

ISSN 2074-272X

науково-практичний  
журнал

2017/1



# **EIE** **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**

**Інформація**

**Ювілеї**

**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  
**Yuferov V.B.** Professor, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", Ukraine  
**Vinitzki Yu.D.** Professor, GE EEM, Moscow, Russia  
**Zagirnyak M.V.** Professor, Corresponding member of NAES of Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskyi National University, Ukraine  
**Zgraja J.** Professor, Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology, Poland

### НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ\*

- Клименко Б.В.** головний редактор, професор, НТУ "ХПІ"  
**Сокол Є.І.** заступник головного редактора, член-кор. НАНУ, ректор НТУ "ХПІ"  
**Розов В.Ю.** заступник головного редактора, член-кор. НАНУ, директор ДУ "ІТПМ НАНУ"  
**Гречко О.М.** відповідальний секретар, к.т.н., НТУ "ХПІ"  
**Баранов М.І.** д.т.н., НДПКІ "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 НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"  
**Мілих В.І.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Михайлов В.М.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Омельяненко В.І.** професор, НТУ "ХПІ"  
**Пуйло Г.В.** професор, ОНТУ, Одеса  
**Резинкін О.Л.** професор, НТУ "ХПІ"  
**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"  
**Vepryk Yu.M.** Professor, NTU "KhPI"  
**Gryb O.G.** Professor, NTU "KhPI"  
**Guryn A.G.** Professor, NTU "KhPI"  
**Dan'ko V.G.** Professor, NTU "KhPI"  
**Zhemerov G.G.** Professor, NTU "KhPI"  
**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", Kyrpuchova 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

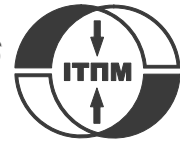
ISSN (online) 2309-3404

© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2017  
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2017

Підписано до друку 24.02.2017 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-01-2017. Ціна договірна.

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



**ЗМІСТ**

**Електротехніка. Визначні події. Славетні імена**

**Баранов М.И.** Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 36: Лауреаты Нобелевской премии по физике за 1995–1999 гг. .... 3

**Електричні машини та апарати**

**Байда Е.И., Клименко Б.В.** Исследование механических напряжений в приводном валу вакуумного выключателя средних напряжений ..... 10

**Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка**

**Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Бовдуй І.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б.** Экспериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи ..... 16

**Хлопенко Н.Я., Хлопенко И.Н.** Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора ..... 21

**Шуруб Ю.В.** Статистична оптимізація частотно регульованих асинхронних електроприводів при скалярному керуванні ..... 26

**Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка**

**Баранов М.И., Князев В.В., Рудаков С.В.** Расчетная и опытная оценка результатов электротермического воздействия нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 импульса тока короткого удара искусственной молнии на тонкостенное покрытие из нержавеющей стали ..... 31

**Винников Д.В., Корытченко К.В., Ткачев В.И., Егоренков В.В., Кудин Д.В., Мирная Т.Ю.** Исследование изменения физико-химических свойств водопроводной воды под воздействием мощных подводных искровых разрядов ..... 39

**Голик О.В., Щербенюк Л.А.** Статистичні аспекти неруйнівного контролю дефектності поліімідної емаль ізоляції в умовах виробництва ..... 47

**Електричні станції, мережі і системи**

**Бондаренко В.О., Доманский И.В., Костин Г.Н.** Анализ энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками ..... 54

**Веприк Ю.Н.** Пути повышения эффективности компьютерного моделирования режимов работы электрических систем на основе уравнений в фазных координатах ..... 63

**Інформація**

**Бедерак Я.С.** Про обґрунтування вибору економіко-математичних методів оцінки енергоефективності виробничих об'єктів ..... 67

**Ювілеї**

**Бржезицький Володимир Олександрович** (до 75-річчя з дня народження) ..... 73

**TABLE OF CONTENTS**

**Electrical Engineering. Great Events. Famous Names**

**Baranov M.I.** An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 36: Nobel Prize Laureates in Physics for 1995-1999 ..... 3

**Electrical Machines and Apparatus**

**Baida E.I., Klymenko B.V.** Investigation of mechanical stresses in the drive shaft of MV vacuum circuit breaker ..... 10

**Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics**

**Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B.** Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line ..... 16

**Khlopenko N.J., Khlopenko I.N.** Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage ..... 21

**Shurub Yu.V.** Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control ..... 26

**High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering**

**Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V.** Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel ..... 31

Vinnikov D.V., Korytchenko K.V., Tkachov V.I., Egorenkov V.V., Kudin D.V., Mirnaya T.Y. Investigation of changes of physical and chemical properties of tap water under influence of powerful underwater spark discharges ...	39
Golik O.V., Shchebeniuk L.A. Statistic methods of polyimide enamel isolation defective non-destructive control at the conditions of production .....	47

### **Power Stations, Grids and Systems**

Bondarenko V.O., Domanskyi I.V., Kostin G.N. Analysis of energy efficiency of operating modes of electrical systems with the traction loads .....	54
Vepryk Yu.N. Ways to improve the efficiency of computer simulation of electrical systems modes based on equations in phase coordinates.....	63

### **Information**

Bederak Ya.S. On substantiation of selection of economic and mathematical methods for the assessment of energy efficiency of production facilities .....	67
--	----

### **Anniversaries**

Brzhezitsky Volodymyr Oleksandrovych (on the 75th anniversary of his birth).....	73
--	----

### **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 Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИНЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, Gale, DOAJ, OpenAIRE 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.uran.ua/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.*

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 36:  
ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ ЗА 1995–1999 гг.**

*Наведено короткий аналітичний огляд основних наукових досягнень вчених світу, які відмічені Нобелівською премією по фізиці за період 1995-1999 рр. У число таких досягнень увійшли відкриття тау-лептона, експериментальне виявлення електронного нейтрино, відкриття надтекучості рідкого гелію-3, створення методів охолодження і «полонення» атомів за допомогою лазерного світла, відкриття нової форми квантової рідини із збудженнями дробового електричного заряду і прояснення квантової структури електрослабких взаємодій елементарних частинок.* Бібл. 25, рис. 13.

*Ключові слова:* сучасна фізика, досягнення, тау-лептон, електронне нейтрино, надтекучість рідкого гелію-3, охолодження і «полонення» атомів, квантова рідина із збудженнями дробового електричного заряду, квантова структура електрослабких взаємодій елементарних частинок, огляд.

*Приведен краткий аналитический обзор выдающихся научных достижений ученых мира, отмеченных Нобелевской премией по физике за период 1995-1999 гг. В число таких достижений вошли открытие тау-лептона, экспериментальное обнаружение электронного нейтрино, открытие сверхтекучести жидкого гелия-3, создание методов охлаждения и «пленения» атомов с помощью лазерного света, открытие новой формы квантовой жидкости с возбуждениями дробного электрического заряда и прояснение квантовой структуры электрослабких взаимодействий элементарных частиц.* Библ. 25, рис. 13.

*Ключевые слова:* современная физика, достижения, тау-лептон, электронное нейтрино, сверхтекучесть жидкого гелия-3, охлаждение и «пленение» атомов, квантовая жидкость с возбуждениями дробного электрического заряда, квантовая структура электрослабких взаимодействий элементарных частиц, обзор.

**Введение.** Нобелевская премия вот уже более столетия является в мире одной из наиболее престижных международных премий. Она присуждается Нобелевским комитетом Шведской Королевской академии наук за выдающиеся научные исследования, революционные изобретения, крупный вклад в культуру и развитие человеческого общества [1]. Нобелевские премии в области физики, химии, физиологии, медицины, литературы и мира были учреждены в соответствии с завещанием известного шведского инженера и изобретателя динамита Альфреда Нобеля (1833-1896 гг.), согласно которому для этих целей и финансовой поддержки нобелевских лауреатов был создан фонд Нобеля. Вручаются они с 1901 г в столице Швеции – г. Стокгольме (за исключением Нобелевской премии мира, церемония вручения которой проходит в столице Норвегии – г. Осло). Традиционно ежегодная церемония награждения лауреатов этой престижной премии проходит в день смерти А. Нобеля – 10 декабря. Отметим, что в 1968 г. была учреждена премия Банка Швеции по экономике в память об А. Нобеле (Нобелевская премия по экономике) [1]. Размер денежного вознаграждения Нобелевской премии, например в 2012 г., составлял 8 млн. шведских крон (1,2 млн. долларов США). До 2012 г. этот размер рассматриваемой премии составлял 10 млн. указанных крон. Совет директоров фонда Нобеля летом 2012 г. был вынужден принять решение по «урезанию» денежного вознаграждения лауреатов на 20 % в связи с необходимостью «сохранения капитала фонда в долгосрочной перспективе» [1].

**1. Открытие тау-лептона.** Согласно принятой классификации в физике элементарных частиц тау-лептоны относятся к третьему поколению микрочастиц [1, 2]. Американский физик-экспериментатор

Мартин Льюис Перл (рис. 1), работая на Стэнфордском сверхмощном линейном ускорителе электронов на энергию до 21 ГэВ с длиной ускорительной «трубки» в 3200 м (США) [3], в 1975 г. открыл новую элементарную частицу тау-лептон (иначе говоря, «тяжелый» электрон) [4]. Это важное открытие в физике высоких энергий и элементарных частиц подтверждало теорию «Большого взрыва» при создании Вселенной [1, 5].



Рис. 1. Выдающийся американский физик-экспериментатор Мартин Льюис Перл (Martin Lewis Perl, 1927-2014 гг.), лауреат Нобелевской премии по физике за 1995 г.

За указанный фундаментальный научный результат М. Перл в 1995 г. был удостоен Нобелевской премии по физике [4, 5]. Эту премию он разделил с другим выдающимся американским физиком Фредериком Райнесом (рис. 2), открывшим нейтрино [4, 6].



Рис. 2. Выдающийся американский физик-экспериментатор Фредерик Райнес (Frederick Reines, 1918-1998 гг.), лауреат Нобелевской премии по физике за 1995 г.

**2. Открытие нейтрино.** В 1930 г. выдающимся австрийским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули (1900-1958 гг.) была высказана гипотеза о существовании такой «легкой» элементарной частицы как электронное нейтрино  $\nu_e$ , относящейся согласно [2] к абсолютно стабильным частицам без заряда и массы покоя [4, 6]. Работая в творческом тандеме с известным американским физиком-экспериментатором в Лос-Аламосской национальной лаборатории (штат Нью-Мексико, США) Клайдом Коуэном (1919-1974 гг.), Ф. Райнес в 1956 г. в обратном радиоактивном бета-распаде атомных ядер ( $\beta^+$  – распаде) на ядерном реакторе экспериментально обнаружил в продуктах распада электронное нейтрино  $\nu_e$  [6]. К моменту присуждения Ф. Райнесу указанной премии за 1995 г. К. Коуэна уже не было в живых. Поэтому его фамилии и не было в списке нобелевских лауреатов (по действующему положению данная премия присуждается лишь живым соискателям этой престижной награды).

**3. Открытие сверхтекучести жидкого гелия-3.** В 1972 г. американский физик Дэвид Моррис Ли (рис. 3), работая в США профессором Корнелльского университета, совместно с другим профессором этого университета Робертом Колманом Ричардсоном (рис. 4) и аспирантом Дугласом Дином Ошеровым (рис. 5) опубликовали результаты исследований по открытию при температуре около 0,001 К явления сверхтекучести в изотопе гелия  $^3\text{He}$  – жидком гелии-3 [7-9]. Напомним, что в 1937 г. выдающимся советским физиком-экспериментатором Петром Леонидовичем Капицей (1894-1984 гг.), возглавлявшим Институт физических проблем (ИФП) АН СССР (г. Москва), при абсолютной температуре ниже 2,19 К был открыт уникальный физический эффект в веществе – явление сверхтекучести в изотопе гелия  $^4\text{He}$  – жидком гелии-II [10]. За «*фундаментальные изобретения и открытия в области низких температур*» академику АН СССР П.Л. Капице была присуждена Нобелевская премия по физике за 1978 г. [4, 10]. Учитывая фундаментальность полученных Д.М. Ли, Р.К. Ричардсоном и Д.Д. Ошеровым научных результатов, в 1996 г. они были удостоены Нобелевской премии по физике [4, 7-9]. Открытие сверхте-

кучести жидкого гелия-3 способствовало перспективным фундаментальным и прикладным исследованиям в ряде областей физики [4, 7].



Рис. 3. Выдающийся американский физик-экспериментатор Дэвид Моррис Ли (David Morris Lee, 1931 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1996 г.



Рис. 4. Выдающийся американский физик Роберт Колман Ричардсон (Robert Coleman Richardson, 1937-2013 гг.), лауреат Нобелевской премии по физике за 1996 г.



Рис. 5. Выдающийся американский физик-экспериментатор Дуглас Дин Ошеров (Douglas Dean Osheroff, 1945 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1996 г.

**4. Создание методов охлаждения и «пленения» атомов вещества.** Американский исследовательский Центр Bell Laboratories по числу нобелевских лауреатов занимает на сегодня ведущие в мире позиции [11]. В этом известном научном Центре с 1983 г. в должности главы отделения квантовой электроники работал будущий нобелевский лауреат Стивен Чу (рис. 6). Занимаясь вопросами суперохлаждения и «улавлива-

ния» атомов с использованием лазерных технологий, в 1985 г. С. Чу со своими коллегами Уильямом Дэниелем Филлипсом (рис. 7) и Клодом Коэн-Таннуджи (рис. 8) добился больших успехов [11-15].



Рис. 6. Выдающийся американский физик-экспериментатор Стивен Чу (Steven Chu, 1948 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1997 г.



Рис. 7. Выдающийся американский физик Уильям Дэниел Филлипс (William Daniel Phillips, 1948 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1997 г.



Рис. 8. Выдающийся французский физик Клод Коэн-Таннуджи (Claude Cohen-Tannoudji, 1933 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1997 г.

Общеизвестно, что в микромире материи мерой температуры атома (молекулы) или частицы является их кинетическая энергия [2, 11]. Большой вклад в эту

энергию и соответственно в температуру дает скорость поступательного движения указанных микрообъектов. Меньший вклад в рассматриваемые показатели вносит частота их собственных колебаний [2, 11]. Поэтому чем быстрее движется и чаще колеблется микрообъект, тем он будет «горячее». Физиками было установлено, что при температуре «минус» 270 °С (около 3 К) скорость поступательного движения атома вещества составляет около 100 м/с [11]. При комнатной же температуре («плюс» 20 °С) эта скорость атомов близка к значению в 1000 м/с [2, 10, 16]. Если понизить эту скорость до 0,01 м/с, то атом будет фактически «заморожен». Сделать это можно различными физическими способами. Исследования, проведенные в США С. Чу, У. Филлипсом и К. Коэн-Таннуджи, показали, что самым удобным для этого способом является метод лазерного охлаждения атомов [11-15]. Данной группе физиков при исследовании с помощью лазерного луча атомных процессов удалось достичь абсолютной температуры нейтральных атомов вещества порядка  $10^{-6}$  К [11]. Именно за это феноменальное достижение С. Чу, У.Д. Филлипс и К. Коэн-Таннуджи были удостоены Нобелевской премии по физике за 1997 г. [4, 11-15]. Разработанный ими лазерный метод суперохлаждения и «улавливания» таким путем атомов применяется в настоящее время при конструировании прецизионных атомных часов, а также при точном позиционировании и в космической навигации [13]. Немаловажными фактами, характеризующими С. Чу как неординарную и талантливую личность, является то, что С. Чу в период 2004-2008 гг. был директором всемирно известной Национальной лаборатории им. Эрнеста Лоуренса (при ее штате в 4 тыс. сотрудников и годовом бюджете в 650 млн. долларов США) и активно занимался альтернативными источниками энергии (в частности, биотопливом, искусственным фотосинтезом и методами получения электроэнергии от солнечного излучения), а в период 2009-2013 гг. – министром энергетики США [12, 13].

