХАРГ, были отнесены сетью к подозрительному состоянию, т.е. уровню 2. В данных пробах масел концентрация только одного из пяти газов соответствовала уровню 3. Концентрации остальных четырех не превышали предела обнаружения хроматографом или соответствовали уровню 1. Все остальные результаты ХАРГ предъявленные к распознаванию были отнесены сетью к состоянию 3, т.е. ошибочно признаны дефектными, что является ошибкой первого рода (ложная тревога).

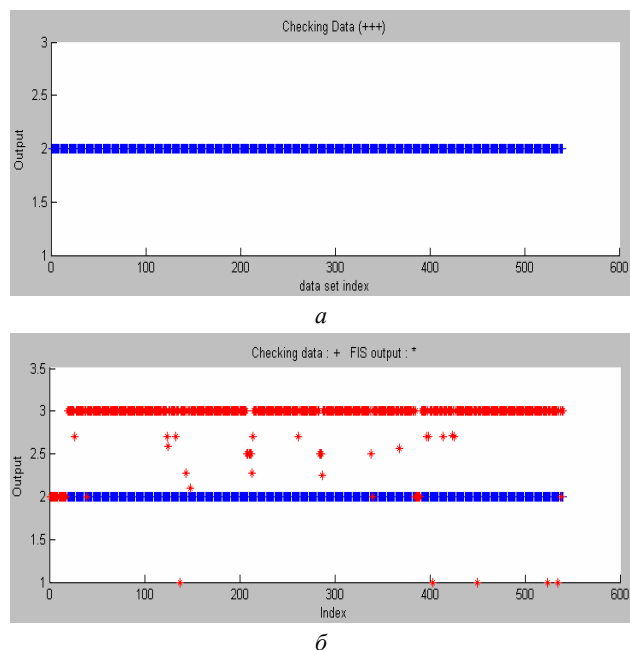


Рис. 8. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ бездефектных трансформаторов, у которых концентрации газов соответствовали уровню 3 (а – исходные данные; б – результаты тестирования)

Не менее интересными являются результаты работы нечеткой сети, при распознавании состояния трансформаторов по результатам ХАРГ дефектного оборудования, которые получены на ранних стадиях развития дефекта, когда концентрации газов не превышают верхней границы уровня 2. Результаты работы электрической сети отражены на рис. 9. Как видно из рис. 9 из 51 результата поданного на вход сети только для 15, сетью был поставлен диагноз дефектное состояние. Для 25 проб масел, с разной степенью принадлежности, сетью был поставлен диагноз подозрительное состояние (уровень 2). Примечательно, что к уровню 2 сетью были отнесены результаты ХАРГ трансформаторов гидростанции «Nelson river», Северная Канада [16], которые были получены за 10 месяцев и пять дней до их повреждения (соответственно 1 и 2 результаты). Следует отметить, что используемая компанией экспертная система не смогла предотвратить повреждение данных трансформато-

ров. Однако, по представленным результатам ХАРГ, нечеткая нейронная сеть однозначно не определила дефектное состояние в этих трансформаторах, а только отнесла полученные результаты к состоянию «подозрительных концентраций». Для 11 результатов ХАРГ нечеткая нейронная сеть поставила диагноз отсутствие дефекта, что является ошибкой второго рода (пропуск цели).

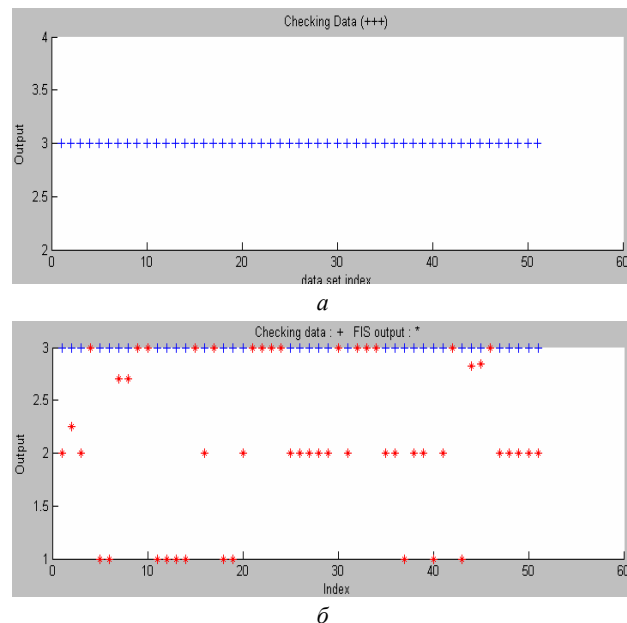


Рис. 9. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ дефектных трансформаторов, у которых концентрации газов не превышали граничных значений уровня 2 (а – исходные данные; б – результаты тестирования)

Анализируя полученные результаты, следует признать, что разработанной и обученной нейронной сети пришлось решать взаимоисключающую задачу. С одной стороны для распознавания дефектов оборудования на ранней стадии их развития функция принадлежности для дефектного состояния должна быть смещена в область более низких значений, с другой стороны для распознавания влияния аварийных режимов работы сети, функция принадлежности для дефектного состояния должна быть смещена в область более высоких значений. Однако, даже в такой ситуации нечеткая нейронная сеть, достаточно успешно справилась с задачей, особенно если учесть, что безошибочное распознавание аварийных воздействий и дефектов на ранней стадии развития, на основе использования только значений концентраций газов принципиально невозможно. В тоже время как показано в [6] использование в качестве критерия развития дефекта, характера изменений концентраций газов во времени, позволяет решить данную задачу практически со 100 % достоверностью. Таким образом, на достоверность диагноза нейронной сети значимое влияние оказывают как диагностические признаки, используемые для постановки диагноза, так и правило принятия решений.

Кроме того, достоверность диагноза, который ставит нейронная сеть, существенно ограничивается особенностями метода ХАРГ. Наглядно это продемонстрировал пример с распознаванием состояния

вызванного аварийным воздействием со стороны электрической сети либо ошибками персонала. Поскольку как развития дефекта, так и воздействие аномально высоких токов, напряжений или температур, вследствие аварийных режимов работы сети, приводят к росту концентраций газов, то на основании анализа только значений концентраций газов, определить причину газовой выделенности не представляется возможным. Поэтому ожидать, безошибочной постановки диагноза со стороны нейронной сети было бы крайне некорректным.

Выводы:

1. Разработана, обучена и протестирована нечеткая нейронная сеть для интерпретации результатов ХАРГ. В отличие от аналогичных исследований, при обучении нейронной сети, функции принадлежности лингвистических термов выбирались с учетом функций плотностей распределения концентраций газов для трансформаторов с различным состоянием, что позволило учесть как особенности газосодержания масел, характерные для негерметичных трансформаторов, так и условия эксплуатации данного оборудования.

2. По результатам проверки сети на независимой выборке установлено, что наибольшую трудность при постановке диагноза по критерию граничных концентраций газов, представляют собой результаты ХАРГ, полученные для исправных трансформаторов в которых концентрации растворенных в масле газов превышают свои граничные значения, а также для дефектных трансформаторов на ранней стадии развития дефектов.

3. Выполненный анализ показал, что достоверность распознавания нечетких нейронных сетей имеет ограничения, которые определяются особенностями метода ХАРГ, используемыми диагностическими признаками и выбранным правилом принятия решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.
2. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №1. – С. 43-51.
3. Костерев М.В., Бардик Є.І., Вожаков Р.В., Болотний М.П. Оцінка технічного стану і прогнозування ресурсу роботоздатності силових трансформаторів на основі теорії нечітких множин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №2. – С. 83-87.
4. Костерев Н.В., Бардик Е.И. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.3. – С. 39-43.
5. Денисова Н.В., Сахапов А.А. Нейронная сеть как инструмент диагностики силовых масляных трансформаторов // Архивариус. – 2016. – №3(7). – С. 33-37.
6. Шутенко О.В. Формирование процедуры нечеткого вывода для обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2008. – №44. – С. 162-177.
7. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dis-

solved gas analysis // 21st Mediterranean Conference on Control and Automation. – Jun. 2013. – pp. 584-589. doi: 10.1109/MED.2013.6608781.

8. Hongzhong Ma, Zheng Li, P. Ju, Jingdong Han, Limin Zhang. Diagnosis of power transformer faults on fuzzy three-ratio method // 2005 International Power Engineering Conference, 2005. doi: 10.1109/ipecc.2005.206897.

9. C.-H. Liu, T.-B. Lin, L. Yao, S.-Y. Wang. Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – Oct. 2015. – vol.10. – no.6. – pp. 689-698. doi: 10.1002/tee.22148.

10. M. A. A. Siddique, S. Mehfuz. Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers // 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), Dec. 2015. doi: 10.1109/indicon.2015.7443174.

11. C. H. Liu, L. T. Yao, T. B. Lin, S. Y. Wang. Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis // Applied Mechanics and Materials. – Jan. 2013. – vol.284-287. – pp. 1082-1086. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.284-287.1082.

12. COV-H EE 46.501:2006: Діагностика маслоснаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ, 2007. – 92 с.

13. Шутенко О.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2008. – Т.1. – №73. – С. 45-48.

14. Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., Мельник Н.Ю. Аналіз причин газовой выделенности в силовых трансформаторах, на основе исследования корреляционных связей между растворенными в масле газами // Світлотехніка та електроенергетика. – 2012. – №3 – С. 72-81.

15. Шутенко О.В., Баклай Д.М. Аналіз законів розподілу концентрацій газів, розчинених в маслі високовольтних трансформаторів негерметичного виконання // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №60(1033). – С. 136-150.

16. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с.

REFERENCES

1. Kosterev M.V., Bardik E.I. *Pytannya pobudovy nechitkykh modeley otsinky tekhnichnoho stanu ob'yektiv elektrychnykh system* [The issue of building fuzzy models evaluate the technical condition of the objects of electrical systems]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2011. 654 p. (Ukr).
2. Lezhnjuk P.D., Rubanenko O.E., Zhuk I.A. Diagnosis of power transformers using fuzzy sets. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2005, no.1, pp. 43-51. (Ukr).
3. Kosterev M.V., Bardik E.I., Vozhakov R.V., Bolotnij M.P. Technical condition evaluation and prediction of the resource operability of power transformers based on the theory of fuzzy sets. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2012, no.2, pp. 83-87. (Ukr).
4. Kosterev N.V., Bardik E.I. Fuzzy modeling of electrical equipment for the evaluation of the technical condition and deciding on further exploitation strategy. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniky»*, 2006, no.3, pp. 39-43. (Rus).
5. Denisova N.V., Sahapov A.A. Neural network as a tool for diagnosis power oil transformers. *Archivarius*, 2016, no.3(7), pp. 33-37. (Rus).
6. Shutenko O.V. Formation of fuzzy inference procedures to detect emerging defects in high-voltage transformers. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2008, no.44, pp 162-177. (Rus).

7. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. *21st Mediterranean Conference on Control and Automation*, Jun. 2013, pp. 584-589. doi: **10.1109/MED.2013.6608781**.
8. Hongzhong Ma, Zheng Li, P. Ju, Jingdong Han, Limin Zhang. Diagnosis of power transformer faults on fuzzy three-ratio method. *2005 International Power Engineering Conference, 2005*. doi: **10.1109/ipecc.2005.206897**.
9. C.-H. Liu, T.-B. Lin, L. Yao, S.-Y. Wang. Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Oct. 2015, vol.10, no.6, pp. 689-698. doi: **10.1002/tee.22148**.
10. M. A. A. Siddique, S. Mehrez. Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers. *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Dec. 2015. doi: **10.1109/indicon.2015.7443174**.
11. C. H. Liu, L. T. Yao, T. B. Lin, S. Y. Wang. Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis. *Applied Mechanics and Materials*, Jan. 2013, vol.284-287, pp. 1082-1086. doi: **10.4028/www.scientific.net/amm.284-287.1082**.
12. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljaciynomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kiiiv, 2007, 92p.(Ukr).
13. Shutenko O.V. Research of influence of operational factors on results of chromatographic analysis of the gases dissolved in oil. *Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2008, vol.1, no.73, pp. 45-48. (Ukr).
14. Shutenko O.V., Baklay D.N., Ostrikova T.A., Melnik N.Y. Analysis of the causes of gassing in the power transformer, based on a study of correlations between dissolved in oil gases. *Lighting Engineering and Power Engineering*, 2012, no.3, pp. 72-81. (Rus).
15. Shutenko O.V., Baklay D.M. Analysis of gases concentration distribution laws, dissolved in oil of high voltage transformers unpressurized of execution. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.60(1033), pp.136-150. (Ukr).
16. Aksenov Yu.P. *Monitoring tekhnicheskogo sostoiannia vysokovol'tnoi izoliatsii elektrooborudovaniia energeticheskogo naznacheniia v ekspluatatsii i pri remontakh* [Technical condition monitoring of high-voltage insulation of electrical energy purposes in the operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhizdat Publ., 2002. 338 p. (Rus).