**5. Открытие новой формы квантовой жидкости с возбуждениями дробного электрического заряда.** Физическое понятие «квантовой жидкости» было введено в период 1937-1941 гг. выдающимся советским физиком-теоретиком Львом Давидовичем Ландау (1908-1968 гг.), разрабатывавшим в то время в ИФП АН СССР (у академика АН СССР П.Л. Капицы, плодотворно работавшего тогда в области физики низких температур и экспериментально открывшего в 1937 г. явление сверхтекучести жидкого гелия-II) квантовую теорию явления сверхтекучести жидкого гелия-II [10, 17]. Для квантовой жидкости характерным является то, что в ней определяющую роль в поведении ее микрокомпонент (составляющих микроэлементов) начинают играть квантовые эффекты. В этой жидкости квантовые неопределенности координат ее микроэлементов (например, атомов) согласно соотношению неопределенности Гейзенберга [2, 17] начинают значительно превышать текущие взаимные расстояния между ними. Поэтому физические свойства таких жидкостей будут определяться исключительно стохастическими закономерностями квантовой

физики. В период 1981-1982 гг. научные группы Хорста Людвиг Штёрмера (рис. 9) и Дэниела С. Цуи (рис. 10), изучавшие «целочисленный квантовый эффект Холла», открытый в 1980 г. Клаусом фон Клитцингом (1943 г.р.) при «гелиевых» температурах (до 1 К) и сильных постоянных магнитных полях (при индукции до 30 Тл) в кремниевом полевом транзисторе и удостоенный Нобелевской премии по физике за 1985 г. [4, 18], с помощью сверхчистой двумерной пленки из арсенида галлия при более низких температурах (ниже 1 К) и более сильных постоянных магнитных полях (при индукции свыше 30 Тл) открыли новый «дробный квантовый эффект Холла» [18-20].



Рис. 9. Выдающийся немецкий физик-экспериментатор Хорст Людвиг Штёрмер (Horst Ludwig Störmer, 1949 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1998 г.



Рис. 10. Выдающийся американский физик-экспериментатор Дэниел С. Цуи (Daniel C. Tsui, 1939 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1998 г.

Для лучшего понимания данного непростого материала следует отметить то, что еще в 1879 г. молодой американский физик Эдвин Герберт Холл (1855-1938 гг.), исследуя протекание постоянного тока силой  $I_H$  вдоль тонкой золотой пластинки, помещенной перпендикулярно линиям индукции  $B_H$  внешнего постоянного магнитного поля, открыл явление возникновения между «свободными» краями пластинки разности электрических потенциалов или напряжения  $U_H$  («эффект Холла») [16]. Как известно, причиной появления  $U_H$  является отклонение дрейфующих электронов пластинки от основного направления их дрейфа к ее «свободным» краям из-за соответствующего действия на них в магнитном поле силы Лоренца [2]. При

этом величина  $U_H$  была прямо пропорциональна току  $I_H$  и индукции  $B_H$ . Кроме того, «холловское» сопротивление  $R_H$ , равное отношению  $U_H/I_H$ , описывалось соотношением вида [18]:  $R_H = B_H / (n_e e_0)$ , где  $n_e$  – усредненная плотность свободных электронов с модулем электрического заряда  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл в материале плоского проводника-пластинки. Вот поэтому эффект Холла можно было использовать как для измерения индукции магнитного поля, так и определения концентрации носителей электрического заряда (положительных «дырок») в проводниках и полупроводниках. Э.Г. Холл свои опыты проводил при комнатной температуре (около 293 К) и уровнях магнитной индукции  $B_H$  менее 1 Тл [18]. Вначале 1980-х годов К. фон Клитцингом при указанных выше экстремальных условиях было установлено, что «холловское» сопротивление  $R_H$  проводника (полупроводника) с ростом уровня воздействующей на него магнитной индукции  $B_H$  изменяется не непрерывно, а скачками, принимая дискретные (квантованные) значения  $R_{Hi} = h / (ie_0^2)$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots$  – целочисленные значения квантового числа  $i$ ;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [2]. Заметим, что в рассматриваемом случае величина  $h/e_0^2$  составляет примерно 26 кОм. В соответствии с данными выдающегося немецкого физика К. фон Клитцинга получалось, что «холловское» сопротивление  $R_H$  вне зависимости от вида материала в условиях действия на него сверхнизких температур и сильных магнитных полей подвергалось квантованию. Экспериментально открытый К. фон Клитцингом «целочисленный квантовый эффект Холла» объяснялся последовательным заполнением уровней Ландау (дискретных уровней энергии электрона в магнитном поле) по мере роста уровня магнитной индукции. В указанных экспериментах Х.Л. Штёрмера и Д.С. Цуи ученые обнаружили новые квантовые скачки для «холловского» сопротивления  $R_{Hi} = h / (ke_0^2)$ , которые в три раза превышали наибольшие скачки  $R_{Hi}$  в более ранних экспериментах К. фон Клитцинга. Принципиальным отличием при этом было то, что величина  $k$  принимала дробные значения (1/3 и др.). В 1983 г. американский физик-теоретик Роберт Беттс Лафлин (рис. 11) предложил теоретическое обоснование этого эффекта.



Рис. 11. Выдающийся американский физик-теоретик Роберт Беттс Лафлин (Robert Betts Laughlin, 1950 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1998 г.



Согласно теоретическому обоснованию Р.Б. Лафлина открытого опытным путем Х.Л. Штёрмером и Д.С. Цуи «дробного квантового эффекта Холла» при достаточно низкой температуре и весьма сильном магнитном поле двумерный «электронный газ» проводника (полупроводника) из ферми-жидкости становится своеобразной квантовой жидкостью нового типа [18, 21]. Электроны с полуцелыми значениями своего спина, входящие в состав этой «лафлиновской» квантовой жидкости, и возникающие в ней возмущения начинают вести себя как квазичастицы с целым спином (как бозоны) [18-21]. «Лафлиновская» квантовая жидкость становилась бозе-жидкостью, для которой возможны бозе-конденсации, а значит, явления сверхтекучести и сверхпроводимости. Последнее явление становилось возможным в случае, когда возбуждения в этой особой квантовой жидкости являлись электрически заряженными. Р.Б. Лафлин в предложенной теории предполагал, что указанные квазичастицы в этой квантовой жидкости являются коллективными образованиями, существование которых обеспечивается дальнедействующим взаимодействием между электронами и сильным магнитным полем. Согласно Р.Б. Лафлину такой композитной квазичастицей (бозоном) в «лафлиновской» квантовой жидкости служит комбинация электрона и трех квантов магнитного потока [18, 21]. Новая «лафлиновская» квантовая жидкость характеризовалась необычным физическим свойством: добавленный к ней электрон оказывался настолько энергетически невыгодным для нее, что в ней рождались возбуждения с дробным электрическим зарядом  $e_0/3$  [18]. Р.Б. Лафлин впервые теоретически показал, что квазичастицы в конденсированном состоянии материи могут иметь дробные электрические заряды. Такой теоретический подход Р.Б. Лафлина позволял физически объяснить «дробный квантовый эффект Холла», установленный ранее Х.Л. Штёрмером и Д.С. Цуи. За фундаментальность и «открытие новой формы квантовой жидкости с возбуждениями дробного электрического заряда» Х.Л. Штёрмеру, Д.С. Цуи и Р.Б. Лафлину была присуждена Нобелевская премия по физике за 1998 г. [4, 18-21]. Следует указать, что несмотря на то, что дробный электрический заряд квазичастиц, участвующих в протекании явления «дробного квантового эффекта Холла» в своеобразном бозе-конденсате, установлен и измерен сейчас благодаря выдающимся достижениям в радиоэлектронике и метрологии надежно, говорить о прямом наблюдении микрочастицы с таким зарядом пока преждевременно. Тем не менее, результаты научных исследований этих новых нобелевских лауреатов позволяют констатировать нам то, что в научном мире произошло важное событие, которое заставляет ученых пересмотреть многие положения в наших современных представлениях об окружающем нас мире.

**6. Проявление квантовой структуры электро-слабых взаимодействий элементарных частиц.** В 1960-е годы выдающимися американскими Шелдоном Ли Глэшоу (1932 г.р.), Стивеном Вайнбергом (1933-1996 гг.) и пакистанским Абдусом Саламом (1926-1996 гг.) физиками-теоретиками была разработана квантовая теория слабых и электромагнитных взаи-

модействий в микромире, использующая принцип калибровочной инвариантности [22]. Эта теория базировалась на том, что в микромире слабое и электромагнитное взаимодействия являются проявлением единого электрослабого взаимодействия. Практическое применение этой теории для расчёта физических свойств элементарных частиц, которые она должна была предсказывать, было слаборезультативным [23]. В 1970-х годах к решению данной проблемы в области физики элементарных частиц активно подключились ученые-физики Утрехтского университета (Нидерланды) Мартин Вельтман (рис. 12) и Герард Хоофт (рис. 13). Они занялись математической формулировкой калибровочных теорий или теорией перенормировки так называемых неабелевых калибровочных теорий, являющихся основой всей современной физики элементарных частиц [24]. Разработанные этими физиками-теоретиками математический аппарат и на его основе компьютерная программа показали, что многие наиболее проблемные аспекты одной из неабелевых калибровочных теорий – теории электро-слабых взаимодействий в процессе математических вычислений компенсируются [22-24]. Данная программа стала фундаментом для сложнейшей работы ученых по проверке различных подходов к перенормировке теории, которая позволяла бы получать разумные предсказания в физике элементарных частиц.



Рис. 12. Выдающийся нидерландский физик-теоретик Мартин Вельтман (Martinus Veltman, 1931 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1999 г.

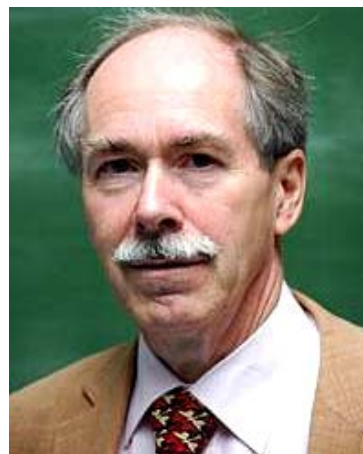


Рис. 13. Выдающийся нидерландский физик-теоретик Герард Хоофт (Gerard 't Hooft, 1946 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 1999 г.

Разработанные Г. Хофтом и М. Вельтманом новые математические методы ренормализации янг-миллсовских полей, как безмассовых, так и получающих массу вследствие спонтанного нарушения в микромире законов симметрии, позволили предсказать некоторые эффекты электрослабого взаимодействия элементарных частиц [22-24]. Так, в 1977 г. им на основе этих методов и теоретических подходов удалось предсказать массу топ-кварка, экспериментально обнаруженного в 1995 г. в Национальной лаборатории ядерных исследований им. Энрико Ферми (США) [22]. Кроме того, с помощью предложенной Г. Хофтом и М. Вельтманом квантовой теории электрослабых взаимодействий были предсказаны массы промежуточных векторных бозонов  $W^\pm$  и  $Z^0$  – двух новых элементарных частиц, открытых после этого экспериментально на Большом адронном коллайдере [3] в Европейском центре ядерных исследований (CERN, Швейцария) [22, 24]. Один из лауреатов Нобелевской премии по физике за 1979 г. Ш.Л. Глэшоу (эту премию «за фундаментальный вклад в создание теории, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействия» в области физики элементарных частиц он разделил со своими коллегами-физиками и соавторами С. Вайнбергом и А. Саламом [4, 25]) о научных достижениях М. Вельтмана и Г. Хофта говорил следующее [24]: «...Теорией электрослабых взаимодействий нельзя было бы заниматься всерьез без вычислительных новаций, введенных Вельтманом и Хофтом». В 1999 г. «за прояснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий» М. Вельтман и Г. Хофт были удостоены Нобелевской премии по физике [4, 22-25]. В последующие годы М. Вельтман и Г. Хофт в области теории элементарных частиц плодотворно занимались так называемой «хиггсовской» проблемой, связанной со сверхтяжелым бозоном Хиггса  $H^*$ , поле которого, по мнению физиков, порождает массы всех существующих в микромире частиц [24].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://news.21.by/other-news/2012/10/09/635932.html>.
2. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
4. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
5. [http://www.peoples.ru/science/physics/martin\\_lewis\\_perl](http://www.peoples.ru/science/physics/martin_lewis_perl).
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Райнес,\\_Фредерик](https://ru.wikipedia.org/wiki/Райнес,_Фредерик).
7. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ли,\\_Дэвид\\_Моррис](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ли,_Дэвид_Моррис).
8. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ричардсон,\\_Роберт\\_Колман](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ричардсон,_Роберт_Колман).
9. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ошеров,\\_Дуглас](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ошеров,_Дуглас).
10. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
11. <http://www.nkj.ru/archive/articles/10172>.
12. <http://lenta.ru/lib/14194434>.
13. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Чу,\\_Стивен](https://ru.wikipedia.org/wiki/Чу,_Стивен).
14. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Филлипс,\\_Уильям](https://ru.wikipedia.org/wiki/Филлипс,_Уильям).
15. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэн-Таннуджи,\\_Клод](https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэн-Таннуджи,_Клод).
16. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
17. 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.

18. [http://vivovoco.astronet.ru/VV/NEWS/PRIRODA/1999/NB\\_PHYS.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/NEWS/PRIRODA/1999/NB_PHYS.HTM).
19. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Штрёммер,\\_Хорст](https://ru.wikipedia.org/wiki/Штрёммер,_Хорст).
20. <http://www.nkj.ru/archive/articles/8176>.
21. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Лафлин,\\_Роберт](https://ru.wikipedia.org/wiki/Лафлин,_Роберт).
22. [http://gruzdoff.ru/wiki/?Т\\_Хофт,\\_Герард](http://gruzdoff.ru/wiki/?Т_Хофт,_Герард).
23. <http://velchel.ru/index.php?cnt=9&nbio=704&nubsub=0&sub=0>.
24. [http://encyclopaedia.bigru.ru/enc/science\\_and\\_technology/VELTMAN\\_MARTIN.html](http://encyclopaedia.bigru.ru/enc/science_and_technology/VELTMAN_MARTIN.html).
25. [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics).

#### REFERENCES

1. Available at: <http://news.21.by/other-news/2012/10/09/635932.html> (accessed 09 October 2012).
2. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
3. Baranov M.I. *Antologiya vydaushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
4. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
5. Available at: [http://www.peoples.ru/science/physics/martin\\_lewis\\_perl](http://www.peoples.ru/science/physics/martin_lewis_perl) (accessed 11 April 2012). (Rus).
6. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Frederick\\_Reines](https://en.wikipedia.org/wiki/Frederick_Reines) (accessed 15 August 2012).
7. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/David\\_Lee\\_\(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/David_Lee_(physicist)) (accessed 25 September 2013).
8. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Coleman\\_Richardson](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Coleman_Richardson) (accessed 22 May 2012).
9. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Douglas\\_Osheroff](https://en.wikipedia.org/wiki/Douglas_Osheroff) (accessed 21 February 2012).
10. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiia v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushchiesja 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).
11. Available at: <http://www.nkj.ru/archive/articles/10172> (accessed 05 May 2011).
12. Available at: <http://lenta.ru/lib/14194434> (accessed 19 April 2012).
13. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Steven\\_Chu](https://en.wikipedia.org/wiki/Steven_Chu) (accessed 10 July 2011).
14. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Daniel\\_Phillips](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Daniel_Phillips) (accessed 23 March 2012).
15. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Claude\\_Cohen-Tannoudji](https://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Cohen-Tannoudji) (accessed 03 May 2012).
16. Kuhling H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
17. 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.
18. Available at: [http://vivovoco.astronet.ru/VV/NEWS/PRIRODA/1999/NB\\_PHYS.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/NEWS/PRIRODA/1999/NB_PHYS.HTM) (accessed 10 April 2014). (Rus).
19. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Horst\\_Ludwig\\_St%C3%B6rmer](https://en.wikipedia.org/wiki/Horst_Ludwig_St%C3%B6rmer) (accessed 12 May 2011).

20. Available at: <http://www.nkj.ru/archive/articles/8176> (accessed 23 July 2013). (Rus).
21. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_B.\\_Laughlin](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_B._Laughlin) (accessed 06 December 2013).
22. Available at: [http://gruzdoff.ru/wiki/'r\\_Хоофг\\_Герард](http://gruzdoff.ru/wiki/'r_Хоофг_Герард) (accessed 21 May 2012). (Rus).
23. Available at: <http://velchel.ru/index.php?cnt=9&nbio=704&nubsub=0&sub=0> (accessed 11 April 2013). (Rus).
24. Available at: [http://encyclopaedia.bigru.ru/enc/science\\_and\\_technology/VELT\\_MAN\\_MARTIN.html](http://encyclopaedia.bigru.ru/enc/science_and_technology/VELT_MAN_MARTIN.html) (accessed 18 September 2013). (Rus).
25. Available at: [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics) (accessed 02 June 2015).

*Поступила (received) 29.12.2015*

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., з.л.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 36: Nobel Prize Laureates in physics for 1995-1999.**

**Purpose.** Implementation of brief analytical review of the distinguished scientific achievements of the world scientists-

physicists, awarded the Nobel Prize in physics for period 1995-1999. **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 bonuses on physics for period 1995-1999. **Originality.** Systematization is executed with exposition in the short concentrated form of the known scientific and technical materials, devoted opening of tau-lepton, experimental discovery of electronic neutrino, opening of superfluidity of liquid helium-3, creation of methods of cooling and «capture» of atoms by a laser ray, opening of new form of quantum liquid with excitations of fractional electric charge and clearing up of quantum structure of electroweak interactions of elementary particles scientists-physicists. **Practical value.** Popularization and deepening of scientific and technical knowledges for students, engineer and technical specialists and research workers in area of modern theoretical and experimental physics, extending their scientific range of interests and further development of scientific and technical progress in human society. References 25, figures 13.

**Key words:** modern physics, achievements, tau-lepton, electronic neutrino, superfluidity of liquid helium-3, cooling and «capture» of atoms, quantum liquid with excitations of fractional electric charge, quantum structure of electroweak interactions of elementary particles, review.

Е.И. Байда, Б.В. Клименко

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИВОДНОМ ВАЛУ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЙ

*У статті досліджуються процеси, що визначають механічні напруги в приводному валу вакуумного відмикача в статичному та динамічному режимах роботи. Показано, що механічна деформація вала обумовлює зменшення провалу контактів до 30% і сил контактного натискання на (10-11)%, однак ці значення не є критичними та мало впливають на роботу викидача. Отримано значення сил, що діють на опори вала. Показано, що динамічні сили в опорах на (19-38)% більше, ніж статичні. Отримані значення зусиль дозволяють вибрати матеріал вала та підшипники. Бібл. 19, рис. 12.*

*Ключові слова:* вакуумні відмикачі, механічні напруги, деформація вала.

*В статье исследуются процессы, которые определяют механические напряжения в приводном валу вакуумного выключателя в статическом и динамическом режимах работы. Показано, что механическая деформация вала вызывает уменьшение провала контактов на величину до 30% и сил контактного нажатия на (10-11)%, эти значения не критичны и мало влияют на работу выключателя. Получены значения сил, действующих на опоры вала. Показано, что динамические усилия в опорах на (19-38)% больше статических. Полученные значения усилий позволяют выбрать материал вала и подшипники. Библ. 19, рис. 12.*

*Ключевые слова:* вакуумные выключатели, механические напряжения, деформация вала.

**Введение.** В последние 10 – 15 лет доминирующее положение на рынке выключателей средних напряжений заняли вакуумные выключатели, у которых в качестве привода используются бистабильные электромагнитные актуаторы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Лидером в этой области является концерн АВВ, первым представивший такой выключатель (VM1) в 1990 г. [1]. В Украине подобные выключатели производят компании ЗАО «Высоковольтный союз» и «АВМ АМПЕР» [2]. В выключателях ВВ-TEL («Таврида електрик» [3]) применяются электромагнитные актуаторы с низкокоэрцитивными постоянными магнитами. Вакуумные выключатели с электромагнитными актуаторами характеризуются простотой конструкции, высокой надежностью и в течение многих лет не требуют профилактического обслуживания.

На кафедре электрических аппаратов НТУ «ХПИ» уже более 10 лет ведутся работы, связанные с исследованиями, усовершенствованием и разработкой новых конфигураций вакуумных выключателей и контакторов средних напряжений [4 – 7]. Одним из направлений таких работ является исследование механических процессов в выключателях с вертикальным (относительно приводного модуля) полюсов с вакуумными прерывателями. Конструкция таких выключателей предусматривает передачу движения от актуатора к подвижным контактам через приводной вал (рис. 1) – актуатор через ось 3 приводит во вращение вал, оси 4 которого связаны с подвижными контактами через тяговые изоляторы.

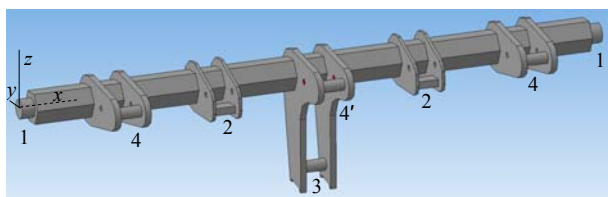


Рис. 1. Приводной вал выключателя, где 1 – оси крепления вала в подшипниках; 2 – плоскости приложения сил отключающих пружин; 3 – ось крепления тяги электромагнитного актуатора; 4, 4' – оси крепления тяг подвижных контактов в крайних и среднем полюсах;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – оси системы координат

**Постановка проблемы.** В процессе исследования работы привода выключателя на макетных образцах было установлено:

- на вал, который крепится в двух подшипниках без промежуточных опор, действуют значительные усилия, вследствие чего вал деформируется, а провал контактов и усилия их поджатия уменьшаются (относительно сил, рассчитанных для абсолютно жесткого вала);
- деформации вала носят сложный характер (изгиб и кручение), вследствие чего в подшипниках возникают не только радиальные, но и осевые силы;
- крутильные колебания вала, возникающие в динамических режимах, влияют на ход и поджатие контактов.

В связи с этим, был определен круг вопросов, ответы на которые приводят к пониманию направлений проектирования таких аппаратов, а именно: 1) является ли критичным уменьшения сил контактного нажатия вследствие деформации вала? 2) возможны ли отскоки контактов при колебаниях вала? 3) насколько критичны осевые усилия в подшипниках? 4) как изменяется ход и поджатие контактов по мере их износа?

**Задачи и цель.** Задачей работы было создание математической модели для расчета усилий и деформаций приводного вала в статическом и динамическом режимах с целью определения влияния этих параметров на работу вакуумного выключателя рассматриваемой конфигурации, что может послужить основой выработки рекомендаций к проектированию аппаратов подобного типа.

Несмотря на то, что в литературе расчет валов представлен достаточно обширно (в [8 – 11] приведены наиболее фундаментальные исследования), проблема заключается в том, что расчеты вала *такой конструкции* при таких условиях крепления (рис. 1) отсутствуют. Как показано в [12], расчеты сложных конструкций могут быть проведены только численными методами, поэтому все расчеты в данной работе проводились в пакете COMSOL методом конечных элементов.

Трехмерная модель вала (рис. 1) была создана в среде AutoCAD, а затем экспортирована в среду COMSOL.

### Расчет вала выключателя для принятой модели.

В качестве примера приведен расчет вала опытного образца вакуумного выключателя средних напряжений. Исходные данные: длина стального вала – 574 мм; форма сечения – шестигранная с диаметром вписанной окружности 32 мм); соотношение хода оси актуатора и осей тяговых изоляторов – 1,5; суммарная сила отключающих пружин (действующих на поверхности 2 рис. 1) – 1000 Н; суммарная сила начального поджатия контактных пружин, (приложенная к осям 4 рис. 1) – 6600 Н (по 2200 Н на полюс); ход оси 3 (рис. 1) актуатора после касания контактов – 6 мм; теоретический ход осей тяговых изоляторов после касания контактов (провал контактов при абсолютно жестком вале, оси 4 на рис. 1) – 3,92 мм, по дальней точке диаметра осей – 4,3 мм; жесткость контактной пружины – 280 кН/м; суммарная противодействующая сила контактных пружин при абсолютно жестком вале (приложенная к осям 4 рис. 1) в конечном положении вала – 9900 Н (по 3300 Н на полюс).

Допущения, принимаемые при расчете: опоры крепления вала жесткие; торцы вала упираются в недеформируемые подшипники; жесткость отключающих пружин не учитывается (на порядок меньше жесткости контактных пружин). Граничные условия: задано перемещение оси 3 в направлении минус  $y$  (рис. 1) в пределах 0 мм ... 6 мм; на плоскостях 2 (рис. 1) заданы удельные значения сил отключающих пружин; на осях 4 заданы удельные значения сил контактных пружин с учетом их поджатия; на поверхностях 1 и торцах вала заданы условия  $\Delta \cdot \vec{n} = 0$  (где  $\Delta$  – вектор перемещений,  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности). Последнее условие обеспечивает вращение вала вокруг его продольной оси  $x$  без трения и отсутствие осевого перемещения.

**Результаты расчета в статике.** Вследствие деформации вала (рис. 2) изменяются значения хода тяг контактов, а также силы контактного нажатия по сравнению с результатами расчетов при абсолютно жестком вале. Соответствующие расчетные зависимости показаны на рис. 3.

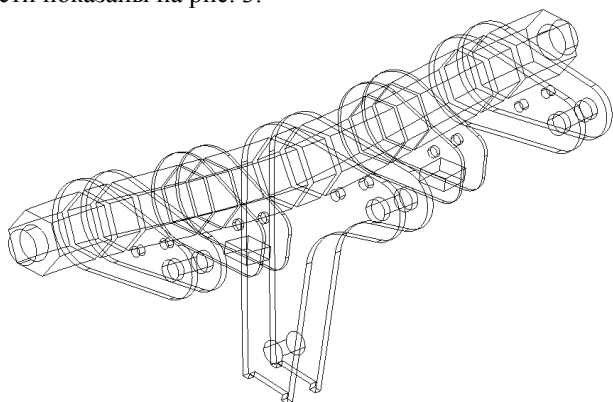


Рис. 2. Картина деформации вала при 20-кратном увеличении

Как следует из рис. 3,а, в конечном положении значение хода меньше, чем при абсолютно жестком вале на 1,05 мм для среднего полюса и на 1,3 мм для крайних полюсов. Такое уменьшение хода вызывает уменьшение сил контактного нажатия (рис. 3,б). В частности, начальное нажатие уменьшается по сравнению с нажатием для недеформируемого вала на 140 Н, конечное для крайнего полюса – на 340 Н, для среднего –

на 280 Н, что составляет 10% ... 11% от контактного нажатия и мало влияет на работу выключателя.

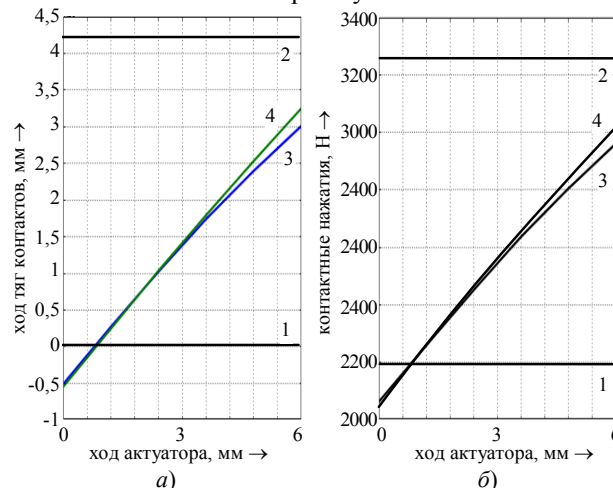


Рис. 3. Зависимости хода тяг контактов (а) и контактного нажатия (б) в функции хода актуатора: 1 – начальное значение для абсолютно жесткого вала (касание контактов); 2 – конечное значение при абсолютно жестком вале; 3 – расчетное значение в крайнем полюсе; 4 – расчетное значение в среднем полюсе

Одним из важных расчетных параметров являются значения сил, действующих на вал со стороны корпуса выключателя или силы, действующие на подшипники (приводятся конечные значения сил при максимальном ходе). В результате расчетов получены значения сил по координатам (рис. 1):  $R_x = 3428$  Н,  $R_y = 5275$  Н,  $R_z = 4969$  Н.

Продольная сила  $R_x$  возникает в результате упора торцов вала в подшипники и изгиба вала. При этом радиальная сила будет равна:

$$F_r = \sqrt{R_z^2 + R_y^2} = 7245 \text{ Н.} \quad (1)$$

Полученные значения позволяют оценить условия работы подшипников и выбрать их размеры. Расчетным нагрузкам соответствует, например, подшипник 6304-2RSH-SKF (Швеция) с размерами  $20 \times 52 \times 15$  с допустимыми усилиями: динамическим – 15,9 кН, и статическим – 7,8 кН. Считается, что допустимое осевое усилие достигает 70% от неиспользованной радиальной нагрузки. Следовательно, допустимая осевая нагрузка равна  $(15900 - 7245) \cdot 0,7 = 8655$  Н. Таким образом, и радиальная и осевая нагрузка меньше найденного допустимого значения.

**Результаты расчета в динамике.** Статический расчет не дает полной информации о напряжениях, перемещениях и действующих силах. Это связано со значительными силами, скоростями и движущимися массами в процессе работы выключателя. Поэтому необходимо учесть динамику работы выключателя.

**Учет масс тяговых изоляторов.** Массы подвижных тяговых изоляторов, прикрепленных к осям 4 (рис. 1), учитывались увеличением плотности материала осей по формуле:

$$m = \rho \cdot V, \quad (2)$$

где  $m$  – известная масса тягового изолятора равная 0,725 кг;  $\rho$  – искомая плотность материала;  $V$  – известный объем одной оси 4.

В рассматриваемом примере значение плотности получилось равным  $2,56 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup>.

Определение коэффициентов демпфирования. При анализе переходных процессов необходимо учитывать параметры демпфирования, которые определяют потери энергии в системе (затухание колебаний системы).

Демпфирование по Релею [13] предполагает способ учета параметров затухания в зависимости от массы движущихся тел и жесткости системы и подразумевает определение параметров диагональной матрицы жесткости или демпфирования:

$$C_i = \alpha(M) + \beta(K) \cdot \omega_i^2, \quad (3)$$

где  $C_i$  – матрица жесткости;  $\alpha(M)$  – коэффициент затухания, зависящий от массы  $M$  тела;  $\beta(K)$  – коэффициент затухания, зависящий от жесткости системы  $K$ ;  $\omega_i = 2 \cdot \pi \cdot f_i$  – круговая частота колебаний  $i$ -й моды;  $f_i$  – соответствующая частота  $i$ -й моды.

Жесткость  $i$ -й моды можно представить

$$C_i = 2 \cdot \xi_i \cdot \omega_i, \quad (4)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент вязкого демпфирования.

Если известны коэффициенты демпфирования для  $i$ -й и  $j$ -й моды, то коэффициенты  $\alpha(M)$  и  $\beta(K)$  определяются из выражения:

$$\frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \alpha(M) \\ \beta(K) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Для сталей известен фактор потерь  $\eta = 0,2$  [14]. Тогда приняв, что  $\xi_i = \xi_j$  и учитывая, что  $\xi = \eta / 2$ , получим

$$\xi_i = \xi_j = 0,1,$$

и соответствующие значения  $\alpha(M)$  и  $\beta(K)$ .

Расчеты частот собственных колебаний были проведены в специальном режиме программы COMSOL. На рис. 4 показаны формы вала для первой и второй моды (в увеличенном масштабе).