Поступила (received) 25.01.2017

Бондаренко Владимир Емельянович¹, д.т.н., проф.,
Шутенко Олег Владимирович¹, к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076246,
e-mail: bond@kpi.kharkov.ua, o.v.shutenko@gmail.com

V.E. Bondarenko¹, O.V. Shutenko¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Development of fuzzy neural network for the interpretation of the results of dissolved in oil gases analysis.

Purpose. The purpose of this paper is a diagnosis of power transformers on the basis of the results of the analysis of gases dissolved in oil. **Methodology.** To solve this problem a fuzzy neural network has been developed, tested and trained. **Results.** The analysis of neural network to recognize the possibility of developing defects at an early stage of their development, or growth of gas concentrations in the healthy transformers, made after the emergency actions on the part of electric networks is made. It has been established greatest difficulty in making a diagnosis on the criterion of the boundary gas concentrations, are the results of DGA obtained for the healthy transformers in which the concentration of gases dissolved in oil exceed their limit values, as well as defective transformers at an early stage development defects. The analysis showed that the accuracy of recognition of fuzzy neural networks has its limitations, which are determined by the peculiarities of the DGA method, used diagnostic features and the selected decision rule. **Originality.** Unlike similar studies in the training of the neural network, the membership functions of linguistic terms were chosen taking into account the functions gas concentrations density distribution transformers with various diagnoses, allowing to consider a particular gas content of oils that are typical of a leaky transformer, and the operating conditions of the equipment. **Practical value.** Developed fuzzy neural network allows to perform diagnostics of power transformers on the basis of the result of the analysis of gases dissolved in oil, with a high level of reliability. References 16, tables 3, figures 9.

Key words: diagnostics of transformers, analysis of dissolved gases in oil, peculiarities of gas content, concentration levels, fuzzy neural networks, membership function, Weibull distribution, network training, fuzzy conclusion, wrong decisions.

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

На основі розрахункових експериментів проаналізовано можливі випадки невідповідності заземлювальних пристроїв нормативним вимогам та способи їх реконструкції за вимогами до напруги дотику та опору. Визначено ефективність вказаних напрямків реконструкції як з точки зору електробезпеки, так і матеріально-трудових витрат. Бібл. 3, табл. 8, рис. 6.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, електробезпека, реконструкція, матеріально-трудові витрати.

На основании расчетного эксперимента проанализированы возможные случаи несоответствия заземляющих устройств нормативным требованиям и способы их реконструкции по требованиям к напряжению прикосновения и сопротивлению. Определена эффективность указанных направлений реконструкции как с точки зрения электробезопасности, так и материально-трудовых затрат. Библ. 3, табл. 8, рис. 6.

Ключевые слова: заземляющее устройство, электробезопасность, реконструкция, материально-трудовые затраты.

Вступ. Підстанції, що експлуатуються в Україні, переважною більшістю були спроектовані за вимогами до припустимого значення опору заземлювального пристрою (ЗП). Так як вказані енергетичні об'єкти були побудовані понад 30 років тому, то їх ЗП зазнав суттєвих змін під впливом корозійних процесів, заміни та реконструкції високовольтного обладнання тощо. Тому на даний час потрібно обрати оптимальний варіант модернізації ЗП згідно з одним із його нормованих параметрів (НП). Для приведення діючих ЗП у відповідність до сучасних нормативних вимог [1] використовується електромагнітна діагностика (ЕМД) стану ЗП [2], основною метою якої є визначення величин нормованих параметрів ЗП й розробка рекомендацій з реконструкції та модернізації ЗП.

Реконструкція ЗП електроустановки напругою понад 1 кВ в електричних мережах з глухозаземленою нейтраллю, також як і проектування, може бути виконана двома способами [2]: згідно з вимогами до припустимого значення опору ЗП або до припустимого значення напруги дотику. В існуючих дослідженнях [3] неодноразово відзначалося те, що в ряді випадків виконання ЗП у відповідності до його опору не може гарантувати електробезпеку персоналу й забезпечити припустиму величину напруги дотику. Проте до цього часу оцінка матеріально-трудових витрат з урахуванням значень НП для вибору оптимального напрямку улаштування ЗП не виконувалась.

Метою роботи є визначення оптимального напрямку реконструкції та модернізації заземлювального пристрою електроустановок напругою понад 1 кВ, що працюють в мережі з глухозаземленою нейтраллю.

Матеріали дослідження.

Розглянемо два способи реконструкції діючого заземлювального пристрою: перший – за вимогами до його опору, другий – за вимогами до напруги дотику. Аналіз розробки рекомендацій цими двома способами для реконструкції ЗП виконаємо на прикладі електричних підстанцій класом напруги 110 (150) кВ. При цьому було розглянуто три варіанти:

1) до реконструкції перевищення припустимого значення напруги дотику спостерігалось на 50 % обладнання, після реконструкції як першим, так і другим способами напруга дотику не перевищувала припустимого значення;

2) до реконструкції перевищення припустимого значення напруги дотику спостерігалось на всьому обладнанні, для забезпечення припустимого значення напруги дотику при реконструкції як першим, так і другим способами використано ізолюючий шар в місцях оперативного обслуговування обладнання;

3) до реконструкції напруга дотику та опір ЗП не перевищували припустимих значень, а під час реконструкції першим та другим способом внесено лише необхідні конструктивні рекомендації.

Розглянемо ці варіанти детальніше:

1) Після реконструкції обома способами напруга дотику не перевищує припустимого значення.

Аналіз виконаємо на прикладі діючої підстанції, результати ЕМД стану ЗП якої представлено на рис. 1, 2. При цьому суцільною товстою чорною лінією позначено заземлювачі, що розташовані під землею. Реальну назву об'єкту дослідження змінено на умовну – ПС №1.

Вихідними даними для визначення НП ЗП були: реальна схема ЗП ПС №1, що знаходиться в експлуатації, електрофізичні характеристики (ЕФХ) ґрунту (питомий електричний опір (ПЕО) І шару – 42,65 Ом·м, ІІ шару – 25,37 Ом·м та товщина першого шару – 0,82 м), значення струму однофазного короткого замикання (КЗ) – 1,957 кА. Слід зауважити, що до виконання реконструкції ЗП перевищення припустимого значення напруги дотику (65 В при часі спрацювання резервного захисту більше 1,0 с) спостерігалось на 50 % обладнання, де можливі оперативні перемикання (а саме на: ШР Т-1, ШР Т-2, ОД Т-1, ОД Т-2 та КЗ-1), хоча значення опору ЗП не перевищувало припустимого значення 0,5 Ом.

Згідно з п. 1.7.106 ПУЕ [1] відстань між поперечними горизонтальними заземлювачами (ГЗ) для ЗП, виконаного за вимогами до його опору, рекомендується приймати в бік збільшення від периферії до центру заземлювальної сітки. При цьому перша і наступні відстані, починаючи від периферії, не повинні перевищувати відповідно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0; 20,0 м. Глибина прокладання ГЗ має становити (0,5 – 0,7) м. На рис. 1 представлено ЗП підстанції з введеними рекомендаціями, необхідними для

приведення конструктивного виконання ЗП у відповідність до вимог з його опору R_G (додаткові ГЗ позначено пунктиром).

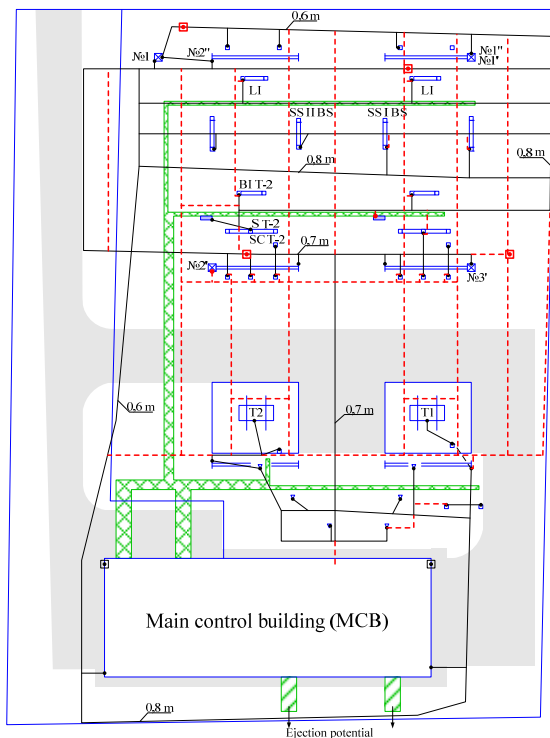


Рис. 1. Схема ЗП ПК №1, приведеного у відповідність до припустимого значення опору

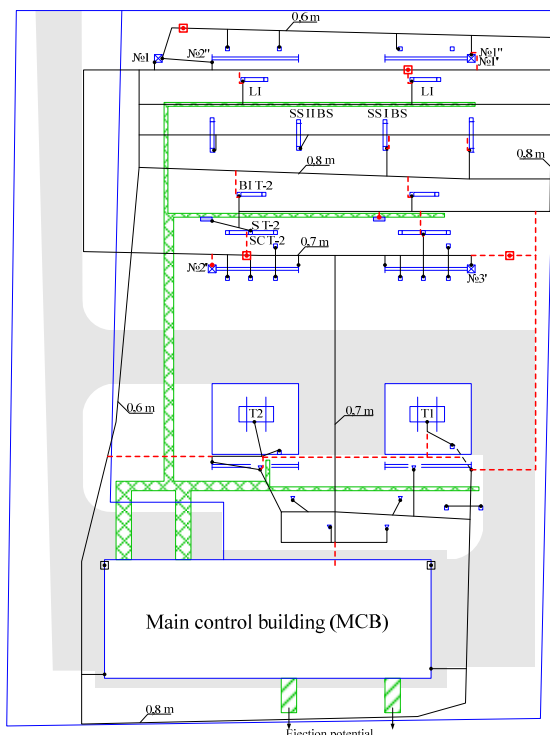


Рис. 2. Схема ЗП ПК №1, приведеного у відповідність до припустимого значення напруги дотику

Згідно з п. 1.7.105 ПУЕ для ЗП, виконаного за вимогами до напруги дотику U_t , необхідно розміщати повздовжні та поперечні ГЗ для виконання захисного вирівнювання потенціалів з урахуванням припустимої

величини напруги дотику та зручності приєднання заземлюваного обладнання, глибина прокладання має бути не меншою ніж 0,3 м. Таким чином, у порівнянні з ЗП, виконаним за вимогами до його опору, вимоги до конструктивного виконання є менш жорсткими.

На рис. 2 представлено ЗП з рекомендаціями, необхідними для приведення його у відповідність вимогам до припустимого значення напруги дотику.

Розрахунок параметрів було виконано за допомогою математичного апарату, розробленого в [4]. Порівняємо значення (див. табл. 1) та розкид напруги дотику для обох варіантів виконання ЗП. Із табл. 1 слідує, що значення напруги дотику при першому способі виконання буде мати дещо менше значення, проте в обох випадках напруга дотику не буде перевищувати припустиме значення в 65 В, а розкид значень напруги дотику буде приблизно однаковим для обох випадків, тобто і в першому, і в другому випадку заземлювальна сітка буде еквіпотенційною.

Таблиця 1

Назва обладнання	Значення U_t , В		Відхилення U_t від середнього значення, %	
	ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_t	ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_t
SS II BS	26,1	38,3	12,8	9,9
SS I BS	23,5	33,8	1,6	-2,9
BI T-2	22,0	32,4	-4,9	-7,0
S T-2	21,1	27,5	-8,8	-21,1
SC T-2	20,6	31,6	-10,9	-9,3
SC T-1	21,2	34,2	-8,3	-1,8
right LI	25,6	39,8	12,4	2,8
left LI	26,6	37,1	-19,6	-13,9

При виконанні реконструкції ЗП першим способом матеріально-трудові витрати (див. табл. 2) будуть значно вищими (більш ніж в п'ять разів).

Таблиця 2

Назва та вид робіт		ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_t
Прокладання додаткових ГЗ у ґрунті 3 групи, м		349	66
Прокладання додаткових ГЗ у ґрунті 5 групи, м		151	33
Виконання проколів під автошляхами або прохід по асфальтно-бетонному масиву	кількість	9	2
	довжина, м	60	10

2) Для забезпечення припустимого значення напруги дотику при реконструкції як за першим, так і за другим способами використано ізолюючий шар в місцях оперативного обслуговування обладнання.

Аналіз виконаємо на прикладі діючої підстанції, результати ЕМД стану ЗП якої представлено на рис. 3, 4. При цьому суцільною товстою чорною лінією позначено заземлювачі, що розташовані під землею. Реальну назву об'єкта дослідження змінено на умовну – ПК №2.

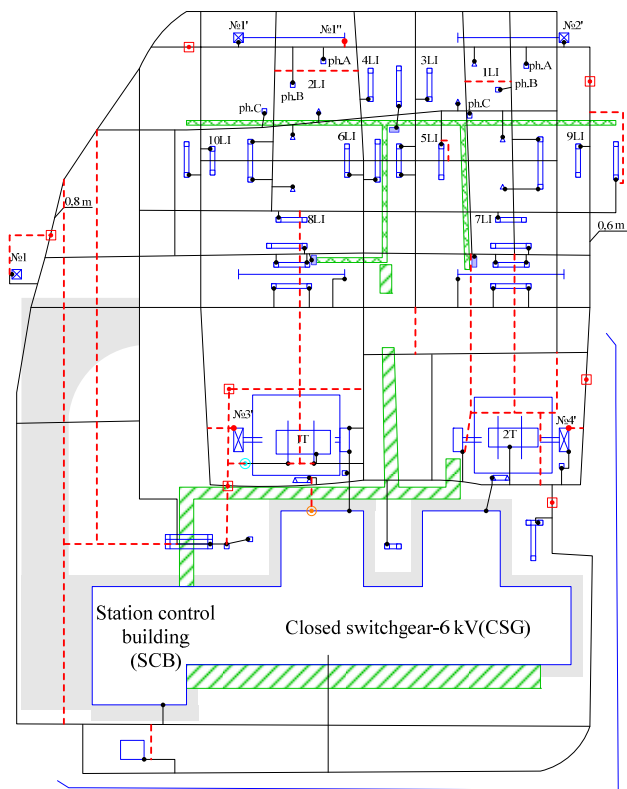


Рис. 3. Схема ЗП ПС №2, приведенного у відповідність до припустимого значення опоры

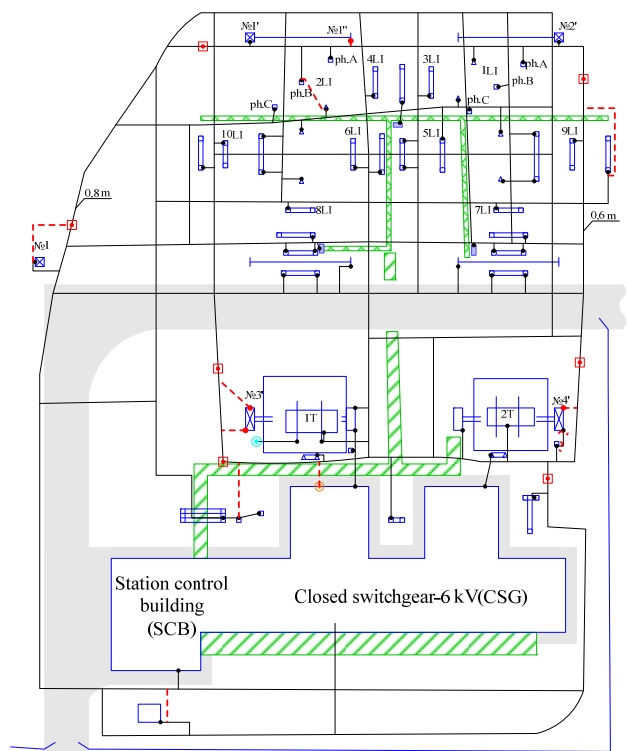


Рис. 4. Схема ЗП ПС №2, приведенного у відповідність до припустимого значення напруги дотику

Вихідними даними для визначення НП ЗП були: реальна схема ЗП ПС №2, що знаходиться в експлуатації, ЕФХ ґрунту (ПЕО I шару – 33 Ом·м, II шару – 4,6 Ом·м та товщина першого шару – 1,97 м), значення струму однофазного КЗ – 10,784 кА. Слід зауважи-

ти, що до виконання реконструкції ЗП перевищення припустимого значення напруги дотику (65 В при часі спрацювання резервного захисту 0,1 с) спостерігалось на всьому обладнанні, де можливе оперативне перемикавання, хоча значення опоры ЗП не перевищувало припустимого 0,5 Ом.

На рис. 3 представлено ЗП підстанції з введеннями рекомендаціями, необхідними для приведення конструктивного виконання ЗП у відповідність до вимог з його опоры ЗП (додаткові ГЗ позначено пунктиром).

На рис. 4 представлено ЗП з рекомендаціями необхідними для приведення його у відповідність вимогам до припустимого значення напруги дотику.

Порівняємо значення та розкид (див. табл. 3) напруги дотику для обох варіантів виконання ЗП.

Із табл. 3 видно, що значення напруги дотику за обома способами реконструкції перевищує припустиме значення 65 В. Тому використання ізолюючого шару необхідне для обох способів реконструкції в місцях обслуговування обладнання, що дозволяє знизити U_d до припустимого.

Таблиця 3

Назва обладнання	Значення U_b , В		Відхилення U_d від середнього значення, %	
	ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_i	ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_i
1LI ph. A	195,5	208,5	16,2	8,4
1LI ph. B	137,4	198,4	-18,3	3,2
1LI ph. C	134,5	155,8	-20,1	-19,0
2LI ph. A	152,7	217,3	-9,3	13,0
2LI ph. B	191,9	185,9	14,0	-3,3
2LI ph. C	196,6	214,0	16,8	11,3
3LI	173,4	189,1	3,0	-1,7
4LI	180,8	200,7	7,4	4,4
5LI	127,5	174,2	-24,2	-9,4
6LI	185,7	203,4	10,4	5,8
7LI	155,7	168,3	-7,5	-12,5
8LI	171,3	198,8	1,8	3,4
9LI	190,2	201,9	13,0	5,0
10LI	162,7	175,8	-3,3	-8,6

Розкид значень напруги дотику буде приблизно однаковим для обох випадків.

Таблиця 4

Назва та вид робіт		ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_i
Прокладання додаткових ГЗ у ґрунті 3 групи, м		199	32
Прокладання додаткових ГЗ у ґрунті 5 групи, м		78	12
Виконання проколів під автошляхами або прохід по асфальтно-бетонному масиву	кількість	8	1
	довжина, м	63	3
Кількість місць укладання плит без арматури з площею 1 м ² , шт		16	16

При цьому при виконанні реконструкції ЗП за першим способом матеріально-трудові витрати на прокладання додаткових ГЗ (див. табл. 4) будуть

значно вищими (більш ніж в шість разів). Для облаштування місць оперативного обслуговування в обох випадках використано плити без металевої арматури з загальним опором 3500 Ом.

3) Напруга дотику не перевищує припустимих значень, а під час реконструкції внесено лише необхідні конструктивні рекомендації.

Аналіз виконаємо на прикладі діючої підстанції, результати ЕМД стану ЗП якої представлено на рис. 5, 6. При цьому суцільною товстою чорною лінією позначено заземлювачі, що розташовані під землею. Реальну назву об'єкта дослідження змінено на умовну – ПС №3.

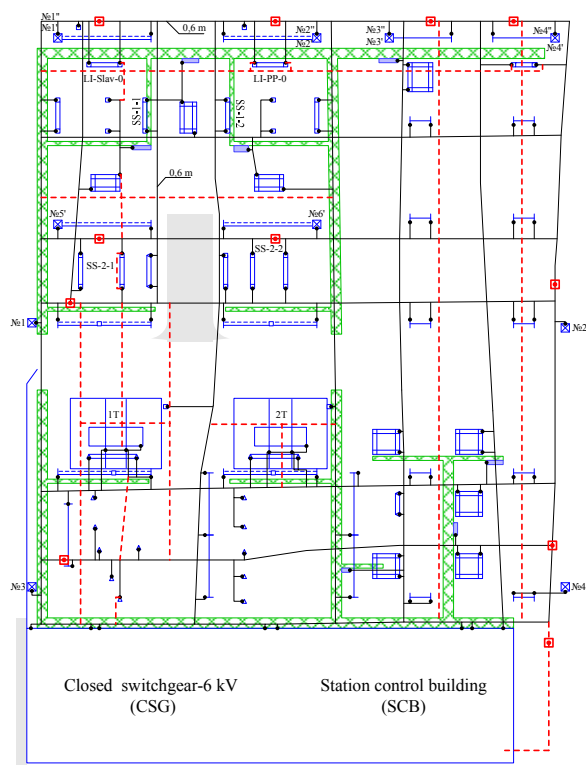


Рис. 5. Схема ЗП ПС №3, приведеного у відповідність до припустимого значення опору

Вихідними даними для визначення НП були: реальна схема ЗП ПС №3 (див. рис. 5), що знаходиться в експлуатації, ЕФХ ґрунту (ПЕО I шару – 12,1 Ом·м, II шару – 15,1 Ом·м та товщина першого шару – 1,15 м), значення струму однофазного КЗ – 3,798 кА. Слід зауважити, що до виконання реконструкції значення напруги дотику не перевищувало припустиме значення (65 В при часі спрацювання резервного захисту більше 1,0 с) на всьому обладнанні. Значення опору ЗП також було меншим за припустиме 0,5 Ом.

На рис. 5 представлено ЗП підстанції з введеними рекомендаціями, необхідними для приведення конструктивного виконання ЗП у відповідність до вимог з його опору ЗП (додаткові ГЗ позначено пунктиром).

На рис. 6 представлено ЗП з рекомендаціями необхідними для приведення його у відповідність вимогам до припустимого значення напруги дотику. Як видно зі схеми, ЗП потребує встановлення лише вертикальних заземлювачів біля блискавковідводів та

під'єднання SCB. Порівняємо значення та розкид U_t (див. табл. 5) для обох варіантів виконання ЗП.

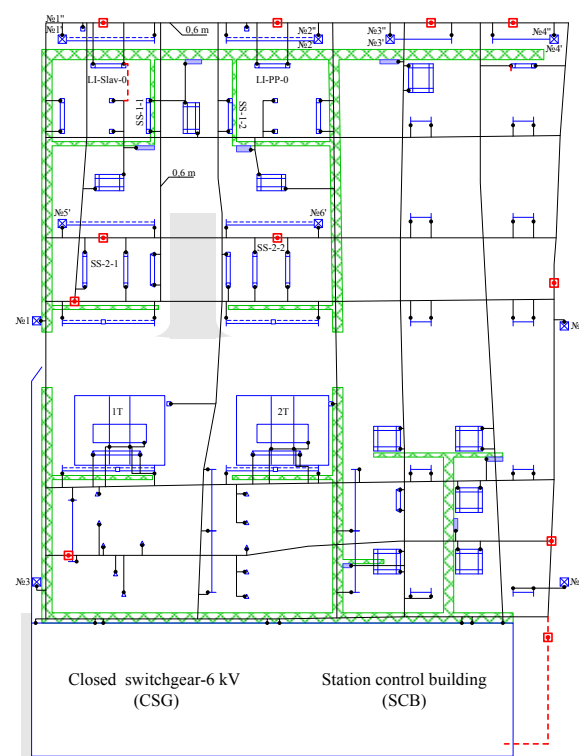


Рис. 6. Схема ЗП ПС №3, приведеного у відповідність до припустимого значення напруги дотику

Таблиця 5

Назва обладнання	Значення U_t , В		Відхилення U_t від середнього значення, %	
	ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_t	ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_t
LI-Slav-0	26,2	35,1	13,7	14,3
SS-1-1	23,9	28,2	3,8	-8,1
LI-PP-0	21,7	37,9	-5,8	23,5
SS-1-2	25,2	28,5	9,4	-7,2
SS-2-1	18,7	30,2	-18,8	-1,6
SS-2-2	22,5	24,3	-2,3	-20,8

Із табл. 5 слідує, що значення напруги дотику як при першому, так і при другому способі виконання не, перевищує припустиме значення 65 В. Також розкид значень U_t буде приблизно однаковим для обох випадків. При цьому при виконанні реконструкції ЗП за першим способом матеріально-трудові витрати на прокладання додаткових ГЗ (див. табл. 6) будуть практично в 8 разів вищими.

Таблиця 6

Назва та вид робіт		ЗП за вимогами до R_G	ЗП за вимогами до U_t
Прокладання додаткових ГЗ у ґрунті 3 групи, м		321	38
Прокладання додаткових ГЗ у ґрунті 5 групи, м		125	16
Виконання проколів під автодорогою або прохід по асфальто-бетонному масиву	кількість	5	-
	довжина, м	28	-

Слід зауважити, що реконструкція ЗП за вимогами до R_G дозволяє зменшити значення опору ЗП лише на 3-6 % у порівнянні з реконструкцією ЗП, за вимогами до напруги дотику (див. табл. 7).