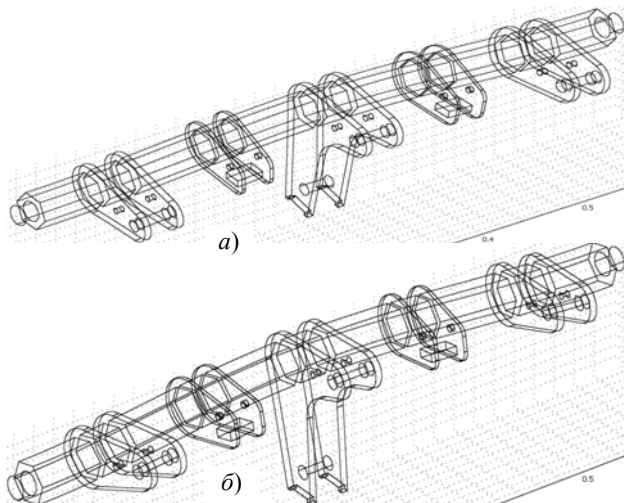


Рис. 4. Форма первой (а) и второй (б) моды колебаний вала

В результате расчетов были получены следующие значения частот:  $f_1 = 242,8$  Гц,  $f_2 = 338,0$  Гц.

Исходя из найденных частот с помощью (5) были найдены коэффициенты затухания колебаний вала:

$$\alpha = 177,6 \text{ с}^{-1}, \quad \beta = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Формирование уравнения движения тяги электромагнита и начальных условий. Для расчета динамики необходимо задать временную зависимость движения тяги актуатора в пределах провала контактов. Такие расчеты были проведены ранее на основании совместного решения уравнений электромагнитного поля, электрической цепи и уравнения движения [15–19]. С учетом расположения системы координат, аппроксимирующая временная зависимость хода актуатора будет иметь следующий вид:

$$S_y(t) = \begin{cases} -6 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(500 \cdot t) [м], & \text{если } t < \pi/1000 \\ -6 \cdot 10^{-3} [м], & \text{если } \pi/1000 \end{cases}. \quad (6)$$

За начало отсчета принято время замыкания контактов выключателя, после которого актуатор «выбирает» провал контактов.

Начальная скорость оси тяги актуатора (поз. 3, рис. 1):

$$V_0 = \frac{dS_y(0)}{dt} = -3 \text{ м/с} \quad (7)$$

Начальная скорость точек вала:

$$v_{0i} = \vec{\omega} \times \vec{r}_i. \quad (8)$$

В выражении (8) обозначено:

$$\vec{\omega} = \vec{e}_x \cdot \frac{V_0}{l}, \quad \vec{r}_i = \vec{e}_y \cdot y + \vec{e}_z \cdot z, \quad (9)$$

где  $l$  – расстояние от оси вращения вала до оси крепления тяги актуатора 3 (рис. 1);  $\vec{r}_i$  – расстояние от точек, принадлежащих валу до его продольной оси  $x$ .

Результаты расчета при исходных значениях силы и хода поджатия контактов. Графики временных зависимостей хода осей тяг контактов (поз. 4, рис. 1) приведены на рис. 5.

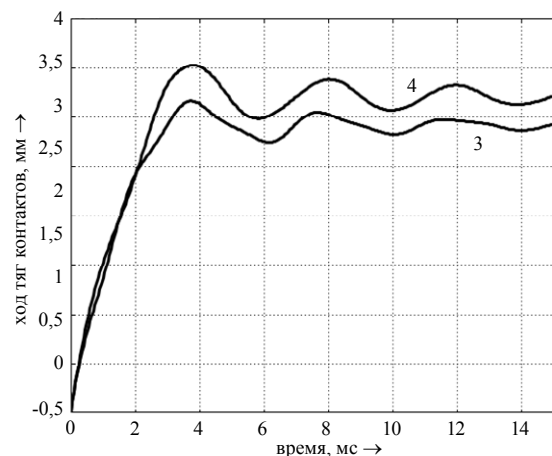


Рис. 5. Временные зависимости хода осей тяг контактов: 3 – расчетное значение хода в крайнем полюсе; 4 – расчетное значение хода в среднем полюсе

Из рис. 5 видно, что движение осей тяг контактов имеет колебательный характер, однако эти колебания не являются критичными, так как их размах относительно невелик (наибольшее значение составляет приблизительно 0,25 мм, что намного меньше хода поджатия – около 4 мм) и не приводят к размыканию контактов. Очевидно, что таким же колебаниям будут подвержены и силы контактного нажатия (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что конечные значения сил стремятся к своим значениям в статике – 2961 Н и 3016 Н,

а сила начального нажатия (в отличие от ситуации в статике) в момент замыкания контактов не уменьшается, что обусловлено инерционностью вала и прочих связанных с ним элементов конструкции.

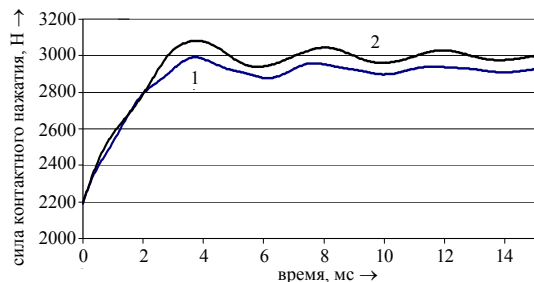


Рис. 6. Колебание силы контактного нажатия на крайнем (1) и среднем полюсе (2)

На рис. 7 показана суммарная сила контактного нажатия в зависимости от времени.

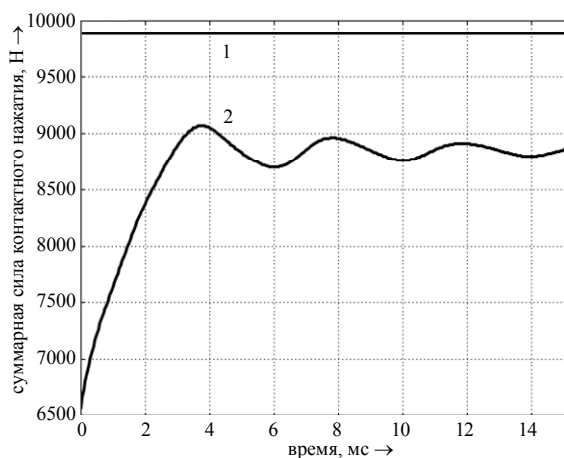


Рис. 7. Суммарная сила контактного нажатия при абсолютно жестком вале (1) и расчетная сила (2)

В конечном положении после окончания переходного процесса различие между нажатием при абсолютно жестком вале и расчетными значениями  $9893 - 8927 = 966$  Н, что составляет величину порядка 10% от теоретической и не является критичным.

Определенный интерес представляют динамические значения реакций подшипников (рис. 8).

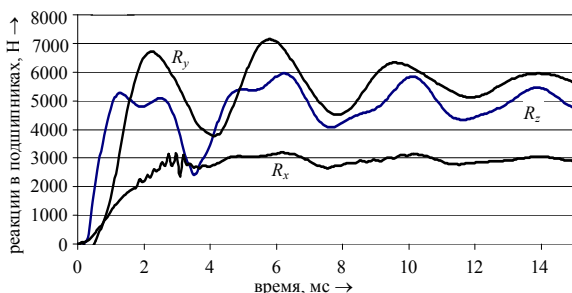


Рис. 8. Значение динамических реакций сил в подшипниках по осям координат

Как следует из рисунка, максимальные динамические реакции больше статических реакций по осям:  $x$  — в 1,38 раз;  $y$  — в 1,35 раз;  $z$  — в 1,19 раз. На рис. 9 показан график радиального динамического усилия.

Расчеты показывают, что осевое значение силы не превышает допустимого значения. На рис. 10 показана допустимая нагрузка на ось и осевая нагрузка

подшипника. Из рисунка следует, что осевая динамическая нагрузка не превышает допустимого значения.

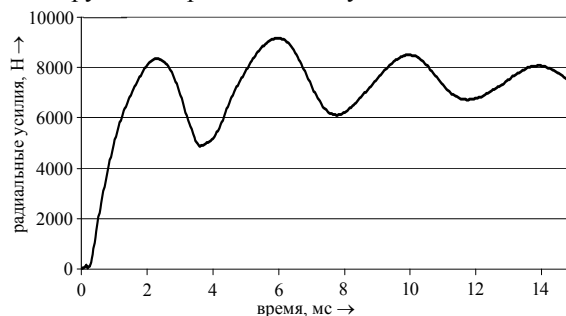


Рис. 9. Радиальные усилия в подшипнике

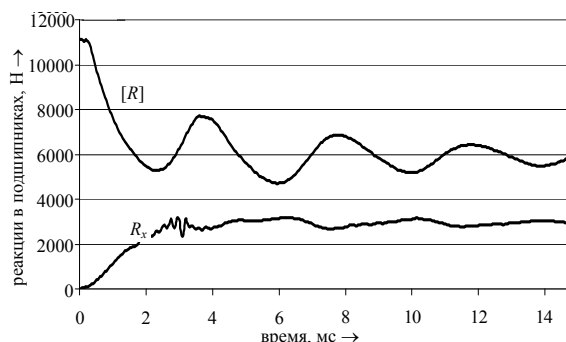


Рис. 10. Временные зависимости осевой  $R_x$  и допустимой осевой  $[R]$  нагрузки на подшипник

Результаты расчета в случае двукратного уменьшения хода поджатия контактов при их износе (максимальный износ контактов в процессе работы).

В процессе работы выключателя в результате износа контактов уменьшается значение провала контактов, что сказывается на работе выключателя. Данные расчета при уменьшении провала контактов в два раза (максимальный износ контактов) приведены ниже.

Конечное значение силы контактного нажатия уменьшится: на крайних полюсах с 2961 Н до 2545 Н; на среднем полюсе — с 3016 Н до 2550 Н по сравнению со значениями для новых контактов. Реакция подшипников при этом также изменится:  $R_x$  — с 2428 Н до 782 Н;  $R_y$  — с 5275 Н до 3164 Н;  $R_z$  — с 4969 Н до 4320 Н.

На рис. 11 приведены графики временных зависимостей хода осей тяг контактов (поз. 4 на рис. 1) при уменьшенном ходе поджатия.

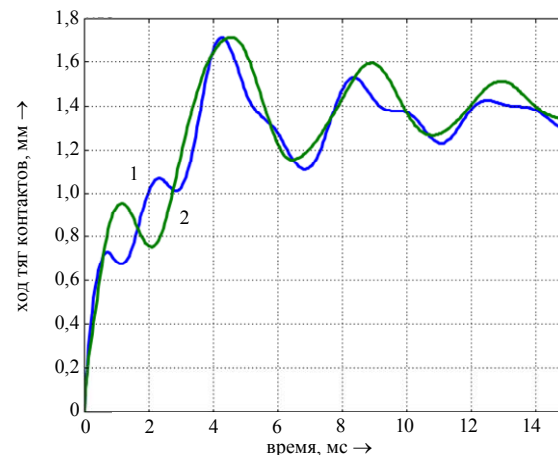


Рис. 11. Ход осей тяг контактов в функции времени: 1 — расчетное значение хода в крайнем полюсе; 2 — расчетное значение хода в среднем полюсе

Графики, приведенные на рис. 11, показывают, что износ контактов приводит к некоторому увеличению размаха колебаний хода осей тяг контактов – максимальное значение размаха увеличивается до 0,3 мм, что намного меньше даже уменьшенного вдвое хода поджатия – до 2 мм, поэтому размыкание контактов при этом не происходит.

На рис. 12 приведен расчетный график изменения в динамике силы контактного нажатия только на крайних полюсах выключателя (поскольку на среднем полюсе сила нажатия больше) при уменьшенном ходе поджатия. Как видим, сила контактного нажатия не опускается ниже критического значения – 2000 Н.

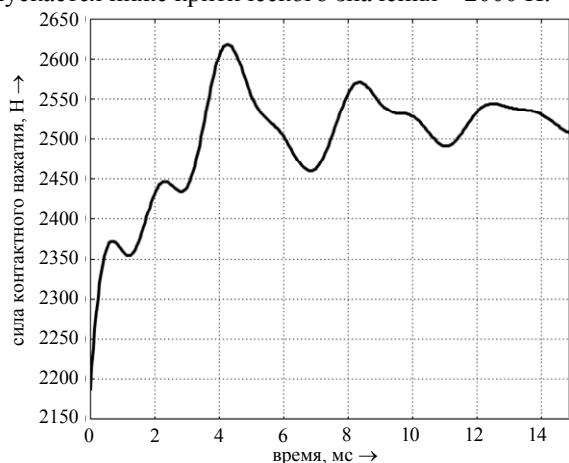


Рис. 12. Колебания силы контактного нажатия в крайних полюсах при уменьшенном вдвое ходе поджатия

С целью проверки принятого расчетного допущения о жесткости корпуса выключателя, был проведен расчет его деформаций в стационарном режиме с учетом действия на него соответствующих стационарных сил  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  при условии жесткого закрепления нижней поверхности. Ввиду симметрии конструкции, проводился расчет половины корпуса с соответствующим граничным условием на плоскости симметрии. Результаты расчета показывают, что максимальная деформация корпуса наблюдается на плоскости симметрии (середина) в его верхней части и равна  $7,2 \cdot 10^{-5}$  м, что на порядок меньше деформации вала.

#### Выводы

1. В процессе работы вал подвержен значительным деформациям, из-за которых, вследствие уменьшения хода поджатия, контактное нажатие уменьшается на 10 % ... 11 % по сравнению с расчетными значениями при условии недеформируемого вала. Такое уменьшение не является критичным и незначительно влияет на работу выключателя.

2. Колебания осей тяг контактов и сил контактного нажатия, с учетом деформаций вала в динамике, не приводят к отскокам контактов при включении.

3. Сложная деформация вала приводит к появлению осевых сил.

4. Динамические силы в подшипниках на 19% ... 38% больше статических, что необходимо учитывать при выборе подшипников.

5. По мере износа контактов уменьшается ход тяг контактов и контактное нажатие: при двукратном уменьшении хода поджатия – на 466 Н в среднем полюсе

и на 416 Н в крайних полюсах. Тем не менее, уменьшившаяся сила (приблизительно 2550 Н на полюс) обеспечивает нормальную работу выключателя.

6. В случае максимального износа контактов (уменьшение хода поджатия вдвое), динамические колебания системы не приводят к отскокам (вибрации) контактов.

7. Для уменьшения деформации вала необходимо чтобы торцовые поверхности вала упирались в подшипники, а подшипники должны жестко крепиться в корпусе, что увеличивает жесткость всей системы.

8. На основании проведенных расчетов в качестве материала для вала можно рекомендовать сталь 30 закаленную, с  $\sigma_b = 11 \cdot 10^8$  Н / м<sup>2</sup> или другую сталь с аналогичными характеристиками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [https://library.e.abb.com/public/5800cc5773e0b321c12575d0004d7342/LE\\_VM1\(EN\)B\\_1VCP000185-0904x.pdf](https://library.e.abb.com/public/5800cc5773e0b321c12575d0004d7342/LE_VM1(EN)B_1VCP000185-0904x.pdf). VM1. Medium voltage vacuum circuit-breaker with magnetic actuator.
- [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/Natural/eie/2011\\_3/22.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/Natural/eie/2011_3/22.pdf) / Модернизированный вакуумный выключатель с электромагнитным актуатором.
- <http://www.tavrida.com/ter/solutions/VCB/> Вакуумные выключатели 6-20 кВ.
- Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – №42. – С. 73-80.
- Клименко Б.В., Гречко А.М., Бугайчук В.М. Опытный образец двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – №2. – С. 23-28. doi: 10.20998/2074-272X.2005.2.06.
- Клименко Б.В., Гречко А.М., Бугайчук В.М., Выронец С.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – №4. – С. 22-26. doi: 10.20998/2074-272X.2006.4.03.
- Клименко Б.В., Гречко А.М., Ересько А.В. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 40-43. doi: 10.20998/2074-272X.2007.6.08.
- Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 639 с.
- Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов: справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 151 с.
- Расчеты на прочность в машиностроении. Т.3 / Под ред. С.Д. Пономарева. – М.: Машгиз, 1959. – 1118 с.
- Серенсен С.В. Валы и оси. Конструирование и расчет / М.Б. Громан, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
- Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 541 с.
- [http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c\\_rayleigh\\_damping.htm](http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c_rayleigh_damping.htm).
- <https://syont.files.wordpress.com/2007/05/damping-properties-of-materials.pdf>.
- Байда Е.И. Расчет переходных процессов в электромагнитном механизме на основании уравнений электромагнитного поля // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – №5. – С. 39-43. doi: 10.20998/2074-272X.2008.5.09.
- Байда Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защелкой // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – №2. – С. 3-5. doi: 10.20998/2074-272X.2010.2.01.
- Байда Е.И. Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой // Елек-



тротехніка і електромеханіка. – 2010. – №4. – С. 10-12. doi: 10.20998/2074-272X.2010.4.02.