Таблиця 7

Назва підстанції	R_G до реконструкції ЗП, Ом	R_G після реконструкції ЗП, Ом:	
		за вимогами до R_G	за вимогами до U_t
ПС №1	0,309	0,235	0,251
ПС №2	0,088	0,083	0,087
ПС №3	0,133	0,119	0,123

У відповідності до ДСТУ Б Д.1.1-1-2013, проведено аналіз вартості реконструкції ЗП за двома напрямками для розглянутих об'єктів (див. табл. 8) з урахуванням вартості прокладання ГЗ в ґрунті різних груп, та улаштування ізолюючого шару, у разі необхідності, на місцях обслуговування обладнання.

Таблиця 8

Назва підстанції	Вартість реконструкції ЗП, тис. грн:	
	за вимогами до R_G	за вимогами до U_t
ПС №1	42,504	8,915
ПС №2	29,423	4,640
ПС №3	45,781	5,168

Таким чином, доведена економічна ефективність проведення реконструкції та модернізації ЗП діючих енергетичних об'єктів за вимогою до припустимого значення напруги дотику.

Висновки.

1. Виконання ЗП за вимогами до його опору не гарантує електробезпеку обслуговуючого персоналу електроустановки у випадку виникнення аварійної ситуації, тобто значення опору ЗП не дозволяє однозначно судити про придатність ЗП до подальшої експлуатації.

2. Проведення реконструкції діючих ЗП найкраще виконувати згідно з вимогами до напруги дотику, що дозволить забезпечити електробезпеку обслуговуючого персоналу та надійність експлуатації обладнання в усіх режимах роботи електроустановки.

3. Виконання модернізації та реконструкції ЗП за напрямком забезпечення припустимого значення напруги дотику має високу економічну ефективність: середня економія при реконструкції енергетичних об'єктів класів напруги 110 кВ та 150 кВ складає близько 33 тис. грн. на кожен об'єкт.

Авторами за період 2015 – 2016 рр. були розроблені рекомендації для модернізації та реконструкції ЗП згідно з вимогами до напруги дотику для 10 підстанцій класом напруги 150 кВ та 20 підстанцій класом напруги 110 кВ. Тобто впровадження вказаного напрямку реконструкції дозволило навіть для досить незначної кількості підстанцій заощадити понад 1 млн. грн. для енергетичного сектору України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок [Чинне від 20.11.2014]. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с. – (Національний стандарт України).
2. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-

19:2009 – [Чинний від 2010–03–29]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).

3. Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М., Руденко С.С. Статистический анализ соответствия заземляющего устройства электрических станций и подстанций нормируемым параметрам // Энергетика та електрифікація. – 2015. – №6. – С. 3-7.

4. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Математическая модель заземляющего устройства энергообъекта при наличии подстилающего слоя // Электронное моделирование. – 2014. – Т.36. – №2. – С. 89-97.

REFERENCES

1. *Natsional'nyy standart Ukrayiny. Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [National Standard of Ukraine. Electrical Installation Regulations]. Kharkiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2014. 793 p. (Ukr).
2. *Natsional'nyy standart Ukrayiny. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuвання ta kontrol' prystroyiv zazemlennya electroustanovok. Tipova instruktciya*. [National Standard of Ukraine SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
3. Koliushko D.G., Koliushko G.M., Rudenko S.S. Statistical analysis according grounding grid the power stations and substations for of normalized parameters. *Energetic and electrification*, 2015, no.6, pp. 3-7. (Rus).
4. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer. *Electronic modeling*, 2014, vol.36, no.2, pp. 89-97. (Rus).

Поступила (received) 13.02.2017

Руденко Сергій Сергійович¹, м.н.с.,
Коліушко Денис Георгійович¹, к.т.н., с.н.с.,
Кашчєєв Олексій Валерійович¹, к.т.н., с.н.с.,
¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: nio5_molnija@ukr.net

S.S. Rudenko¹, D.G. Koliushko¹, O.V. Kashcheyev¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Determination of direction to reconstruction of grounding system.

Purpose. In paper the most efficient and economical way for bringing the grounding system of power facilities into compliance with requirements of normative parameters was determined. **Methodology.** The determination was based on the comparison of the calculated values of touch voltage and length of additional electrodes for reconstruction of grounding system by two ways. To calculate the software based on the method of point current source which located in the three-layer soil, method guidance potential, Gauss method and the method of ordinary least squares was used. **Results.** For three possible cases amount of material and labor costs for the reconstruction and modernization of the grounding system while maintaining the equipotential grounding system and allowable touch voltage was defined. **Originality.** For the first time the effectiveness the reconstruction of grounding system for requirements of touch voltage, not to her of resistance, both in terms of electrical safety and in terms of material and labor costs proved. **Practical value.** The implementation of results saves a national scale funds for modernization and reconstruction of existing grounding systems of power facilities. References 3, tables 8, figures 6. **Key words:** grounding system, electrical safety, reconstruction, material and labour costs.

В.В. Будашко

РОЗРОБКА ТРИРІВНЕВОЇ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЮ СУДНОВОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ КОМБІНОВАНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ

На підставі системної класифікації топологій суднових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК) були систематизовані основні переваги і недоліки СЕУ КПК в залежності від топології системи розподілення енергії. Були отримані характеристики процесів передачі потужності у СЕУ КПК і системах енергопостачання, і їх стратегій контролю з точки зору підвищення ефективності та усунення зазначених недоліків. Удосконалено математичний апарат для проведення досліджень з точки зору розробки методів проектування і управління гібридними СЕУ КПК зі скороченням споживання палива, викидів у довкілля і підвищенні ремонтпридатності, маневреності і рівня комфорту. Розроблений метод дає можливість ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК, що дозволяє використовувати його як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК. Бібл. 49, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: суднова енергетична установка, комбінований пропульсивний комплекс, система управління енергоспоживанням, стратегія управління.

На основании системной классификации топологий судовых энергетических установок (СЭУ) комбинированных пропульсивных комплексов (КПК) были систематизированы основные преимущества и недостатки СЭУ КПК в зависимости от топологии системы управления распределением энергии. Были получены характеристики процессов передачи мощности в СЭУ КПК и системах энергоснабжения, и их стратегий контроля с точки зрения повышения эффективности и устранения указанных недостатков. Усовершенствован математический аппарат для проведения исследований с точки зрения разработки методов проектирования и управления гибридными СЭУ КПК с сокращением потребления топлива, выбросов в окружающую среду и повышении ремонтпригодности, маневренности и уровня комфорта. Разработанный метод дает возможность итерационной оптимизации параметров СЭУ КПК, что позволяет использовать его как средство интеллектуального проектирования, результатом применения которого является усовершенствованные эксплуатационные характеристики СЭУ КПК. Библ. 49 табл. 1, рис. 12.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, комбинированный пропульсивный комплекс, система управления энергопотреблением, стратегия управления.

Вступ. Мінімізація додаткових витрат зі зміною експлуатаційного режиму суднової енергетичної установки (СЕУ) комбінованого пропульсивного комплексу (КПК) досягається шляхом забезпечення стабільності потужності СЕУ і навантаження середньо-оборотних дизель-генераторів (СОДГ) в умовах збурення довкілля за рахунок оптимального в сенсі мінімуму критерію споживаної потужності при управлінні параметрами СЕУ КПК. З метою підвищення продуктивності СЕУ КПК із різними архітектурними рішеннями структур, застосування тої або іншої інтелектуальної стратегії управління базується до визначенні ефективності настроювання всережимних регуляторів СОДГ і частотних перетворювачів (ЧП), що живлять гребні електродвигуни (ГЕД) підрулюючих пристроїв (ПП) з точки зору дотримання відповідного рівня питомої витрати палива (ПВП) в залежності від навантаження на гребні гвинти і СОДГ (рис. 1).

Не дивлячись на різноманітність структур СЕУ КПК їх можливо групувати за схожими перевагами і недоліками (табл. 1), проаналізувавши яку можна зробити висновок, що основними недоліками сучасних гібридних СЕУ КПК, з точки зору ефективності управління і забезпечення експлуатаційних режимів, є неможливість коригувати оберти СОДГ у відповідності до навантаження на гребні гвинти і необхідність застосування альтернативних джерел енергії (АДЕ).

Постановка задачі. На першому етапі потрібно класифікувати топологію СЕУ КПК за механіч-

ними, електричними або гібридними типами двигунів, і топологією живлення (теплові, електрохімічні і гібридні).

Потім, розглядаючи процеси у СЕУ КПК і системах енергопостачання і їх стратегій контролю, підвищити можливості та усунути недоліки для цих систем і їх відповідного контролю. І врешті необхідно розробити математичний апарат для проведення досліджень з точки зору розробки методів проектування і управління гібридними СЕУ КПК зі скороченням споживання палива, викидів у довкілля і підвищенні ремонтпридатності, маневреності і рівня комфорту.

Дослідження проводяться в рамках науково-дослідної держбюджетної роботи «Концепції, технології та напрямки удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» Національного університету «Одеська морська академія» (державний реєстраційний номер 0114U/000340).

Метою статті є підвищення ефективності гібридних СЕУ КПК методом поєднання критеріїв стратегії управління розподілом енергії.

Методи досліджень. Гібридні СЕУ КПК з АДЕ, які використовують максимальну ефективність прямого механічного приводу і гнучкість поєднання потужності згоряння від теплового двигуна і накопиченої енергії з АДЕ, є найбільш перспективними. На низькій потужності пропульсивного електричного

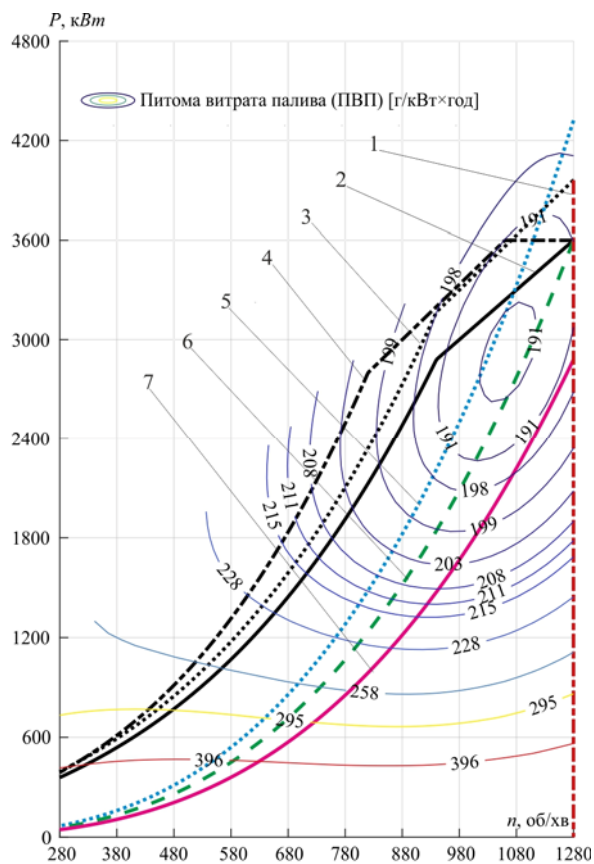


Рис. 1. Залежності питомої витрати палива від навантаження на СОДГ і характеристик гребних гвинтів: 1–4 – характеристики СОДГ; 1 – загороджувальна; 2 – навантажувальна; 3 – навантажувальна з підвищеним рейтингом; 4 – навантажувальна з послідовним турбонаддувом; 5–6 – характеристики гребних гвинтів; 5 – розрахункова; 6 – на вільній воді; 7 – випробувальна

приводу, призначеного для приведення у рух судна, ГЕД забезпечує необхідну потужність, а надлишок потужності теплового двигуна може бути використаний в якості живлення власних потреб від валогенератора. Типова архітектура такої СЕУ КПК показана на рис. 2 [41, 42].

Слід зазначити, що СОДГ, обладнанні системами автоматичного пуску, таких як *PMR (Power Management Relay)* у складі *PMS (Power Management System)*, у період очікувань знаходяться у “гарячому резерві”. Це означає, що як мінімум, здійснюється постійний підігрів двигуна (для єдиних СЕЕС з рідинним охолодженням). Електростанція з автоматичним пуском може прийняти на себе навантаження за декілька секунд з моменту зникнення напруги на головний розподільний щит (ГРЩ), їй не потрібен час на додатковий прогрів двигуна. Крім того, немає необхідності вручну здійснювати перемикання у ГРЩ – всі необхідні комутації виконуються автоматично, а під час роботи СОДГ здійснюється автоматична підтримка частоти вихідної напруги і обертів дизеля. Для особливо складних умов експлуатації, у спеціальних СЕЕС можлива робота СОДГ й у такому режимі, коли двигун працює постійно, але до генератору навантаження не підключене або мінімальне. У такому режимі витрата пального, хоч і не дуже велика, але теж є. Необхідно пам’ятати, що при переключеннях у аварійні режими необхідна гарантована робота акумуляторних батарей. Тому під час нормальної експлуатації СЕЕС необхідно забезпечити й підзарядку акумуляторних батарей, на що теж витрачається пальне. Зрозуміло, що сумарна витрата пального для двох частково завантажених СОДГ істотно вища, ніж у одного СОДГ, працюючого при аналогічному навантаженні.