18. Байда Е.И. Влияние добавочного сопротивления на время трогания двухпозиционного электромагнита с магнитной защелкой вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – №4. – С. 13-15. doi: 10.20998/2074-272X.2011.4.03.

19. Байда Е.И. Математическая модель расчета динамики двухпозиционных электромагнитных актуаторов вакуумных выключателей среднего напряжения // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2013. – №1. – С. 136-141.

#### REFERENCES

1. VM1. Medium voltage vacuum circuit-breaker with magnetic actuator Available at: [https://library.e.abb.com/public/5800cc5773e0b321c12575d0004d7342/LE\\_VM1\(EN\)B\\_1VCP000185-0904x.pdf](https://library.e.abb.com/public/5800cc5773e0b321c12575d0004d7342/LE_VM1(EN)B_1VCP000185-0904x.pdf) (accessed 03 October 2016).

2. *Modernizirovanniyi vakuumnyi vykliuchatel' s elektromagnitnym aktuatomom* (Modernized vacuum pole breaker with magnetic actuator). Available at: [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/Natural/eie/2011\\_3/22.pdf/](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/Natural/eie/2011_3/22.pdf/) (accessed 11 December 2014). (Rus).

3. *Vakuumnye vykliuchateli 6-20 kV* (Vacuum circuit-breakers 6-20 kV). Available at: <http://www.tavrida.com/ter/solutions/VCB/> (accessed 09 October 2016). (Rus).

4. Klymenko B.V., Bugaychuk V.M., Grechko A.M. Electromagnetic actuators for MV vacuum circuit-breakers. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2004, no.42, pp. 73-80. (Rus).

5. Klymenko B.V., Grechko A.M., Bugaychuk V.M. Prototype two-position solenoid actuator for MV vacuum circuit-breaker. *Electrical engineering & electromechanics*, 2005, no.2, pp. 23-28. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2005.2.06.

6. Klymenko B.V., Grechko A.M., Bugaychuk V.M., Vyrovets S.V. A fast electromagnetic drive for an average-voltage vacuum switch with ousting of magnetic field. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.4, pp. 22-26. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2006.4.03.

7. Klymenko B.V., Grechko A.M., Eres'ko A.V. An electromagnetic drive with a twoposition magnetic catch for medium-voltage vacuum circuit breakers. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 40-43. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2007.6.08.

8. Birger I.A. *Raschet na prochnost' detalei mashin* [Calculation of the strength of machine parts]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1993. 639 p. (Rus).

9. Maslov G.S. *Raschety kolebanii valov: spravochnik* [Calculations shaft vibrations: Handbook] Moscow. Mashinostroenie Publ., 1980. 151 p. (Rus).

10. Ponomarev S.D. *Raschety na prochnost' v mashinostroenii. T.3* [Calculations of strength in mechanical engineering. Vol.3]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959. 1118 p. (Rus).

11. Groman M.B., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. *Valy i osi. Konstruirovaniye i raschet* [Shafts and axis. Design and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 320 p. (Rus).

12. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [FEM in the techniques]. Moscow, Mir Publ., 1975. 541 p. (Rus).

13. Available at: [http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c\\_ra\\_vleigh\\_damping.htm](http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c_ra_vleigh_damping.htm) (accessed 05 November 2016).

14. Available at: <https://syont.files.wordpress.com/2007/05/damping-properties-of-materials.pdf> (accessed 02 November 2016).

15. Baida E.I. Electromagnetic equations based calculation of transients in an electromechanical mechanism. *Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.5, pp. 39-43. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2008.5.09.

16. Baida E.I. Modeling of dynamic characteristics of DC electromagnetic mechanisms with a magnetic latch. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.2, pp. 3-5. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2010.2.01.

17. Baida E.I. Calculation of dynamics twoposition electromagnet of direct-current with magnetic catch. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.4, pp. 10-12. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2010.4.02.

18. Baida E.I. Influence of additional resistance on pre-start time of two-position electromagnetic drive with magnetic latch for MV vacuum circuit-breaker. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.4, pp. 13-15. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2011.4.03.

19. Baida E.I. A mathematical model for calculating the dynamics of two-position electromagnetic actuator vacuum circuit breakers medium voltage. *Journal of scientific publications graduate and doctoral students*, 2013, no.1, pp. 136-141. (Rus).

Поступила (received) 30.11.2016

Байда Евгений Иванович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Клименко Борис Владимирович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 096 1877707, +38 050 6534982,  
e-mail: baida.kpi@gmail.com, b.v.klymenko@gmail.com

E.I. Baida<sup>1</sup>, B.V. Klymenko<sup>1</sup>

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

#### Investigation of mechanical stresses in the drive shaft of MV vacuum circuit breaker.

**Introduction.** In the last 10-15 years a dominant position in the market of medium voltage circuit breakers, vacuum circuit breakers have taken in which as an actuator mono- or bistable actuators with permanent magnets are used. Such circuit breakers are characterized by simplicity of design, high reliability, require preventive maintenance for many years. Development, research and improvement of vacuum circuit breakers are carried out at the Department for Electrical Apparatus, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». While working on the circuit breakers, developers have to deal with two related objectives – electrical and mechanical. This paper considers the solution of one of these problems – calculation of mechanical forces in the drive shaft of the vacuum circuit breaker in static and dynamic modes. This work was preceded by the failure of the results of measurements of the prototype circuit breakers' contacts. Measurements have shown that these values do not match the expected values (there were less than the value of 0.8 to 1 mm). The assumption about the reasons for this discrepancy needed to be detailed checked. The results of the work done are presented in this paper. **Purpose.** Investigation of static and dynamic mechanical stresses and strains in the drive shaft of the vacuum circuit breaker mechanism to determine its characteristics and material selection. **Methods.** The investigation of mechanical processes is performed by the finite element method in the COMSOL software package. **Results.** We obtain the static and dynamic characteristics of the circuit breaker drive shaft: deformations, reaction forces, stresses. These characteristics made it possible to determine the actual course of the contacts, select shaft material and calculate the forces acting on the bearings. **Conclusions.** It is shown that the contact velocity and contact pressure are different from the theoretical value due to the deformation of the shaft. The forces acting on the thrust bearings dynamically are by 16-39% higher than the static ones. It is assumed that further refinement of the mathematical model takes into account the traction insulators and housing, as well as dynamics of the circuit breaker. References 19, figures 12.

**Key words:** vacuum circuit breakers, mechanical calculations, shaft deformation.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*Проведено експериментальне дослідження впливу просторового розташування датчиків магнітного поля на ефективність замкненої системи активного екранування магнітного поля ліній електропередачі на розробленому макеті трифазної одноланцюгової повітряної лінії електропередачі, яка створює обертове поле з найбільш складною просторово-часовою структурою. Експериментально показано, що найбільшу ефективність має замкнена система активного екранування магнітного поля, у якій датчики магнітного поля просторово розташовані в розрахункових точках, отриманих при синтезі системи, в яких значення відповідних компонент вектора магнітної індукції приймають мінімальні значення. Бібл. 14, рис. 6.*

*Ключові слова:* магнітне поле промислової частоти, макет повітряної лінії електропередачі, макет системи активного екранування, експериментальні дослідження.

*Проведено експериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи на разработанном макете трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи, создающей вращающееся поле с наиболее сложной пространственно-временной структурой. Экспериментально показано, что наибольшую эффективность имеет замкнутая система активного экранирования магнитного поля, у которой датчики магнитного поля пространственно расположены в расчетных точках, полученных при синтезе системы, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальное значение. Библ. 14, рис. 6.*

*Ключевые слова:* магнитное поле промышленной частоты, макет воздушной линии электропередачи, макет системы активного экранирования, экспериментальные исследования.

**Введение.** Министерством топлива и энергетики Украины [1] в 2014 году введены нормативные уровни магнитного поля (МП) с частотой 50 Гц. Многие жилые здания и сооружения расположены в непосредственной близости от воздушных линий электропередачи так, что уровень индукции магнитного поля внутри них превышает эти нормы. Применение систем активного экранирования позволяет снизить уровни магнитного поля до нормативных значений и продолжить эксплуатацию таких зданий.

**Анализ существующих систем активного экранирования.** В системах активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты [2-10] в качестве исполнительного органа используют специальные обмотки – активные кабели, количество которых определяется спецификой решаемой задачи. Система активного экранирования может содержать одну, две, три, шесть, двадцать четыре и более обмоток. Для управления этими обмотками применяют различное количество измерителей индукции магнитного поля – магнитометров: один, два, три, шесть, двадцать четыре и более. Количество магнитометров, обычно, равно количеству управляемых обмоток, либо количеству пар обмоток. В частности, при шести обмотках типа колец Гельмгольца могут использоваться три магнитометра, расположенные в центре области экранирования магнитного поля [10], либо шесть магнитометров, расположенных в соответствующих плоскостях, и ориентированные ортогонально относительно управляемых обмоток.

При синтезе замкнутых систем активного экранирования магнитного поля линий электропередачи важным вопросом является определение положения

датчиков магнитного поля, при котором эффективность системы имеет наибольшее значение. Обычно замкнутая система настраивается таким образом, чтобы с помощью заданных обмоток магнитных исполнительных органов минимизировать уровень индукции магнитного поля в точках установки датчиков магнитного поля. Один из подходов к определению такого положения датчиков магнитного поля основан на решении задачи синтеза системы активного экранирования магнитного поля, с помощью которой обеспечивается наибольшая эффективность системы активного экранирования магнитного поля. Синтез системы активного экранирования сводится к решению задачи многокритериального нелинейного программирования с ограничениями, в которой вычисления целевых функций и ограничений выполняются на основании закона Био – Савара – Лапласа [11, 12]. Задача решается методом стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц [13, 14], что позволяет существенно сократить время ее решения. Расчетное расположение датчиков магнитного поля в заданном пространстве определяется точками, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальные значения.

**Целью работы** является экспериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи на разработанном макете трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи, создающей вращающееся поле с наиболее сложной пространственно-временной структурой.

**Схема макета ЛЭП**, управляющих обмоток, а также области пространства, в котором необходимо экранировать магнитное поле, показаны на рис. 1. Система активного экранирования содержит две компенсационные обмотки, формирующие компенсирующее магнитное поле при протекании по ним токов, создаваемых системой управления (СУ) в функции сигналов обратной связи по магнитному полю, формируемому датчиками магнитного поля (ДП), установленными в защищаемом пространстве. СУ получает питание от вторичного источника питания.

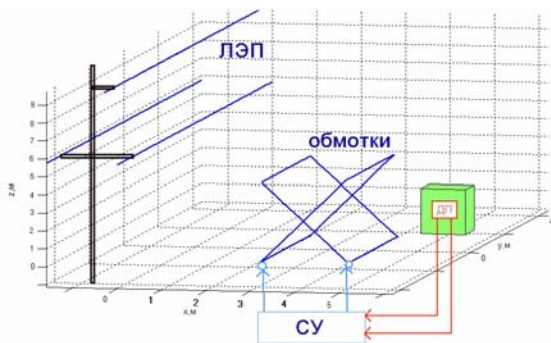


Рис. 1. Схема макета системы активного экранирования

Координаты пространственного расположения и геометрические размеры компенсационных обмоток, а также параметры регуляторов САЭ определены на основании разработанного в [11] метода синтеза САЭ МП в ходе решения многокритериальной задачи оптимизации. На рис. 2 показаны линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования.

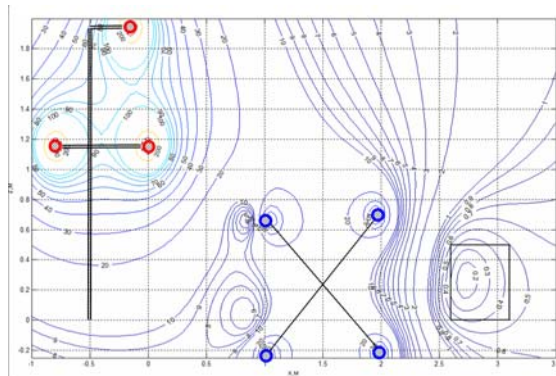


Рис. 2. Линии равного уровня индукции магнитного поля с включенной системой активного экранирования

Заметим, что необходимость использования двух компенсирующих обмоток обусловлена тем, что трехфазная одноцепная линия электропередачи создает практически круговое магнитное поле. На рис. 3,а в качестве примера показан годограф, образованный вектором индукции исходного магнитного поля, создаваемого этой линией электропередачи. Поэтому для компенсации такого исходного магнитного поля необходимо иметь, по меньшей мере, две компенсационные обмотки для создания кругового магнитного поля.

На рис. 3,б показан годограф, образованный вектором индукции магнитного поля, создаваемого двумя компенсационными обмотками. Как видно из этого рисунка, с помощью компенсационных обмоток соз-

дается магнитное поле, достаточно близкое к исходному магнитному полю, создаваемому ЛЭП.

На рис. 3,в показан годограф, образованный вектором индукции суммарного магнитного поля, создаваемого ЛЭП и компенсационными обмотками при работе системы активного экранирования. Как видно из этого рисунка, годограф, образованный вектором индукции оставшегося после работы системы активного экранирования магнитного поля имеет на порядок меньший модуль по сравнению с исходным магнитным полем.

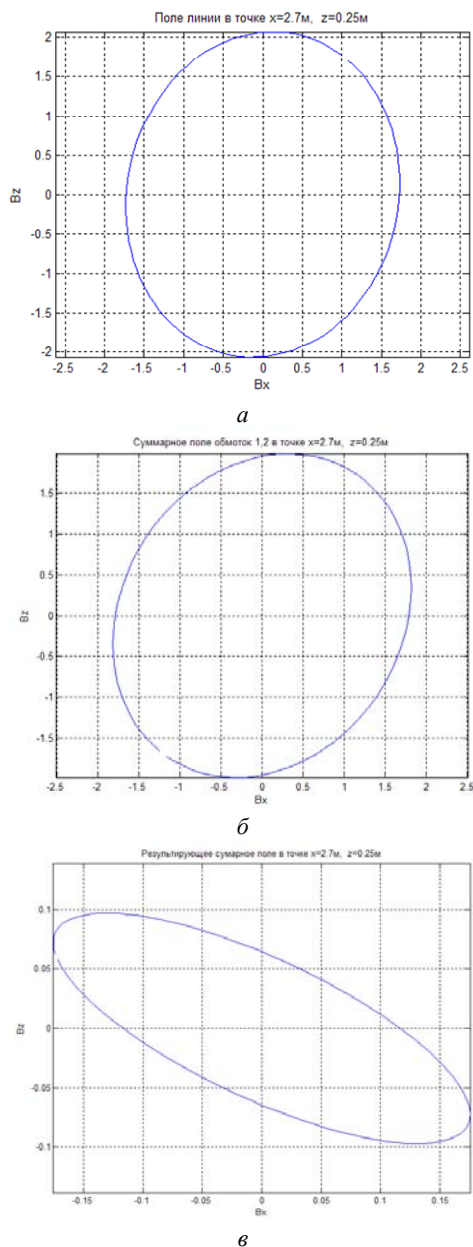


Рис. 3. Годографы векторов индукции магнитного поля: а) исходного, создаваемого ЛЭП; б) компенсирующих обмоток; в) суммарного, создаваемого ЛЭП и включенной системой

**Макет ЛЭП и системы активного экранирования.** Для проведения экспериментальных исследований разработан макет ЛЭП и системы активного экранирования. На рис. 4,а показан внешний вид макета ЛЭП, а на рис. 4,б показан внешний вид макета системы компенсации. На этом рисунке показаны компенсационные обмотки и датчики магнитного поля.