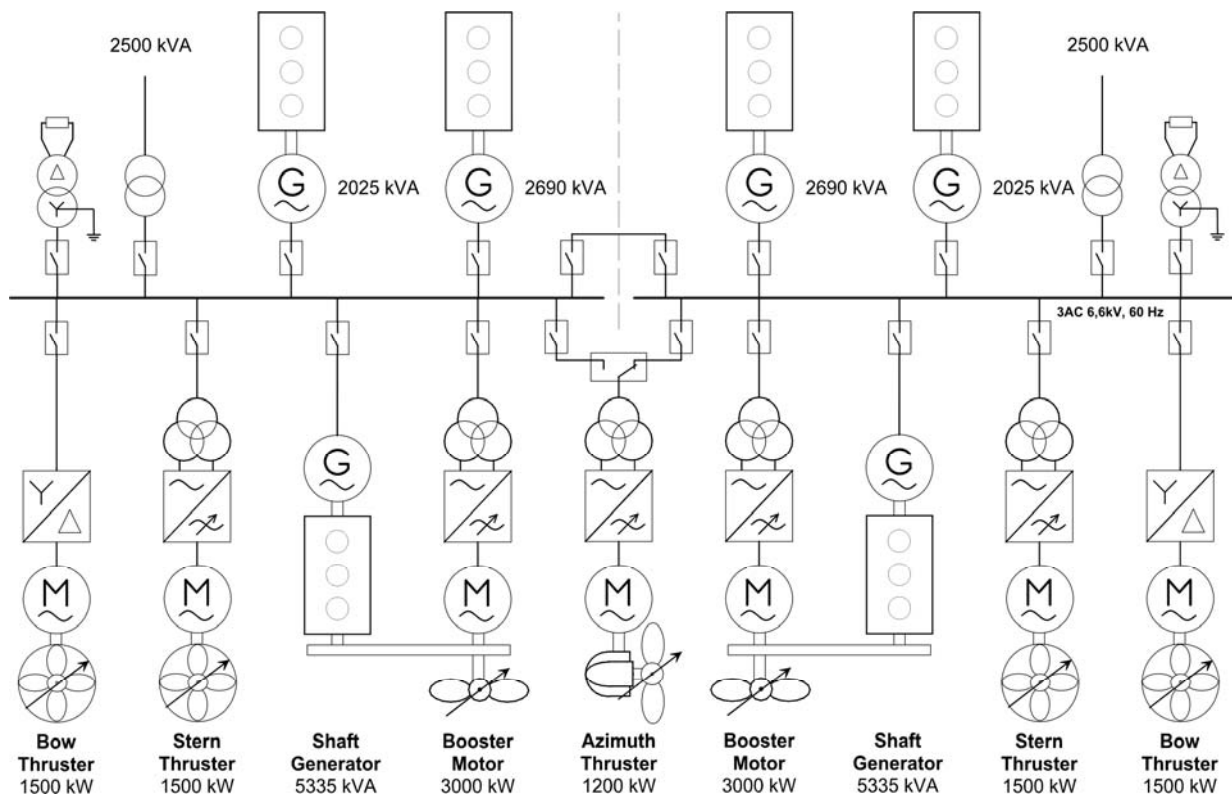


Рис. 2. Однолінійна схема гібридної СЕУ КПК багатопільового судна з допоміжними ПП типу *L-Drive*

Переваги і недоліки двигунів і технологій систем живлення СЕУ КПК

Технологія	Переваги	Недоліки	Джерело
Електромеханічний КПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Низька ефективність при часткових і пікових навантаженнях	Рис. 1 [1, 2]
	Низькі викиди CO_2 та NO_x при розрахунковій потужності	Високі викиди NO_x при зниженні навантаження	[3, 4]
	Низькі втрати перетворення енергії	Низьке резервування	[5]
		Підвищений рівень шуму	[6]
		Перевантаження дизельних двигунів	[7, 8]
Дизель-електричний пропульсивний комплекс (ДЕПК)	Перевантажувальна спроможність	Постійність частоти обертання СОДГ	[9, 10]
	Узгодженість навантаження із СОДГ	Втрати при розрахунковій потужності	[11]
	Висока перспективність		[12]
	Зниження викидів NO_x при низькій швидкості	Ризик постійної нестабільності потужності навантаження	Рис. 2 [13]
	Потенційно низький рівень шуму		
Гібридний ДЕПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Постійність частоти обертання СОДГ	[14]
	Перевантажувальна спроможність		[15, 16]
	Узгодження навантаження і ГЕД на низькій потужності	Складність системи	[17]
	Потенційно низький рівень шуму ГЕД		[18, 19]
Гібридний ДЕПК із альтернативними джерелами енергії (АДЕ)	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність	[20, 21]
	Зниження викидів у повітря	Небезпечність	[22]
	Висока ефективність і низький рівень шуму	Неможливість модернізації	[23]
Гібридна суднова електроенергетична система (СЕЕС)	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність	[24, 25]
	Зниження викидів у повітря і низький рівень шуму	Небезпечність	
ДЕПК з гібридною СЕЕС	Вирівнювання навантаження	Постійність частоти обертання СОДГ	[26, 27]
	Нульовий рівень шуму і шкідливих викидів	Складність системи	[28]
	Зберігання регенованої енергії	Небезпечність обслуговування батарей	[29]
	Ефективність резервного живлення	Вартість батарей	[30]
	Можливість включення імпульсної потужності	Необхідність контролю за станом кожної з батарей	[31]
	Зниження витрати палива і викидів у атмосферу	Можливість виходу з ладу батарей у наслідок перезаряджання	[32, 33]
	Відсутність збільшення NO_x під час збільшення навантаження	Складність моніторингу за станом батарей	Рис. 3 [34, 35]
ДЕПК з гібридною СЕЕС постійного струму із системою накопичення енергії (СНЕ)	Змінна швидкість обертання ГЕД і навантаження	Складність системи	[36]
	Оптимальне навантаження ГЕД	Вартість і втрати у силовій електроніці	[37]
	Зниження рівня шуму і вібрації двигуна	Збільшення NO_x у зв'язку зі змінною потужністю	[38]
	Зниження витрати палива і викидів CO_2	Необхідність впровадження енергозбереження при зменшенні потужності	[39]
	Можливість включення імпульсної потужності	Складність управління	[40]

Зміна технічної складової традиційного підходу до побудови гібридних СЕЕС СЕУ КПК, придатних до застосування для багатьох типів суден, засновано

на принципі видозміни структури СЕЕС для багатьох практичних випадків експлуатаційних режимів, у яких робота основного СОДГ може здійснюватися

при навантаженнях аж до 80 % номінального значення, а динамічний резерв енергії здійснюється від додаткового статичного АДЕ.

Такий підхід відомий, проте його технічна реалізація до сьогодення була практично нездійсненна через відсутність високоефективного статичного джерела енергії, яке помітно перевищує за своїми техніко-експлуатаційними характеристиками класичні акумуляторні батареї та забезпечує високу ступінь пікового навантаження й запасу електроенергії.

Пропонується використання у гібридній СЕЕС СЕУ КПК додаткового АДЕ, котрий складається з двошарових електрохімічних конденсаторів (англ. *Electric double-layer capacitor – EDLC*).

Блок-схема класичної стратегії управління гібридною СЕУ КПК на базі представленої на рис. 2 із використанням *EDLC* за критерієм мінімуму споживання електроенергії показано на рис. 3.

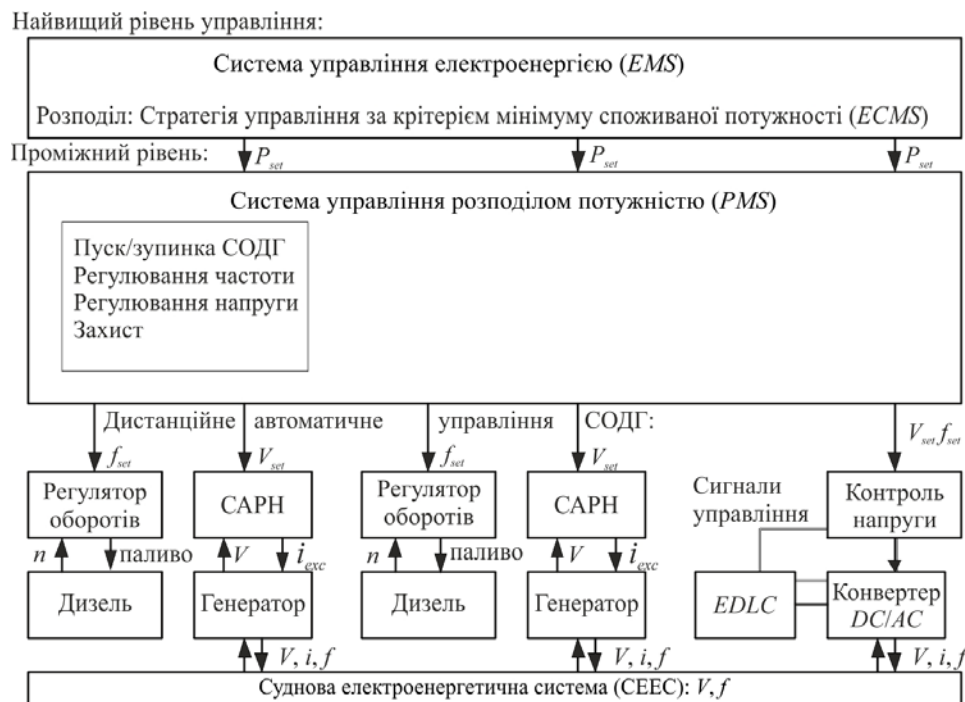


Рис. 3. Блок-схема управління гібридною СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії: САРН – система автоматичного регулювання напруги (англ. *Automatic Voltage Regulator – AVR*); X_{set} – уставка; P – потужність; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження генераторів; I – струм СОДГ

Ядром системи моніторингу та управління єдиною СЕЕС СЕУ КПК із *EDLC* як джерелом динамічного живлення є модуль оцінки напруги *EDLC* і ступеню надлишкового заряду. Тому що залежність між напругою *EDLC* і розрахунковою величиною ступеню заряду є приблизно лінійною, отже, точність детектування рівня напруги на конденсаторі буде безпосередньо визначати точність інформації про стан *EDLC*.

Енергія розряду конденсаторних модулів у СЕУ КПК для характеристик збуджуючих сил, параметризація дій яких визначаються рівняннями (1), (2), за умови знаходження усіх підрулюючих пристроїв (ПП) у координатній площині безпосереднього регулювання моменту задається рівнянням (3) за оцінкою інтеграції загальної площі поверхні усіх модулів *EDLC* під гальванічну криву розряду або заряду:

$$\begin{cases} U_S(t) = I_S(t) \cdot Z_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ F_S(t) = I_S(t) \cdot t_{ME} + Z_{SM} \cdot \bar{v}_S(t), \end{cases} \quad (1)$$

де Z_{SE} – імпеданс перетворювача з електричного боку, [Ом]; Z_{SM} – імпеданс перетворювача з механічного боку, [Ом]; t_{EM} – постійна часу електромеханічного перетворення, [с]; t_{ME} – постійна часу механо-електричного перетворення, [с]

$$\begin{cases} \bar{U}_S(\mathbf{Z}) = \bar{I}_S(t) \cdot \mathbf{Z}_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ \bar{F}_S(\mathbf{Z}) = \bar{I}_S(t) \cdot t_{ME} + \mathbf{Z}_{SM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ (m_{cS} + m_{ncS}) \cdot \frac{d\bar{v}_S(t)}{dt} + \mu_S \bar{v}_S(t) + \mu_R \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \bar{v}_S(t) dt = \bar{F}_S(\mathbf{Z}), \end{cases} \quad (2)$$

де $F_S(\mathbf{Z}) = (F_{S1}(\mathbf{Z}^1), F_{S2}(\mathbf{Z}^2), F_{S3}(\mathbf{Z}^3), F_{S4}(\mathbf{Z}^4), \dots, F_{Si}(\mathbf{Z}^m))^{T_{matrix(i)}}$; комплексний імпеданс визначається матрицями активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $\mathbf{Z}^m = \mathbf{R}^m + p j \mathbf{L}^m$; $T_{matrix(i)}$ – матриця конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації відповідно до табл. 1. і вибраної технології СЕУ КПК [43, 44].

$$E_{int/SOC}(t) = I_{EDLC} \int_{U_{EDLC_min}}^{U_{EDLC_max}} U_S(t) dt \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє розраховувати потужність зарядного пристрою, необхідного для забезпечення необхідного ступеню заряду *EDLC* для певного експлуатаційного режиму СЕУ КПК під час динамічних навантажень. Звідкіля ємність усіх конденсаторних модулів будемо визначати за формулою:

$$C_{int/EDLC} = \frac{2E_{int/SOC}}{(U_{EDLC_max})^2}. \quad (4)$$

Силові конденсатори *EDLC* гібридних ДЕПК формуються у модулі за рахунок визначення необхідної енергії заряду/розряду у потужності розрахованих зарядних пристроїв. Беручи до уваги велику кількість силових пристроїв, високовольтних і потужних ліній електропостачання між модулями і СЕЕС СЕУ КПК, електромагнітне середовище є складним. Програма функціонування моніторингової системи повинна складатися з двох частин: система керування (СК) і інтегрований блок управління моніторингом ємності. Інтегрований блок управління буде нести відповідальність за відстежування та обробку сигналів від модулів *EDLC*, наприклад: загальну напругу ємності, рівень зарядного і розрядного струмів, інформацію про температуру навколишнього середовища тощо. СК відслідковуватиме алгоритми і зберігання даних у модулях *EDLC*, стан системи моніторингу та управління, силових пристроїв і управління схеми інтерфейсу людина-машина.

Для обміну інформацією в різних пристроях управління в якості вузла зв'язку у СЕУ КПК планується використовувати мережу *network*, для того, щоб посилати команди на блок моніторингу від модулів *EDLC* по системній шині, та отримувати завантаження даних. Кожен блок моніторингу у модулях *EDLC* відповідатиме за: отримання сигналу стану одного *EDLC* по напрузі і температурі.

Для вибору кількості і ємності *EDLC* відповідно до типу СЕУ КПК і особливостей експлуатаційного режиму, на початку згідно із складовими комплексного імпедансу визначаємо параметри матриць активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $Z^m = R^m + p_j L^m$ (рис. 4). А для значення величини упору для режиму безпосереднього управління моментом розраховуємо коефіцієнти матриці конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв $T_{matrix(i)}$, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації.

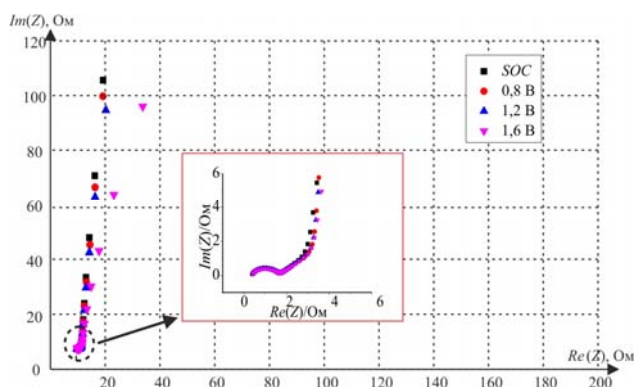


Рис. 4. Параметри комплексного навантаження для визначення ємності *EDLC* для певного експлуатаційного режиму СЕУ КПК: ступеню заряду *EDLC* (англ. *State-of-Charge – SOC*)

Наприклад, для схеми СЕУ КПК (рис. 2) [45, 46] на судні встановлено два головних класичних гвинта лівого та правого бортів у кормовій частині

судна; два кормових тунельних ПП; один азимутальний ПП, що висувається з корпусу судна у носовій частині судна, який може повертатися на будь-який кут α_A (рис. 8) відносно діаметральної площини судна; два носових тунельних ПП ($u_{T1,2}$ – упори головних класичних гвинтів; $u_{T3,4}$ – упори кормових тунельних ПП; u_{T5} – упор допоміжного азимутального ПП, $u_{T6,7}$ – упори носових ПП):

$$T_{matrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \cos \alpha_{A5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \sin \alpha_{A5} & 1 & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & -l_{T3} & -l_{T4} & l_{T5} \sin \alpha_{A5} & l_{T6} & l_{T7} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де l_{Ti} ($i = 1 \dots 7$) – плече сили, або відстань від місця прикладення упору даного ПП до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна.

Потім, у відповідності до типу *EDLC* розраховуємо амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) (рис. 5) і початкові параметри заряду/розряду у заданих межах *SOC* (рис. 6).

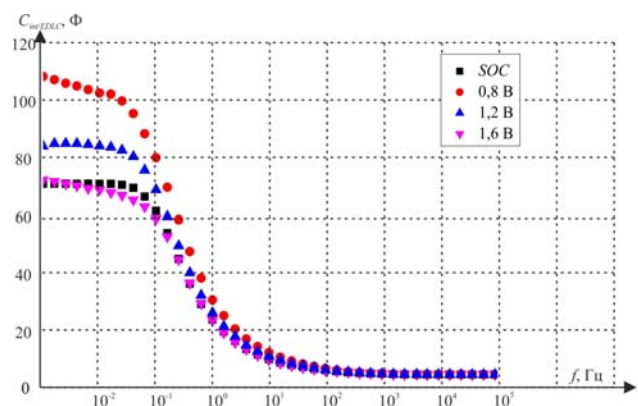


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика обраних *EDLC*

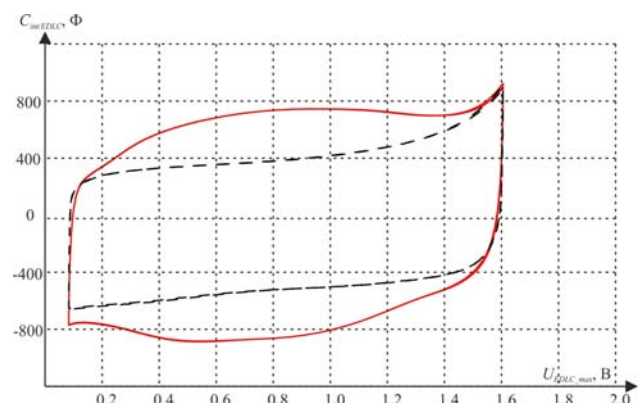


Рис. 6. Параметри заряду/розряду обраних *EDLC* у заданих межах *SOC*

І нарешті, розраховується ефективність запропонованої комплектації СЕУ КПК динамічними джерелами живлення типу *EDLC* для певного експлуатаційного режиму (рис. 7) з урахуванням множини ситуаційних чинників експлуатаційного режиму СЕУ КПК конкретного судна, однолінійну схему якого представлено на (рис. 2). Зазначені чинники враховуються у завданні вирішення локальної задачі ідентифікації експлуатаційного режиму, кожному з яких відповідає свій склад ефективних змінних [47, 48].

Результати досліджень. На підставі розробленого методу було удосконалено стратегію управління

СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії шляхом введення критерію отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ із використанням АДЕ, щоб звести до мінімуму споживання палива.

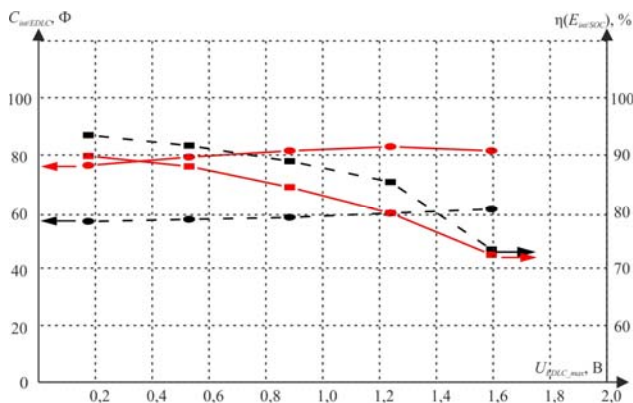


Рис. 7. Порівняльні характеристики ефективності циклів заряду/розряду EDLC запропонованої комплектації СЕУ КПК динамічними джерелами живлення для двох експлуатаційних режимів: повна комплектація – 4 СОДГ (червона суцільна лінія); часткова комплектація – 3 СОДГ (чорна пунктирна лінія)

Дотримання інших критеріїв, таких як шум, вібрація, викиди у довкілля або технічне обслуговування СОДГ (див. табл. 1) в першу чергу залежить від робочої точки СОДГ (рис. 1) і АДЕ (рис. 7) і визначається настроюванням системи керування розподіленням електроенергії (рис. 3).

Таким чином, аналогічні функції витрат в залежності від режиму роботи СОДГ можуть бути отримані за цими критеріями, а також і загальна оптимальна потужність СЕУ КПК може бути визначена з виваженою функцією витрат за кількома критеріями.

Удосконалення стратегії за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ із використанням АДЕ стає перспективним підходом для підвищення ефективності СЕУ КПК в порівнянні з безліччю функцій для майбутніх розробок [49].

У кінцевому рахунку подальші дослідження повинні рухатися шляхом об'єднання стратегій управління з точки зору комплексного підходу. Блок-схема одного із варіантів удосконаленої стратегії управління інтегрованою системою з гібридним ДЕПК і єдиною СЕЕС на рис. 8.



Рис. 8. Блок-схема стратегії управління СЕУ КПК за критерієм максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ: CAPN – система автоматичного регулювання напруги; ГРК – гвинт регульованого кроку; ГФК – гвинт фіксованого кроку; X_{set} – уставка; T – упор (момент); F – сила поштовху гвинта; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження генераторів; i – струм; τ_T – результуюча проекція вектору зусилля на площину руху судна; α_A – кут повороту ПП відносно діаметральної площини судна

На рис. 9 – 12 приведені отримані залежності моделювання процесів передачі потужності у гібридному ДЕПК. Моделювання проводилося *Mat-*

Lab/Simulink. С початку перехідного процесу ($t = 0$ с), навантаження отримує живлення від основних СОДГ. СНЕ гібридного ДЕПК підключається для заряджання

аккумуляторів і відбувається підготовка до можливого знеструмлення судна.

На 40-йй секундї судно знеструмлюється і система управління електроенергією перемикає живлення з СОДГ на АДЕ. При цьому надлишковий запит потужності забезпечується від ланки постійного струму, де здійснювалася рекуперація енергії від споживачів, що працювали у генераторному режимі, тому що потужність *EDLC* зростає повільно.

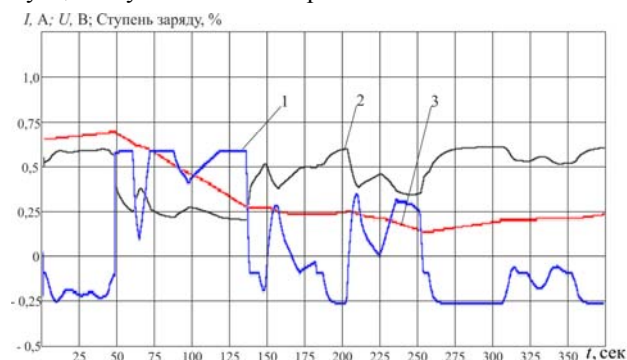


Рис. 9. Енергетичні характеристики СНЕ: 1 – максимальному струму відповідає значення 400 А; 2 – максимальній напрузі відповідає значення 48 В; 3 – максимальному ступеню заряду відповідає значення 100 %

При $t = 45$ с, напруга на ланці постійного струму досягла нижчого рівня (280 В) і СНЕ підключається до її шини і підживлює до 450 В, напруга на якій на 47 секундї зростає до необхідного рівня і СНЕ обмежує потужність поступово до нульового значення. *EDLC* забезпечують необхідну потужність власних потреб і продовжує підживлювати шину ланки постійного струму, до якої на 55 секундї підключаються споживачі, що працюють у аварійному режимі. На 62 секундї вмикається СНЕ, яка підтримує напругу на шині постійного струму до 450 В і допомагати *EDLC* забезпечувати недостачу додаткової потужності навантаження.

На 80 секундї потужність *EDLC* досягає максимального значення, що обмежується уставкою 10 кВт максимальною потужністю конвертера напруги *DC/AC*. Тому необхідна потужність навантаження власних потреб забезпечується СНЕ, максимальна потужність якої досягається при $t = 120$ с (20 кВт) і навантаження забезпечується живленням через шину ланки постійного струму.