*a*



*б*

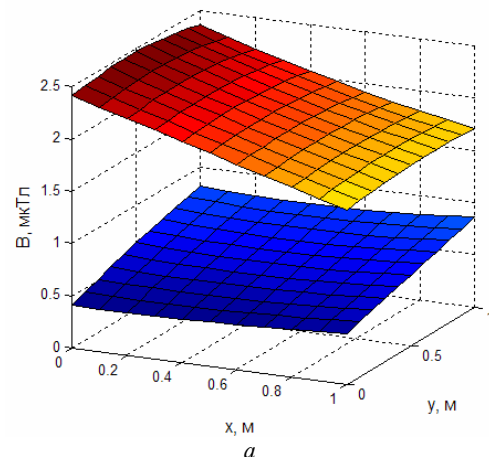
Рис. 4. Внешний вид макета:  
*a)* ЛЭП; *б)* системы компенсации

На этих макетах были проведены предварительные экспериментальные исследования по проверке адекватности используемых математических моделей магнитного поля на основе закона Био – Савара – Лапласа [11, 12] реальным процессам, происходящим в макетах ЛЭП и компенсационных обмотках системы активного экранирования. Как показали экспериментальные исследования макетов ЛЭП и компенсационных обмоток при различных токах и в различных режимах работы, отклонения экспериментальных значений магнитной индукции, создаваемых макетом ЛЭП и компенсационными обмотками от расчетных, выполненных по методике [11], не превышают 7 %.

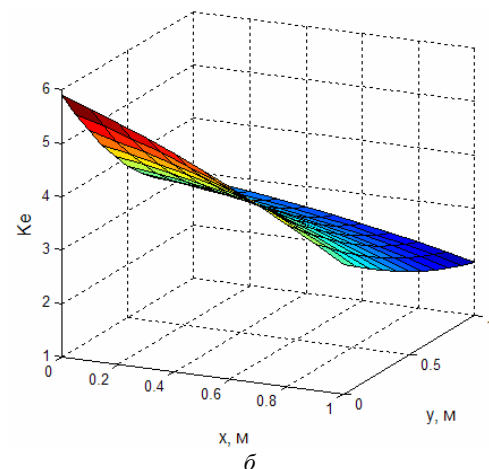
**Результаты экспериментальных исследований.** Рассмотрим теперь экспериментальные исследования системы активного экранирования. В системе имеются два независимых датчика магнитного поля, с помощью которых замыкаются каналы управления токами компенсационных обмоток. Вначале рассмотрим экспериментальные исследования системы активного экранирования, когда датчики магнитного поля расположены в расчетных точках рассматриваемого пространства, в которых необходимо экранировать магнитное поле. Эти расчетные точки соответствуют точкам, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальные значения. Для определения этих точек вначале решается задача синтеза системы активного экранирования. Исходными параметрами для синтеза

системы выступают параметры линии электропередачи – рабочие токи, геометрия и количество проводов, расположение линии электропередачи относительно защищаемого пространства, а также размеры защищаемого пространства и нормативное значение индукции магнитного поля, которое должно быть достигнуто в результате экранирования. Результатом синтеза системы является количество, конфигурация, пространственное расположение, схема подключения, токи компенсационных обмоток, а также результирующее значение индукции магнитного поля в точках защищаемого пространства, а также параметры регуляторов системы управления. На основании полученного в ходе синтеза системы распределения результирующего магнитного поля в рассматриваемом пространстве находятся точки, в которых значения соответствующих компонент вектора магнитной индукции принимают минимальные значения.

На рис. 5,*a* показаны поверхности распределения индукции исходного магнитного поля линии электропередачи в среднем сечении рассматриваемого пространства и поверхности распределения индукции магнитного поля с включенной системой, а на рис. 5,*б* показана поверхность уровня компенсации индукции магнитного поля такой системы относительно исходного уровня индукции магнитного поля линии электропередачи.



*a*



*б*

Рис. 5. Поверхности распределения: *a)* индукций исходного магнитного поля линии электропередачи и магнитного поля с включенной системой; *б)* уровня компенсации индукции магнитного поля с помощью системы

Таким образом, при работе системы активного экранирования уровень индукции магнитного поля в рассматриваемой области практически остается постоянным и не превосходит 0,5 мкТл, а уровень компенсации магнитного поля составляет более 5 мкТл.

Заметим, что отклонения экспериментальных значений магнитной индукции макета с включенной системой активного экранирования от расчетных, полученных в [11], не превышают 10 %. Причем, эти отклонения, в основном, обусловлены неточной установкой магнитометра, а также погрешностью работы регуляторов разомкнутого и замкнутого каналов управления.

На рис. 6 показаны те же поверхности распределения, что и на рис. 5 при размещении датчиков магнитного поля в центральной части области экранирования. При таком размещении датчиков система имеет наибольшую эффективность экранирования в центральной части пространства экранирования – именно там, где расположены датчики магнитного поля. Однако, при таком расположении датчиков система активного экранирования имеет более высокий остаточный уровень магнитной индукции практически во всей области, где необходимо экранировать магнитное поле.

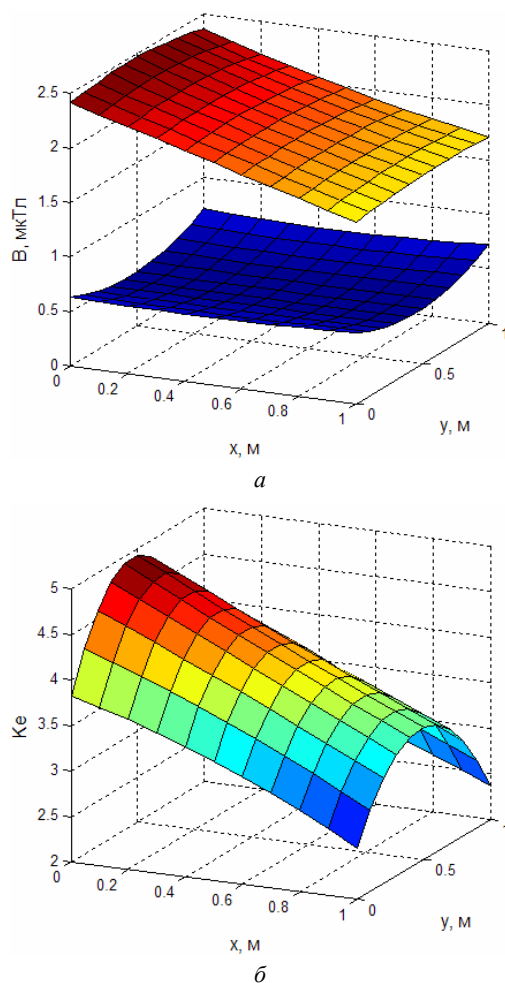


Рис. 6. Поверхности распределения: а) индукций исходного магнитного поля линии электропередачи и магнитного поля с включенной системой; б) уровня компенсации индукции магнитного поля с помощью системы при размещении датчиков поля в центральной части области экранирования

**Выводы.** Таким образом, экспериментально установлено, что изменение положения датчиков магнитного поля относительно их расчетного положения приводит к снижению эффективности экранирования системы. Оптимальным положением датчиков магнитного поля являются точки, в которых уровни проекций вектора магнитной индукции, ортогональные плоскостям компенсирующих обмоток, имеют минимальные значения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
2. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>.
3. Beltran H., Fuster V., Garcia 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.
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. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu -metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications) // Measurement Science and Technology. – 1991. – Vol. 2(7). – pp. 596-601. doi: 10.1088/0957-0233/2/7/004.
6. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield // Neurology and Clinical Neurophysiology. – 2004. – Vol. 40. – pp. 1-4.
7. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction // Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis (USA). – 2002. – Vol.1. – pp. 222-226. doi: 10.1109/isemc.2002.1032478.
8. 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.
9. 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.
10. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation // IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials. – 2005. – Vol. 125. – Issue 2. – pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.
11. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 11-13.
12. Nikolova N.K., Bakr M.H. Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3 // Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. – 96 p.
13. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.
14. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.

#### REFERENCES

1. *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).

2. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). Available at: <http://www.emfservices.com/afcs.html> (accessed 10 September 2012).
3. Beltran H., Fuster V., Garcia M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingenieria Eléctrica (9 CHLIE)*, Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84-99.
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. Ter Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu -metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications). *Measurement Science and Technology*, 1991, Vol.2(7), pp. 596-601. doi: 10.1088/0957-0233/2/7/004.
6. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. *Neurology and Clinical Neurophysiology*, 2004, Vol. 40, pp. 1-4.
7. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *Conference Paper of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Minneapolis (USA), 2002, Vol.1, pp. 222-226. doi: 10.1109/isemc.2002.1032478.
8. 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.
9. 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.
10. Kazuo Kato, Keita Yamazaki, Tomoya Sato, Akira Haga, Takashi Okitsu, Kazuhiro Muramatsu, Tomoaki Ueda, Masahito Yoshizawa. Shielding effect of panel type active magnetic compensation. *IEEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 2005, Vol. 125, Issue 2, pp. 99-106. doi: 10.1541/ieejfms.125.99.
11. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu. Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).
12. Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3*. Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012. 96 p.
13. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. London, ISTE Ltd., 2006. 244 p. doi: 10.1002/9780470612163.
14. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. Springer, 2011. 318 p. doi: 10.1007/978-3-642-18041-5.

Поступила (received) 15.09.2016

Кузнецов Борис Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Никитина Татьяна Борисовна<sup>2</sup>, д.т.н., проф.,  
 Волошко Александр Валерьевич<sup>1</sup>, к.т.н., н.с.,  
 Бовдуй Игорь Валентинович<sup>1</sup>, к.т.н., н.с.,  
 Виниченко Елена Владимировна<sup>1</sup>, к.т.н., м.н.с.,  
 Кобылянский Борис Борисович<sup>1</sup>, к.т.н. доц.

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: tatjana5555@gmail.com

B.I. Kuznetsov<sup>1</sup>, T.B. Nikitina<sup>2</sup>, A.V. Voloshko<sup>1</sup>, I.V. Bovdyj<sup>1</sup>, E.V. Vinichenko<sup>1</sup>, B.B. Kobilyanskiy<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

**Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line.**

**Purpose.** Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop active screening system by magnetic field of high voltage power lines developed a three-phase single-circuit high voltage power lines, creating a rotating magnetic field with the most complex space-time structure. **Methodology.** Optimal spatial arrangement of the magnetic field sensors is determined by solving the active magnetic field screening system synthesis problems with which the system provides the greatest efficiency of the active magnetic field shielding. Synthesis of active screening system is reduced to the problem of multi-criteria nonlinear programming with constraints in which calculation of the objective functions and constraints are carried out on the basis of Biot-Savart-Laplace law. The problem is solved by a stochastic multi-agent optimization by multiswarm of particles which can significantly reduce the time to solve it. Calculated arrangement of magnetic field sensors in a given space defined by the points at which the values of the corresponding components of the vector of magnetic induction take minimal values. **Results.** For the first time experimentally that changes in the position of the magnetic field sensors relative to their calculated position reduces the effectiveness of screening. The optimum position of the magnetic field sensors are the points at which the levels of the magnetic induction vector of projections orthogonal to the planes of the compensating coils are minimum values. **Originality.** For the first time invited to place sensors closed loop active screening system by magnetic field of high voltage power lines at the points where the calculated levels of corresponding projections of the magnetic induction vector orthogonal planes compensating windings are minimum values. **Practical value.** Practical recommendations for evidence-based selection of the spatial arrangement of the magnetic field sensors in a given area to ensure maximum efficiency of the active magnetic field screening system. References 14. figures 6.

**Key words:** power frequency magnetic field, high voltage power lines model, active screening system model, experimental research.

Н.Я. Хлопенко, И.Н. Хлопенко

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ РОТОРА

*Мета.* Метою роботи є структурний синтез стабілізуючого робастного регулятора поточосцеплення ротора системи векторного керування асинхронного електропривода. *Методологія.* Синтез структури регулятора проводився в два етапи. На першому етапі будувалася математична модель каналу поточосцеплення ротора з параметричною невизначеністю і розраховувалася передавальна функція  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора за методом мішаної чутливості. На другому етапі виконувалось розвинення знайденої передавальної функції в ланцюгову дріб за алгоритмом Евкліда. Ця дріб використовувалась для побудови структурної схеми регулятора. *Результати.* Проведено комп'ютерне моделювання передавальної функції  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора. Виконано розвинення знайденої передавальної функції в ланцюгову дріб. Побудована структурна схема  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора з інтегральних і пропорційних ланок та декількох суматорів. Отримані криві перехідних процесів поточосцеплення ротора в пакетах Robust Control Toolbox та Simulink. Вони збігаються на сталому режимі, а на перехідному децю відрізняються між собою. *Новизна.* Побудовано математичну модель каналу поточосцеплення ротора з параметричною невизначеністю. Розроблено методіку структурного синтезу робастного регулятора системи керування поточосцепленням, яка забезпечує знаходження оптимальної передавальної функції регулятора з параметричною невизначеністю у вигляді структури, яка містить інтегральні і пропорційні ланки та суматори. *Практична значимість.* Отримана структура регулятора дає можливість проводити модернізацію систем керування електроприводів, що знаходяться в експлуатації, з мінімальними фінансовими витратами. Бібл. 10, рис. 6.

*Ключові слова:* електропривод, векторне керування, канал поточосцеплення, структура  $H_{\infty}$ -оптимального регулятора.

*Цель.* Целью работы является структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора поточосцепления ротора системы векторного управления асинхронного электропривода. *Методология.* Синтез структуры регулятора проводился в два этапа. На первом этапе строилась математическая модель канала поточосцепления ротора с параметрической неопределенностью и рассчитывалась передаточная функция  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора по методу смешанной чувствительности. На втором этапе выполнялось разложение найденной передаточной функции в цепную дробь по алгоритму Евклида. Эта дробь использовалась для построения структурной схемы регулятора. *Результаты.* Проведено компьютерное моделирование передаточной функции  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора. Выполнено разложение найденной передаточной функции в цепную дробь. Построена структурная схема  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора с интегрирующими и пропорциональными звеньями и нескольких сумматоров. Получены кривые переходных процессов поточосцепления ротора в пакетах Robust Control Toolbox и Simulink. Они совпадают на установившемся режиме, а на переходном несколько отличаются между собой. *Новизна.* Построена математическая модель канала поточосцепления ротора с параметрической неопределенностью. Разработана методика структурного синтеза робастного регулятора системы управления поточосцеплением, которая обеспечивает нахождение оптимальной передаточной функции регулятора с параметрической неопределенностью в виде структуры, содержащей интегрирующие и пропорциональные звенья и сумматоры. *Практическое значение.* Полученная структура регулятора дает возможность проводить модернизацию систем управления электроприводов, находящихся в эксплуатации, с минимальными финансовыми затратами. Библ. 10, рис. 6.

*Ключевые слова:* электропривод, векторное управление, канал поточосцепления, структура  $H_{\infty}$ -оптимального регулятора.

**Введение.** Ужесточение требований к качеству функционирования систем векторного управления асинхронных электроприводов в условиях неопределенности приводит к необходимости стабилизации поточосцепления ротора. При этом существенное значение имеет задача структурного синтеза стабилизирующего робастного регулятора. Однако такой регулятор обычно имеет высокий порядок, что затрудняет его использование в системах векторного управления. Декомпозиция робастного регулятора на простейшие звенья позволяет избавиться от этого недостатка. Ее суть состоит в представлении регулятора в виде структуры, состоящей из типовых звеньев. Для создания регулятора из таких звеньев существует элементная база. Реализация регулятора на основе этой базы позволяет стабилизировать поточосцепление ротора, а также провести модернизацию систем управления, находящихся в эксплуатации, с небольшими финансовыми затратами.

Вопросами стабилизации параметров систем векторного управления с неопределенностями занимают-

ся многие ученые [1-6]. Ими построены математические модели и синтезированы робастные регуляторы для многих видов систем.

**Целью работы** является структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора поточосцепления ротора системы векторного управления асинхронного электропривода.