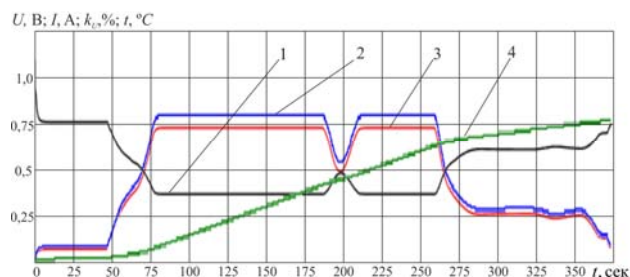


Рис. 10. Енергетичні характеристики *EDLC*: 1 – максимальній напрузі відповідає значення 180 В; 2 – максимальному струму відповідає значення 270 А; 3 – максимальному значенню відношення напруги на *EDLC* до напруги холостого ходу відповідає значення 1; 4 – максимальній температурі *EDLC* відповідає значення 50 °C

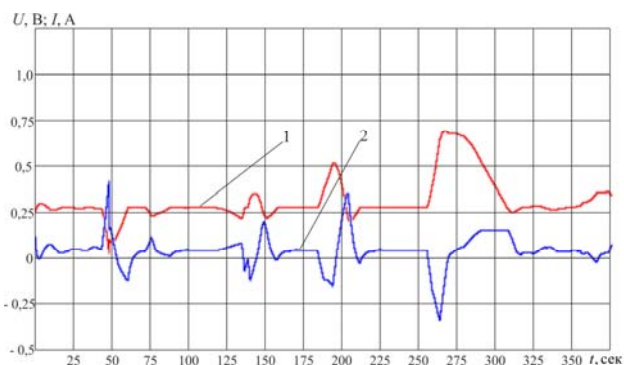


Рис. 11. Залежності напруги і струму на ланці постійного струму: 1 – максимальній напрузі відповідає значення 450 В; 2 – максимальному струму відповідає значення 1150 А

На 130 секундї запит потужності навантаження знижується нижче потужності, на яку розраховані *EDLC*. У зв'язку з тим, що *EDLC* властиві низькі динамічні характеристики, під час перехідних процесів додаткове живлення споживачів з них перемикається до ланки постійного струму.

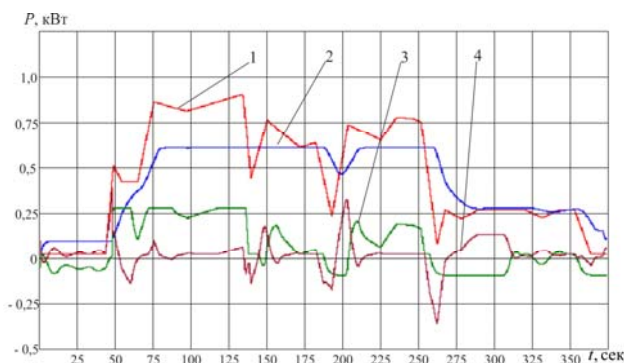


Рис. 12. Енергетичні характеристики гібридного ДЕПК: 1 – максимальній потужності навантаження відповідає значення 1000 кВт; 2 – максимальній потужності на СГЕ відповідає значення 10 кВт; 3 – максимальній потужності на СНЕ відповідає значення 20 кВт; 4 – максимальній потужності на *DC-Link* відповідає значення 300 кВт

Результати досліджень процесів передачі потужності у гібридній СЕУ КПК дають підстави вважати, що вирішення проблеми підвищення ефективності останніх можливо шляхом поєднання класичної стратегії управління розподілом потужності зі стратегією контролю ступеню заряду альтернативних джерел живлення. Сукупність запропонованих стратегій дозволяє проектувати гнучкі багатofункціональні електроенергетичні системи, які інтегруються у гібридні СЕУ КПК в якості невід'ємної складової.

Враховуючи те, що ступінь регулювання заряду *EDLC* несуттєвий по відношенню до споживаної реактивної потужності, а живлення конверторів напругою із низьким коефіцієнтом гармонік створює проблему рекуперації електроенергії, можна констатувати, що компенсація реактивної потужності в основному відбувається за рахунок переведення СОДГ в режим компенсаторів відповідним налаштуванням ПД-регуляторів.

Висновки. У статті вирішено науково-прикладну проблему удосконалення СЕУ КПК за рахунок розро-

бки трирівневої багатокритеріальної інтегрованої стратегії управління розподілом енергії.

Запропонований метод задовольняє сучасні вимоги до енергозбереження, рівням вібрацій, шуму і деградаційних ефектів, що пред'являються до СЕУ КПК, на всіх ділянках енергетичного процесу передачі потужності від джерел енергії до гребних гвинтів. Це дозволяє проводити параметризацію пропульсивних і енергетичних характеристик СЕУ КПК в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля.

Важливим є можливість ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК, що дозволяє використовувати розроблений метод як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopm J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments // *Applied Energy*. – 2017. – v.194. – pp. 30-54. doi: **10.1016/j.apenergy.2017.02.060**.
2. Kim D.H., Paik J.K. Ultimate limit state-based multi-objective optimum design technology for hull structural scantlings of merchant cargo ships // *Ocean Engineering*. – 2017. – v.129. – pp. 318-334. doi: **10.1016/j.oceaneng.2016.11.033**.
3. Gonca G., Sahin B., Parlak A., Ust Y., Ayhan V., Cesur I., Boru B. Theoretical and experimental investigation of the Miller cycle diesel engine in terms of performance and emission parameters // *Applied Energy*. – 2015. – v.138. – pp. 11-20. doi: **10.1016/j.apenergy.2014.10.043**.
4. Ko J., Jin D., Jang W., Myung C.-L., Kwon S., Park S. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures // *Applied Energy*. – 2017. – v.187. – pp. 652-662. doi: **10.1016/j.apenergy.2016.11.105**.
5. Baldi F., Johnson H., Gabrielli C., Andersson K. Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker // *Energy Procedia*. – 2014. – v.61. – pp. 1732-1735. doi: **10.1016/j.egypro.2014.12.200**.
6. Vrijdag A., Stapersma D., van Terwisga T. Control of propeller cavitation in operational conditions // *Journal of Marine Engineering & Technology*. – 2010. – v.9. – pp. 15-26. doi: **10.1080/20464177.2010.11020228**.
7. Natale F.D., Carotenuto C. Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2015. – v.40. – pp. 166-191. doi: **10.1016/j.trd.2015.08.011**.
8. Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation // *Applied Energy*. – 2016. – v.161. – pp. 124-132. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.10.022**.
9. Bassam A.M., Phillips A.B., Turnock S.R., Wilson P.A. An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – v.41. – iss.47. – pp. 22453-22464. doi: **10.1016/j.ijhydene.2016.08.049**.
10. Symington W.P., Belle A., Nguyen H.D., Binns J.R. Emerging technologies in marine electric propulsion // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. – 2014. – v.230. – iss.1. – pp. 187-198. doi: **10.1177/1475090214558470**.
11. Kwatny H.G., Bajpai G., Miu K., Yasar M. Fuel Optimal Control With Service Reliability Constraints for Ship Power Systems // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2014. – v.47. – iss.3. – pp. 6386-6391. doi: **10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773**.
12. Chuang S.-J., Hong C.-M., Chen C.-H. Improvement of integrated transmission line transfer index for power system voltage stability // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2016. – v.78. – pp. 830-836. doi: **10.1016/j.ijepes.2015.11.111**.
13. Vernengo G., Gaggero T., Rizzuto E. Simulation based design of a fleet of ships under power and capacity variations // *Applied Ocean Research*. – 2016. – v.61. – pp. 1-15. doi: **10.1016/j.apor.2016.09.003**.
14. Lützen M., Mikkelsen L.L., Jensen S., Rasmussen H.B. Energy efficiency of working vessels – A framework // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – v.143. – pp. 90-99. doi: **10.1016/j.jclepro.2016.12.146**.
15. McCoy T.J. Trends in ship electric propulsion // *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. – 2002. – v.1. – pp. 243-346. doi: **10.1109/PESS.2002.1043247**.
16. Zivi E. Design of robust shipboard power automation systems // *Annual Reviews in Control*. – 2005. – v.29. – iss.2. – pp. 261-272. doi: **10.1016/j.arcontrol.2005.08.004**.
17. Castles G., Reed G., Bendre A., Pitsch R. Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships // *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. – 2009. doi: **10.1109/ESTS.2009.4906560**.
18. Baldi F., Ahlgren F., Melino F., Gabrielli C., Andersson K. Optimal load allocation of complex ship power plants // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – v.124. – pp. 344-356. doi: **10.1016/j.enconman.2016.07.009**.
19. Sulligoi G., Castellan S., Aizza M., Bosich D., Piva L., Lipardi G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation // *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. – 2012. – pp. 452-457. doi: **10.1109/SPEEDAM.2012.6264570**.
20. Bigdeli N. Optimal management of hybrid PV/fuel cell/battery power system: a comparison of optimal hybrid approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – v.42. – pp. 377-393. doi: **10.1016/j.rser.2014.10.032**.
21. Choi C.H., Yu S., Han I.-S., Kho B.-K., Kang D.-G., Lee H.-Y., Seo M.-S., Kong J.-W., Kim G., Ahn J.-W., Park S.-K., Jang D.-W., Lee J.H., Kim M. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – v.41. – iss.5. – pp. 3591-3599. doi: **10.1016/j.ijhydene.2015.12.186**.
22. José J. de-Troya, Álvarez C., Fernández-Garrido C., Carral L. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – v.41. – iss.4. – pp. 2853-2866. doi: **10.1016/j.ijhydene.2015.11.145**.
23. Nelson D.B., Nehrir M.H., Wang C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems // *Renewable Energy*. – 2006. – v.31. – iss.10. – pp. 1641-1656. doi: **10.1016/j.renene.2005.08.031**.
24. Ramli M., Hiendro A., Twaha S. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage // *Renewable Energy*. – 2015. – v.78. – pp. 398-405. doi: **10.1016/j.renene.2015.01.026**.
25. Rezzouk H., Mellit A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system in the north of Algeria // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – v.43. – pp. 1134-1150. doi: **10.1016/j.rser.2014.11.103**.
26. Vetter M., Lux S. Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium-Ion Batteries // *Storing Energy*. – 2016. – pp. 205-225. doi: **10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7**.
27. Zahedi B., Norum L.E., Ludvigsen K.B. Optimized efficiency of all-electric ships by DC hybrid power systems // *Journal of Marine Engineering and Technology*. – 2017. – v.6. – iss.1. – pp. 1-11. doi: **10.1016/j.jmte.2017.01.001**.

- nal of Power Sources. – 2014. – v.255. – pp. 341-354. doi: [10.1016/j.jpowsour.2014.01.031](#).
28. Wang L., Lee D.J., Lee W.J., Chen Z. Analysis of a novel autonomous marine hybrid power generation/energy storage system with a high-voltage direct current link // *Journal of Power Sources*. – 2008. – v.185. – iss.2. – pp. 1284-1292. doi: [10.1016/j.jpowsour.2008.08.037](#).
29. Ovrum E., Bergh T.F. Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation // *Applied Energy*. – 2015. – v.152. – pp. 162-172. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.01.066](#).
30. Haseltalab A., Negenborn R.R., Lodewijks G. Multi-Level Predictive Control for Energy Management of Hybrid Ships in the Presence of Uncertainty and Environmental Disturbances // *IFAC-Papers On Line*. – 2016. – v.49. – iss.3. – pp. 90-95. doi: [10.1016/j.ifacol.2016.07.016](#).
31. Lashway C.R., Elsayed A.T., Mohammed O.A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – v.141. – pp. 50-62. doi: [10.1016/j.epsr.2016.06.031](#).
32. Giannoutsos S.V., Manias S.N. Energy management and D/G fuel consumption optimization in the power system of marine vessels through VFD-based process flow control // *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. – 2015. – pp. 842-850. doi: [10.1109/EEEIC.2015.7165274](#).
33. Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation // *Applied Energy*. – 2016. – v.161. – pp. 124-132. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.10.022](#).
34. Papalambrou G., Karlis E., Kyrtatos N. Robust Control of Manifold Air Injection in a Marine Diesel Engine // *IFAC-Papers On Line*. – 2015. – v.48. – iss.14. – pp. 438-443. doi: [10.1016/j.ifacol.2015.09.496](#).
35. Papalambrou G., Kyrtatos N. Controlled Injection of Compressed Air in Marine Diesel Engine Intake for Improved Load Acceptance // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2009. – v.42. – iss.26. – pp. 140-147. doi: [10.3182/20091130-3-FR-4008.00019](#).
36. Shih N.-C., Weng B.-J., Lee J.-Y., Hsiao Y.-C. Development of a 20kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – v.39. – iss.25. – pp. 13894-13901. doi: [10.1016/j.ijhydene.2014.01.113](#).
37. Zhang S., Xiong R., Sun F. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system // *Applied Energy*. – 2017. – v.185. – pp. 1654-1662. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.12.035](#).
38. Butcher M., Maltby R., Parvin P.S. Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution? // *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. – 2009. – pp. 521-528. doi: [10.1109/ESTS.2009.4906561](#).
39. Hodge C.G., Mattick D.J. The electric warship then, now and later // *Proceedings of the 9th international naval engineering conference*. – 2008. – pp. 556-565.
40. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Logesh R. Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – v.69. – pp. 129-143. doi: [10.1016/j.rser.2016.11.209](#).
41. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Physical model of degradation effect by interaction azimuthal flow with hull of ship // *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. – Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – pp. 49-53. – ISBN 978-605-01-0782-1.
42. Nikolskyi V., Budashko V., Khniunin S. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's // *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. – Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – pp. 45-49. – ISBN 978-605-01-0782-1.
43. Будашко В.В., Онищенко О.А. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2014. – №38(1081). – С. 45-51.
44. Будашко В.В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №6. – С. 14-19. doi: [10.20998/2074-272X.2015.6.02](#).
45. Будашко В.В., Онищенко О.А., Юшков Е.А. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса // *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. – 2014. – №2. – С. 88-92.
46. Патент України № 100819. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Команда / Будашко В.В., Нікольський В.В., Хніунін С.Г. – Заявл. 02.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
47. Патент України № 108074. Система імпульсно-фазового управління електроприводом суднової гвинто-кермової установки / Будашко В.В., Юшков С.О. – Заявл. 18.02.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.
48. Патент України № 107006. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / Хніунін С.Г., Нікольський В.В., Будашко В.В. – Заявл. 28.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.
49. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – v.3. – no.8(81). – pp. 10-21. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72543](#).