Теоретической основой для структурного синтеза регулятора служили  $H_{\infty}$ -теория робастного управления [7] и теория цепных дробей [8]. Расчеты проводились с привлечением пакетов расширения MATLAB-7 [9]. Проведенные исследования обсуждались на VII Международной научно-технической конференции «Інновації в судобудуванні та океанотехніці» (Украина, г. Николаев, 2016).

**Методы и результаты исследований.** На рис. 1 представлена структурная схема канала поточосцепления ротора в пространстве сигналов «вход-выход» [10], включающая в себя передаточные функции преобразователя частоты и обмоток статора 1 и ротора 2

© Н.Я. Хлопенко, И.Н. Хлопенко

асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

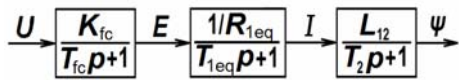


Рис. 1. Структурная схема канала потокосцепления ротора

В этой схеме за неопределенные параметры, наиболее чувствительные к изменениям модели объекта, были выбраны коэффициент усиления преобразователя частоты  $K_{fc}$ , эквивалентное активное  $R_{1eq}$  и активное  $R_2$  сопротивление, индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$  и взаимная индуктивность  $L_{12}$  обмоток статора 1 и ротора 2, причем  $R_{1eq} = R_1 + (k_2)^2 R_2$  ( $R_1$  – активное сопротивление);  $k_2 = L_{12}/L_2$ .

Перейдем от структурной схемы к уравнениям состояния в нормальной операторной форме:

$$\begin{aligned} pE &= -\frac{1}{T_{fc}} E + \frac{K_{fc}}{T_{fc}} U; \\ pI &= -\frac{1}{T_{1eq}} I + \frac{1}{R_{1eq} T_{1eq}} E; \\ p\Psi &= -\frac{1}{T_2} \Psi + \frac{L_{12}}{T_2} I, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p$  – оператор Лапласа;  $E$  – ЭДС преобразователя частоты;  $U$  – управляющее воздействие (проекция вектора напряжения питания статора на направление вектора потокосцепления ротора);  $I$  – сила тока в канале потокосцепления ротора;  $T_{fc}$  – постоянная времени преобразователя частоты;  $T_{1eq} = L_{1eq}/R_{1eq}$  – электромагнитная постоянная времени обмотки статора;  $L_{1eq} = \sigma L_1$  – ее эквивалентная индуктивность;  $\Psi$  – модуль вектора потокосцепления ротора;  $T_2 = L_2/R_2$  – электромагнитная постоянная времени обмотки ротора;  $\sigma = 1 - (L_{12})^2/(L_1 L_2)$  – коэффициент рассеяния магнитного поля.

Коэффициенты  $k_2$  и  $\sigma$  предполагаются постоянными. Введем безразмерные величины

$$x_1 = \frac{\Psi}{\Psi_n}, \quad x_2 = \frac{I}{I_n}, \quad x_3 = \frac{E}{E_n}, \quad u = \frac{U}{U_n}, \quad (2)$$

где  $n$  – индекс номинальных величин.

Перейдем в уравнениях (1) к безразмерным величинам (2):

$$\begin{aligned} px_1 &= -\frac{1}{T_2} x_1 + \frac{L_{12} I_n}{T_2 \Psi_n} x_2; \\ px_2 &= -\frac{1}{T_{1eq}} x_2 + \frac{E_n}{R_{1eq} T_{1eq} I_n} x_3; \\ px_3 &= -\frac{1}{T_{fc}} x_3 + \frac{K_{fc} U_n}{T_{fc} E_n} u. \end{aligned} \quad (3)$$

Воспользовавшись уравнениями (3), построим структурную схему системы в пространстве состояний (рис. 2).

Предположим, что неопределенные параметры системы  $K_{fc}$ ,  $R_{1eq}$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_{12}$  изменяются в интервалах

$$\begin{aligned} K_{fc} &= K_{fcn} (1 + pK_{fc} \delta_{K_{fc}}); \\ R_{1eq} &= R_{1eqn} (1 + pR_{1eq} \delta_{R_{1eq}}); \\ R_2 &= R_{2n} (1 + pR_2 \delta_{R_2}); \\ L_{1eq} &= L_{1eqn} (1 + pL_{1eq} \delta_{L_{1eq}}); \\ L_2 &= L_{2n} (1 + pL_2 \delta_{L_2}); \\ L_{12} &= L_{12n} (1 + pL_{12} \delta_{L_{12}}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $pK_{fc}$ ,  $pR_{1eq}$ ,  $pR_2$ ,  $pL_{1eq}$ ,  $pL_2$ ,  $pL_{12}$  – коэффициенты отклонений относительных значений неопределенных параметров  $\delta_{K_{fc}}$ ,  $\delta_{R_{1eq}}$ ,  $\delta_{R_2}$ ,  $\delta_{L_{1eq}}$ ,  $\delta_{L_2}$  и  $\delta_{L_{12}}$ .

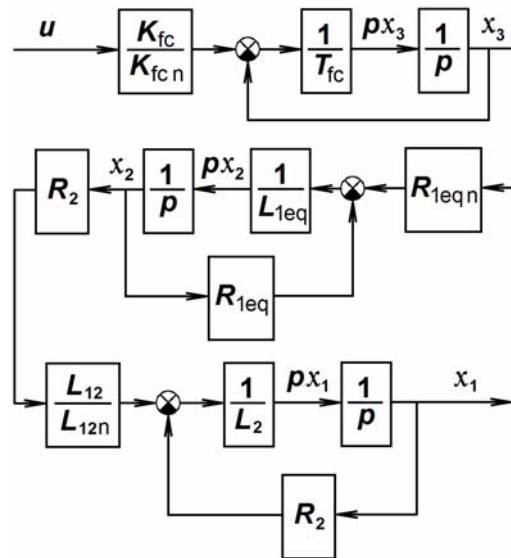


Рис. 2. Структурная схема канала потокосцепления ротора в пространстве состояний

Заменим каждый из параметров (4), представленных на рис. 2, структурной схемой. В результате получим структурную схему системы с параметрической неопределенностью, приведенную на рис. 3.

Перейдем от этой структурной схемы к векторным уравнениям состояния в операторной форме:

$$\begin{aligned} px &= Ax + B_1 w + B_2 u; \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u; \\ y &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{pR_2}{L_{2n}} & \frac{pL_{12}}{L_{2n}} & 0 & -\frac{pR_2}{L_{2n}} \\ 0 & -pL_{1eq} & -\frac{pR_{1eq}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{pK_{fc}}{T_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$



$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \end{bmatrix}; C_2 = [1 \ 0 \ 0];$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -pL_{1eq} & -\frac{pR_{1eq}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & pR_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{pR_2}{L_{2n}} & \frac{pL_{12}}{L_{2n}} & 0 & -\frac{pR_2}{L_{2n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_2^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix}; D_{12}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$D_{21} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; D_{22} = [0];$$

$x = (x_1, x_2, x_3)^T$  – фазовый вектор;  $y$  – одномерный вектор выхода, по которому замыкается обратная связь;  $z=(z_1, z_2, \dots, z_7)^T$ ,  $w=(w_1, w_2, \dots, w_7)^T$  – соответственно входной и выходной векторы неопределенности, представленной на рис. 3.

Полученным уравнениям (5) соответствует матричная передаточная функция  $P(p)$ , которая в общепринятой форме имеет вид (6):

$$P(p) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Она содержит известные элементы и не содержит неопределенности.

Матричная передаточная функция, содержащая неопределенность, имеет вид (7):

$$\Delta(p) = \begin{bmatrix} \delta_{K_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{L_{1eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{R_{1eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta_{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{L_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{R_2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Она определяет связь вектора  $w(p)$  с вектором  $z(p)$ . Эта связь описывается матричным выражением  $w(p)=\Delta(p) \cdot z(p)$ , которое отображает систему уравнений (8):

$$w_1 = \delta_{K_{fc}} z_1; w_2 = \delta_{L_{1eq}} z_2; w_3 = \delta_{R_{1eq}} z_3; w_4 = \delta_{R_2} z_4; \quad (8)$$

$$w_5 = \delta_{L_{12}} z_5; w_6 = \delta_{L_2} z_6; w_7 = \delta_{R_2} z_7.$$

Эта система уравнений получена по рис. 3.

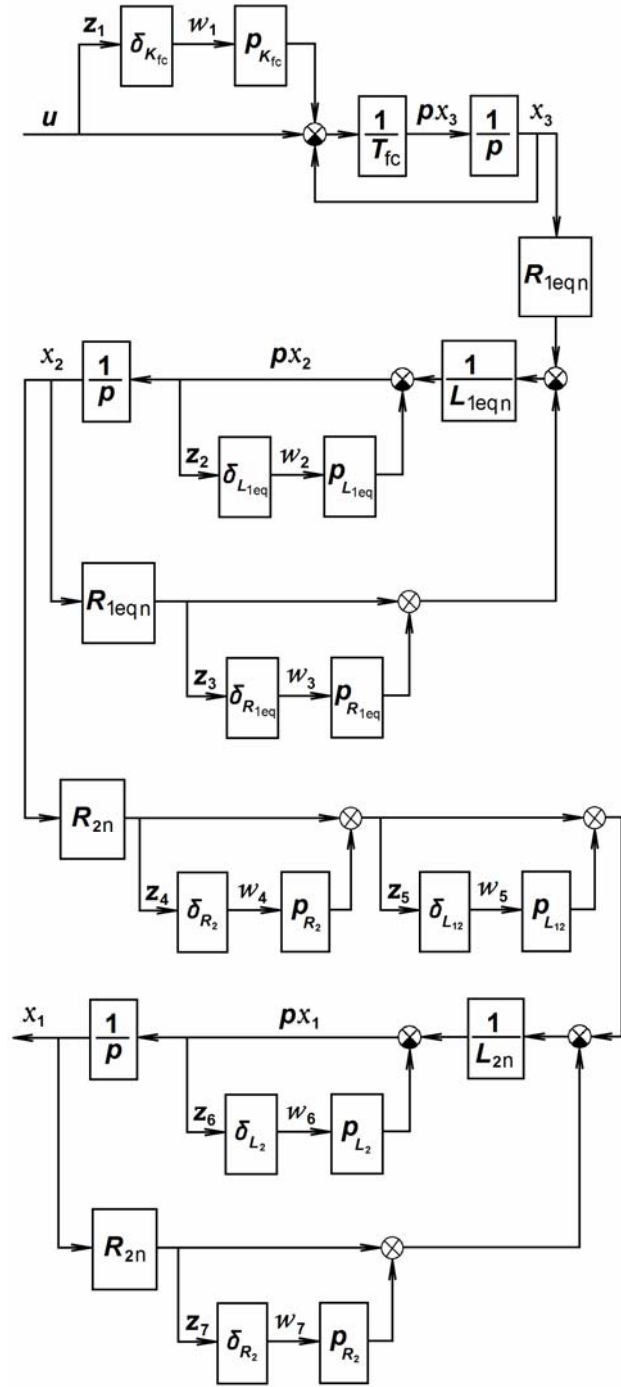


Рис. 3. Структурная схема канала потокосцепления ротора с неопределенными параметрами

Таким образом, построена математическая модель канала потокосцепления ротора в пространстве состояний с параметрической неопределенностью.

Синтез оптимального стабилизирующего регулятора  $K(p)$  проводился методом смешанной чувствительности для объекта  $P(p)$  с неопределенностью  $\Delta(p)$ .

Структурная схема объекта  $P(p)$  с неопределенностью  $\Delta(p)$  и регулятором  $K(p)$  представлена на рис. 4.

Численное решение проводилось при следующих значениях исходных данных  $T_{fc}=0,001$  с;  $R_{1n}=2,65$  Ом;  $R_{2n}=2,0$  Ом;  $L_{1n}=0,186$  Гн;  $L_{2n}=0,189$  Гн;  $L_{12n}=0,179$  Гн;  $\sigma=0,0996$ , соответствующих асинхронному электроприводу с двигателем MDXMA100-32.



жовного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №4/2010(63). – Ч.3. – С. 15-20.

6. Шийка А.А., Потапенко Е.М. Робастное управление асинхронным электроприводом с минимизацией потерь мощности в реальном времени // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – 2013. – №36(1009). – С. 106-109.

7. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.

8. Хинчин Д.Я. Цепные дроби. – М.: Наука, 1978. – 112 с.

9. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2, 1998. – 230 p. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>.

10. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2006. – 304 с.

#### REFERENCES

1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Khomenko V.V. Investigation of the effect of nonlinearities and variations of the control object parameters on dynamic characteristics of the electromechanical servo systems. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.12(1121), pp. 68-71. (Rus).

2. Kuznetsov A.P., Markov A.V., Shmarlevsky A.S. Analysis of channel settings control the rotor flux vector control system. *Doklady BGUIR*, 2008, no.4(34), pp. 84-91. (Belarus).

3. Nesenчук А.А., Орейко О.Ф., Однолко Д.С. Dynamics simulation and calculation of robust parameters for the electric drive control system on the basis of the root locus portraits. *Artificial Intelligence*, 2014, no.3, pp. 90-103. (Rus).

4. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Bovkunovich V.S. Rough vector control torque and flux induction motor. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2010, no.1. pp. 60-66. (Ukr).

5. Polilov E.V., Rudnev E.S., Skorik S.P. Synthesis of robust control algorithms for a synchronous electric motor means  $H_\infty$ -theory. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2010, iss.4/2010(63), part 3, pp. 15-20. (Ukr).

6. Shiyka A.A., Potapenko E.M. Robust control of asynchronous electric minimizing power loss in real time. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.36(1009), pp. 106-109. (Rus).

7. Egupov N.D. *Metody robastnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniia* [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control]. Moscow, Publishing House of the MSTU named after N.E. Bauman, 2002. 744 p. (Rus).

8. Khinchin D.Y. *Tsepnye drobi* [Continued fractions]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 112 p. (Rus).

9. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. *MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2*, 1998. 230 p. Available at: <http://www.mathworks.com> (Accessed 12 May 2016).

10. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniia elektroprivodov: uchebnik dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedenii* [Control systems of electric drives: textbook for students of higher educational institutions]. Moscow, Akademiia Publ., 2006. 304 p. (Rus).

Поступила (received) 21.10.2016

Хлопенко Николай Яковлевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Хлопенко Иван Николаевич<sup>1</sup>, магистрант,

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,  
54021, Николаев, просп. Центральный, 3,  
тел/phone +38 0512 709100, e-mail: [ivan.hlopenko@yandex.ua](mailto:ivan.hlopenko@yandex.ua)

N.J. Khlopenko<sup>1</sup>, I.N. Khlopenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding,  
3, Central Ave., Nikolaev, 54021, Ukraine.

#### Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage.

**Purpose.** The aim is to structural synthesis of robust stabilizing control of the rotor flux vector control system of induction motor.

**Methodology.** Synthesis controller structure was carried out in two stages. The first stage constructed a mathematical model of the channel of the rotor flux with parametric uncertainty and calculated transfer function of  $H_\infty$ -suboptimal controller by method of the mixed sensitivity. The second stage was carried out the expansion of the transfer function of the continued fraction for the Euclidean algorithm. This fraction was used to construct the controller structural scheme. **Results.** Computer modeling of the transfer function of  $H_\infty$ -suboptimal controller. Achieved decomposition found the transfer function of the continued fraction. The flow diagram of suboptimal  $H_\infty$ -controller with a proportional and integrating links and a few summers. The curves of transient rotor flux linkage in packages Robust Control Toolbox and Simulink. They coincide in the steady state, but differ among themselves in the transition. **Originality.** We developed the method of structural synthesis of robust stabilizing controller of the flux linkage rotor,  $H_\infty$ -suboptimal structural scheme of which is presented in the form of simple compounds integrating and proportional elements of the same order as the controller with the strictly correct transfer function, and takes into account the parametric uncertainty of control object. The results of the simulation of transient processes in a variety of packages MATLAB applications confirms the adequacy and small sensitivity of the system to parametric perturbation. **Practical value.** The resulting structure of the controller makes it possible to carry out the modernization of electric control systems, in use, with minimal financial costs. References 10, figures 6.