REFERENCES

- Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopm J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 2017, v.194, pp. 30-54. doi: [10.1016/j.apenergy.2017.02.060](#).
- Kim D.H., Paik J.K. Ultimate limit state-based multi-objective optimum design technology for hull structural scantlings of merchant cargo ships. *Ocean Engineering*, 2017, v.129, pp. 318-334. doi: [10.1016/j.oceaneng.2016.11.033](#).
- Gonca G., Sahin B., Parlak A., Ust Y., Ayhan V., Cesur İ., Boru B. Theoretical and experimental investigation of the Miller cycle diesel engine in terms of performance and emission parameters. *Applied Energy*, 2015, v.138, pp. 11-20. doi: [10.1016/j.apenergy.2014.10.043](#).
- Ko J., Jin D., Jang W., Myung C.-L., Kwon S., Park S. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures. *Applied Energy*, 2017, v.187, pp. 652-662. doi: [10.1016/j.apenergy.2016.11.105](#).
- Baldi F., Johnson H., Gabriellii C., Andersson K. Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker. *Energy Procedia*, 2014, v.61, pp. 1732-1735. doi: [10.1016/j.egypro.2014.12.200](#).
- Vrijdag A., Stapersma D., van Terwisga T. Control of propeller cavitation in operational conditions. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2010, v.9, pp. 15-26. doi: [10.1080/20464177.2010.11020228](#).
- Natale F.D., Carotenuto C. Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, v.40, pp. 166-191. doi: [10.1016/j.trd.2015.08.011](#).
- Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation. *Applied Energy*, 2016, v.161, pp. 124-132. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.10.022](#).
- Bassam A.M., Phillips A.B., Turnock S.R., Wilson P.A. An improved energy management strategy for a hybrid fuel

- cell/battery passenger vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, v.41, iss.47, pp. 22453-22464. doi: **10.1016/j.ijhydene.2016.08.049**.
10. Symington W.P., Belle A., Nguyen H.D., Binns J.R. Emerging technologies in marine electric propulsion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2014, v.230, iss.1, pp. 187-198. doi: **10.1177/1475090214558470**.
11. Kwatny H.G., Bajpai G., Miu K., Yasar M. Fuel Optimal Control With Service Reliability Constraints for Ship Power Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, v.47, iss.3, pp. 6386-6391. doi: **10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773**.
12. Chuang S.-J., Hong C.-M., Chen C.-H. Improvement of integrated transmission line transfer index for power system voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, v.78, pp. 830-836. doi: **10.1016/j.ijepes.2015.11.111**.
13. Vernengo G., Gaggero T., Rizzuto E. Simulation based design of a fleet of ships under power and capacity variations. *Applied Ocean Research*, 2016, v.61, pp. 1-15. doi: **10.1016/j.apor.2016.09.003**.
14. Lützen M., Mikkelsen L.L., Jensen S., Rasmussen H.B. Energy efficiency of working vessels – A framework. *Journal of Cleaner Production*, 2017, v.143, pp. 90-99. doi: **10.1016/j.jclepro.2016.12.146**.
15. McCoy T.J. Trends in ship electric propulsion. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, v.1, pp. 243-346. doi: **10.1109/PESS.2002.1043247**.
16. Zivi E. Design of robust shipboard power automation systems. *Annual Reviews in Control*, 2005, v.29, iss.2, pp. 261-272. doi: **10.1016/j.arcontrol.2005.08.004**.
17. Castles G., Reed G., Bendre A., Pitsch R. Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships. *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009. doi: **10.1109/ESTS.2009.4906560**.
18. Baldi F., Ahlgren F., Melino F., Gabriellii C., Andersson K. Optimal load allocation of complex ship power plants. *Energy Conversion and Management*, 2016, v.124, pp. 344-356. doi: **10.1016/j.enconman.2016.07.009**.
19. Sulligoi G., Castellan S., Aizza M., Bosich D., Piva L., Lipardi G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation. *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2012, pp. 452-457. doi: **10.1109/SPEEDAM.2012.6264570**.
20. Bigdeli N. Optimal management of hybrid PV/fuel cell/battery power system: a comparison of optimal hybrid approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, v.42, pp. 377-393. doi: **10.1016/j.rser.2014.10.032**.
21. Choi C.H., Yu S., Han I.-S., Kho B.-K., Kang D.-G., Lee H.Y., Seo M.-S., Kong J.-W., Kim G., Ahn J.-W., Park S.-K., Jang D.-W., Lee J.H., Kim M. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, v.41, iss.5, pp. 3591-3599. doi: **10.1016/j.ijhydene.2015.12.186**.
22. José J. de-Troya, Álvarez C., Fernández-Garrido C., Carral L. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, v.41, iss.4, pp. 2853-2866. doi: **10.1016/j.ijhydene.2015.11.145**.
23. Nelson D.B., Nehrir M.H., Wang C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. *Renewable Energy*, 2006, v.31, iss.10, pp. 1641-1656. doi: **10.1016/j.renene.2005.08.031**.
24. Ramli M., Hiendro A., Twaha S. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage. *Renewable Energy*, 2015, v.78, pp. 398-405. doi: **10.1016/j.renene.2015.01.026**.
25. Rezzouk H., Mellit A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system in the north of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, v.43, pp. 1134-1150. doi: **10.1016/j.rser.2014.11.103**.
26. Vetter M., Lux S. Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium-Ion Batteries. *Storing Energy*, 2016, pp. 205-225. doi: **10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7**.
27. Zahedi B., Norum L.E., Ludvigsen K.B. Optimized efficiency of all-electric ships by DC hybrid power systems. *Journal of Power Sources*, 2014, v.255, pp. 341-354. doi: **10.1016/j.jpowsour.2014.01.031**.
28. Wang L., Lee D.J., Lee W.J., Chen Z. Analysis of a novel autonomous marine hybrid power generation/energy storage system with a high-voltage direct current link. *Journal of Power Sources*, 2008, v.185, iss.2, pp. 1284-1292. doi: **10.1016/j.jpowsour.2008.08.037**.
29. Ovrum E., Bergh T.F. Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation. *Applied Energy*, 2015, v.152, pp. 162-172. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.01.066**.
30. Haseltalab A., Negenborn R.R., Lodewijks G. Multi-Level Predictive Control for Energy Management of Hybrid Ships in the Presence of Uncertainty and Environmental Disturbances. *IFAC-Papers On Line*, 2016, v.49, iss.3, pp. 90-95. doi: **10.1016/j.ifacol.2016.07.016**.
31. Lashway C.R., Elsayed A.T., Mohammed O.A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads. *Electric Power Systems Research*, 2016, v.141, pp. 50-62. doi: **10.1016/j.epsr.2016.06.031**.
32. Giannoutsos S.V., Manias S.N. Energy management and D/G fuel consumption optimization in the power system of marine vessels through VFD-based process flow control. *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 842-850. doi: **10.1109/EEEIC.2015.7165274**.
33. Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation. *Applied Energy*, 2016, v.161, pp. 124-132. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.10.022**.
34. Papalambrou G., Karlis E., Kyrtatos N. Robust Control of Manifold Air Injection in a Marine Diesel Engine. *IFAC-Papers On Line*, 2015, v.48, iss.14, pp. 438-443. doi: **10.1016/j.ifacol.2015.09.496**.
35. Papalambrou G., Kyrtatos N. Controlled Injection of Compressed Air in Marine Diesel Engine Intake for Improved Load Acceptance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2009, v.42, iss.26, pp. 140-147. doi: **10.3182/20091130-3-FR-4008.00019**.
36. Shih N.-C., Weng B.-J., Lee J.-Y., Hsiao Y.-C. Development of a 20kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, v.39, iss.25, pp. 13894-13901. doi: **10.1016/j.ijhydene.2014.01.113**.
37. Zhang S., Xiong R., Sun F. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system. *Applied Energy*, 2017, v.185, pp. 1654-1662. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.12.035**.
38. Butcher M., Maltby R., Parvin P.S. Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution? *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009, pp. 521-528. doi: **10.1109/ESTS.2009.4906561**.
39. Hodge C.G., Mattick D.J. The electric warship then, now and later. *Proceedings of the 9th international naval engineering conference*, 2008, pp. 556-565.
40. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Logesh R. Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, v.69, pp. 129-143. doi: **10.1016/j.rser.2016.11.209**.

41. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Physical model of degradation effect by interaction azimuthal flow with hull of ship. *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. pp. 49-53. ISBN 978-605-01-0782-1.
42. Nikolskyi V., Budashko V., Khniunin S. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's. *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. pp. 45-49. ISBN 978-605-01-0782-1.
43. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Improving management system combined thruster propulsion systems. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 45-51. (Ukr).
44. Budashko V.V. Implementation approaches during simulation of energy processes for a dynamically positioned ship. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.6, pp. 14-19. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.02. (Rus).
45. Budashko V.V., Onishchenko O.A., Yushkov E.A. Physical modeling of multi-propulsion complex. *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*, 2014, no.2, pp. 88-92. (Rus).
46. Budashko V.V., Nikolskyi V.V., Khniunin S.H. *Sudova systema monitorynhu dlya poperedzhennya efektu Koanda* [Ship monitoring system for the prevention of Coanda effect]. Patent UA, no.100819, 2015. (Ukr).
47. Budashko V.V., Yushkov E.A. *Systema impul'sno-fazovoho upravlinnya elektropriyodom sudnovoyi hynto-kermovoyi ustanovky* [The pulse-phase control system of electric ship propeller-steering plant]. Patent UA, no.108074, 2016. (Ukr).
48. Khniunin S.H., Budashko V.V., Nikolskyi V.V. *Sudova systema monitorynhu dlya poperedzhennya efektu Koanda* [Ship system for monitoring for preventing the Coanda effect]. Patent UA, no.107006, 2016. (Ukr).
49. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, v.3, no.8(81), pp. 10-21. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72543.

Поступила (received) 24.03.2017

Будашко Виталий Витальевич, к.т.н., доц.,
Одесская национальная морская академия,
65029, Одесса, ул. Дидрихсона, 8,
тел/phone +380 48 7332367, e-mail: bvv@te.net.ua

V.V. Budashko

Odessa National Maritime Academy,
8, Didrikhson Str., Odessa, 65029.

Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.

Purpose. Efficiency of hybrid ships power plants (SPP) combined propulsion complexes (CPC) by various criteria for energy management systems strategies. **Methodology.** Based on the classification system topologies SPP CPC for mechanical, electrical and hybrid types of motors schematic diagrams of management strategies for the criterion of minimum power consumption are defined. Changing the technical component of the traditional approach to building hybrid ships electric power systems (SEPS) SPP CPC the principle of modifying the structure of SEPS is applied with the integration of additional static alternative power source as dynamic reserve, which allowed to meet modern requirements for energy efficiency, levels of vibration, noise and degradation effects produced to SPP CPC, in all areas of the energy for the transfer of power from energy to propellers. Modeling of power transmission of energy to propellers in MatLab/Simulink is conducted, using blocks of optimization library and definition of identity markers. **Results.** Major advantages and disadvantages SPP CPC depending on the topology of energy distribution systems are determined. According to the chosen structure system electricity characteristics were obtained in the process of power transmission SPP CPC and power systems and their control strategies in terms of increased efficiency and eliminate these drawbacks. And finally, mathematical apparatus for research in terms of the development of methods for designing and managing SPP hybrid CPC to reduced fuel consumption, emissions into the environment and improving maintainability, flexibility and comfort level are improved. **Originality.** The methodology for improving SPP CPC implementation by developing methods of identification markers mutually influencing processes in SPP CPC and the development of implementing these methods of settlement and information systems. **Practical value.** The method enables iterative optimization parameters SPP CPC, it can be used as a means of intelligent design, which is the result of the application of improved performance SPP CPC. References 49, table 1, figures 12.

Key words: ship power plants, combined propulsion complexes, energy management system, control strategy.