**Key words:** electric drive, vector control, flux linkage channel, structure of  $H_\infty$ -optimal controller.

## СТАТИСТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСТОТНО РЕГУЛЬОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРИ СКАЛЯРНОМУ КЕРУВАННІ

*Розроблено методику синтезу статистично оптимальних регуляторів асинхронних електроприводів з частотним скалярним керуванням, що працюють при стохастичних моментах навантаження. Визначені оптимальні структури регуляторів електроприводів такого класу в залежності від виду випадкових збурень. На прикладі моделювання роботи електроприводу дробарки зерна показано ефективність фільтрації статистично оптимальним регулятором високочастотних складових випадкових моментів навантаження та підвищення циклових показників енергоефективності електроприводу, таких як циклові ККД та коефіцієнт потужності. Бібл. 4, табл. 1, рис. 3.*

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, частотне скалярне керування, випадкове навантаження, оптимальний регулятор.

*Разработана методика синтеза статистически оптимальных регуляторов асинхронных электроприводов с частотным скалярным управлением, работающих при стохастических моментах нагрузки. Определены оптимальные структуры регуляторов электроприводов такого класса в зависимости от вида случайных возмущений. На примере моделирования работы электропривода дробилки зерна показана эффективность фильтрации статистически оптимальным регулятором высокочастотных составляющих моментов нагрузки и повышение циклических показателей энергоэффективности электропривода, таких как цикловые КПД и коэффициент мощности. Библ. 4, табл. 1, рис. 3.*

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, частотное скалярное управление, случайная нагрузка, оптимальный регулятор.

**Вступ.** Широкий клас асинхронних електроприводів, зокрема тих, що застосовуються механізмах сільськогосподарського, житлово-комунального господарств, в будівництві, мають момент навантаження, що змінюється за випадковими законами. Це приводи таких механізмів, як дробарки зерна, подрібнювачі кормів, гранулятори, змішувачі, транспортери, тощо. При випадкових змінах моменту навантаження електроприводу струм, швидкість та електромагнітний момент асинхронного двигуна (АД) також змінюються за випадковими законами.

Стохастичний характер зміни збурень таких електроприводів суттєво погіршує показники їх роботи: вимагає завищення встановленої потужності двигунів, викликає удари в механічних частинах приводу, обумовлює кидки струму в двигуні та мережі, що погіршує якість споживаної енергії та збільшує втрати потужності, знижує показники якості регулювання в регульованих електроприводах, збільшує ймовірність перевантаження асинхронного двигуна та його виходу з ладу, робить неможливим реалізацію оптимальних режимів енергоспоживання в замкнутих системах електроприводу, таких як «перетворювач частоти – асинхронний двигун», «перетворювач напруги – асинхронний двигун».

**Метою роботи** є розробка методики статистично оптимального синтезу регуляторів асинхронних електроприводів з перетворювачами частоти при випадкових збуреннях для механізмів, які не вимагають регулювання швидкості.

**Постановка задачі.** Одним з напрямів підвищення енергоефективності роботи асинхронних електроприводів при випадковому характері зміни навантажень є створення замкнутих систем електроприводу із статистично оптимальними регуляторами, які б враховували стохастичний характер збурень та виступали як фільтри випадкових високочастотних коливань навантаження. Структура таких регуляторів залежить від статистичних характеристик стохастичних

навантажень – кореляційної функції та спектральної густини.

Проблема оптимізації енергоспоживання в замкнутих асинхронних електроприводах із перетворювачами частоти при статичному моменті навантаження є досить розробленою як в Україні, так і за кордоном [1-3]. В той же час недостатньо досліджені процеси в таких системах в динамічних режимах при змінному протягом технологічного циклу моменті навантаження, зокрема за випадковим законом. У такому режимі мінімальним втратам у динамічних режимах з навантаженнями, що інтенсивно змінюються за випадковими законами, відповідає критерій мінімуму середньоквадратичної похибки регулювання оптимального параметру. У випадку частотно регульованого електропривода таким параметром є оптимальне потокозчеплення ротора. При цьому можуть розглядатись два види частотного керування АД – скалярне та векторне.

При векторному керуванні можливе безпосереднє регулювання потокозчеплення ротора через розділення процесів керування потоком та моментом. Але якість фільтрації високочастотних складових навантаження залежить від якості стабілізації контуру потокозчеплення, що досить складно реалізувати для перетворювачів частоти із властивостями джерела напруги через наявність електромагнітного зв'язку між контурами регулювання моменту та потокозчеплення [4].

Виходячи із вказаних причин, у даній роботі в якості прикладу синтезу статистично оптимальних систем розглядається система «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ-АД) із скалярним керуванням при постійній заданій частоті обертання.

Відомо, що для забезпечення мінімальних втрат потужності в асинхронному двигуні при зміні статичного навантаження необхідно регулювати оптимальне потокозчеплення, яке визначається за формулою

$$\Psi_{opt} = \Psi_n \frac{I_2}{I_{2n}} \sqrt{\frac{\Delta P_{var_n}}{I_{1m}^2 R_1 + \Delta P_{const_n} \left(\frac{f}{f_n}\right)^\beta}}, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{const_n}$  – номінальні втрати у сталі в двигуні;  $\Delta P_{var_n}$  – номінальні втрати у міді в двигуні;  $\Psi_n$  – номінальне потокозчеплення ротора двигуна;  $I_{1m}$  – номінальне значення струму намагнічування;  $I_{2n}$ ,  $I_2$  – номінальне та поточне значення струмів ротора;  $f_n$ ,  $f$  – номінальне та поточне значення частоти живлення;  $\beta$  – коефіцієнт, що залежить від марки сталі (тут приймемо 1,5);  $R_1$  – активний опір статора.

Для створення оптимального потокозчеплення (2.15), при заданій швидкості обертання, що визначається заданою частотою, необхідно подати оптимальне значення напруги  $U_{opt}$ , що у зоні робочих ковзань може бути визначено приблизно за схемою заміщення АД за формулою

$$U_{opt} = \Psi_{opt} f + I_1 \sqrt{R_1^2 + (2\pi f L_1)^2}. \quad (2)$$

Це можливо зробити за допомогою функціональної схеми замкнутої системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун», що подана на рис. 1. На цій схемі позначені: АД – асинхронний двигун, ОП – обчислювальний пристрій, у якому розраховується значення  $U_{opt}$ , ПЧ – перетворювач частоти, ДН – датчик напруги, ДС – датчик струму, РН – регулятор напруги,  $f_z$  – сигнал завдання швидкості.

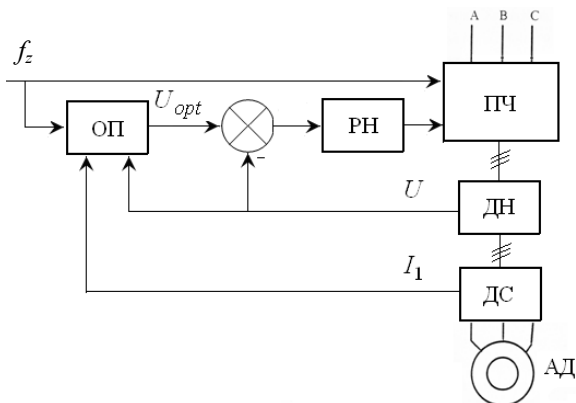


Рис. 1. Функціональна схеми замкнутої системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» при скалярному керуванні

Вхідною керуючою дією двигуна в складі замкнутої системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» у режимі оптимізації за законом  $\Psi = \Psi_{opt}$  є напруга живлення статора та частота, що пов'язані між собою співвідношенням (2). При цьому контур регулювання частоти стабілізує швидкість на заданому рівні, а контур регулювання напруги стабілізує оптимальне значення потокозчеплення.

При статичному моменті навантаження двигун буде працювати із мінімальними втратами потужності за умови виконання співвідношень (1) та (2). В динамічних режимах при різко змінному за випадковим законом навантаженні електроприводу струм, швидкість та електромагнітний момент АД також змінюються за випадковими законами. Причому струми

статора та ротора при заданих напрузі та частоті та при припущенні про роботу на лінійній ділянці кривої намагнічування однозначно визначаються ковзанням. При динамічних змінах ковзання обчислювальний пристрій внаслідок електромагнітної та електромеханічної інерції буде реагувати на зміну навантаження із інерцією, що не дозволить отримати оптимальний режим у кожний момент часу. Отже для реалізації режиму оптимізації енергоспоживання необхідна стабілізація ковзання (швидкості обертання ротора) при динамічних стохастичних навантаженнях.

При скалярному керуванні регулюється тільки амплітуда вектора потокозчеплення ротора за допомогою співвідношення  $U/f$ , а його фаза є некерованою. Через це електромагнітний момент має некеровані складові, що не дозволяє отримати високу якість регулювання у електроприводах із змінними сигналами керування, таких, як слідкуючі, позиційні електроприводи, але дозволяє отримати досить високу якість стабілізації швидкості при змінних навантаженнях, отже, частотно регульовані електроприводи із скалярним керуванням можуть забезпечувати режим оптимізації енергоспоживання.

**Результати досліджень.** Лінеаризована структурна схема електроприводу за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» із скалярним керуванням подана на рис. 2.

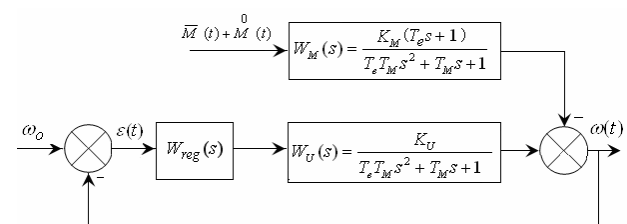


Рис. 2. Структурна схема електроприводу

На цій схемі:  $\omega_0$  – сигнал завдання (циклічна частота обертання холостого ходу);  $\omega(t)$  – вихідна регульована величина електроприводу (циклічна частота обертання);  $M(t) = \bar{M}(t) + M(t)$  – випадковий сигнал збурення, що поданий у вигляді суми середнього значення  $\bar{M}(t)$  та центрованого випадкового процесу  $M(t)$ ,  $W_{reg}(s)$  – передаточна функція регулятора,  $W_U(s)$  – передаточна функція двигуна за сигналом керування,  $W_M(s)$  – передаточна функція двигуна за збуренням (моментом опору).

У передаточних функціях на рис. 2 позначені:  $s$  – оператор Лапласа,  $T_e$  – електромагнітна постійна часу,  $T_M$  – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна,  $K_U$  – коефіцієнт передачі за сигналом керування;  $K_M$  – коефіцієнт передачі за збуренням.

Вхідний сигнал регулятора

$$\varepsilon(t) = \omega_0 - \omega(t) \quad (3)$$

назвемо випадковою похибкою системи. За критерій оптимальності приймемо критерій мінімуму середньоквадратичного значення випадкової похибки регулювання  $\varepsilon_{rms}$ , яка у випадку стаціонарності та ергодичності процесу навантаження може бути обчислена як

корінь з квадрату середньої похибки регулювання за часом  $\bar{\varepsilon}^2$  за досить довгий період спостереження  $T \rightarrow \infty$ :

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\bar{\varepsilon}^2} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon^2(t) dt} \rightarrow \min. \quad (4)$$

У даній статті розглядається задача статистично оптимального синтезу при довільній структурі регулятора, яка попереду є невідомою. Ця задача формулюється так. Заданими є статистичні характеристики сигналу збурення – навантаження  $M(t)$ , наприклад його спектральна густина  $S_M(\omega)$ , та передаточні функції об'єкту керування – асинхронного електроприводу. Необхідно знайти передаточну функцію регулятора  $W_{reg}(s)$ , що забезпечує мінімум середньоквадратичної похибки системи  $\varepsilon_{rms}$ .

Для центрованого стаціонарного випадкового процесу при нульовому математичному сподіванні середньоквадратична похибка дорівнюватиме кореню з дисперсії випадкової похибки системи

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\bar{\varepsilon}^2} = \sqrt{D_\varepsilon}, \quad (5)$$

яка може бути знайдена, виходячи із законів перетворення статистичних характеристик випадкового процесу замкнутою системою асинхронного електропривода з передаточною функцією за збуренням

$$W(s) = \frac{W_M(s)}{1 + W_{reg}(s) \cdot W_U(s)}. \quad (6)$$

У відповідності до закону Хінчина-Вінера

$$D_\varepsilon = \int_0^\infty \left| \frac{W_M(j\omega)}{1 + W_{reg}(j\omega) \cdot W_U(j\omega)} \right|^2 S_M(\omega) d\omega, \quad (7)$$

де  $W_U(j\omega)$ ,  $W_M(j\omega)$  – частотні передаточні функції електропривода за керуванням та збуренням відповідно;  $W_{reg}(j\omega)$  – частотна передаточна функція регулятора.

Отже, для того, щоб мінімізувати  $\varepsilon_{rms}$ , необхідно, щоб виконувалась умова  $D_\varepsilon \rightarrow \min$ .

Через складність виразу (7), безпосередньо використовуватись для оптимального статистичного синтезу він не може. Тому для розв'язку цієї задачі була розроблена методика статистично оптимального синтезу, особливістю якої є розкладання випадкового процесу навантаження на середнє значення  $\bar{M}(t)$ , що подається як корисний сигнал, та високочастотні флуктуації навколо середнього значення  $M(t)$ , що подаються як перешкоди – центрований стаціонарний випадковий процес.

Після розкладання сигналу навантаження на корисний сигнал  $\bar{M}(t)$  та сигнал перешкод  $M(t)$  динамічну випадкову похибку системи можна подати як різницю вихідних сигналів двох систем (рис. 3), одна з яких спроектована із умов оптимізації енергоспоживання при статичному моменті з частотною передаточною функцією замкнутої системи за збуренням

$$k_0(j\omega) = \frac{W_M(j\omega)}{1 + W_U(j\omega)}, \quad (8)$$

а частотна передаточна функція другої системи

$$k(j\omega) = \frac{W_M(j\omega)}{1 + W_{reg}(j\omega) \cdot W_U(j\omega)} \quad (9)$$

є поки що невідомою через невідому частотну передаточну функцію регулятора  $W_{reg}(j\omega)$ , яка шукається з умов забезпечення мінімуму середньоквадратичної похибки за рахунок фільтрації високочастотних флуктуацій.

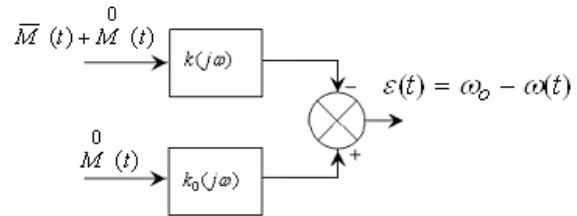


Рис. 3. Структурна схема для оптимального синтезу

Нехай  $S_{\bar{M}}(\omega)$  – спектральна густина корисного сигналу і  $S_0(\omega)$  – спектральна густина сигналу перешкод.

Тоді спектральна густина випадкової динамічної похибки регулювання згідно з рис. 3

$$S_\varepsilon(\omega) = |k_0(j\omega) - k(j\omega)|^2 \cdot S_{\bar{M}}(\omega) + |k(j\omega)|^2 \cdot S_0(\omega). \quad (10)$$

Дисперсія випадкової похибки регулювання

$$D_\varepsilon = \int_{-\infty}^\infty |k_0(j\omega)|^2 \cdot \{ |1 - k'(j\omega)|^2 \cdot S_{\bar{M}}(\omega) + |k'(j\omega)|^2 \cdot S_0(\omega) \} d\omega, \quad (11)$$

де  $k'(j\omega) = \frac{k(j\omega)}{k_0(j\omega)}$ .

Після деяких перетворень та мінімізації виразу (11) отримаємо частотну передаточну функцію статистично оптимальної системи:

$$k_{opt}(j\omega) = \frac{k_0(j\omega) \cdot S_{\bar{M}}(\omega)}{S_{\bar{M}}(\omega) + S_0(\omega)}. \quad (12)$$

Аналіз частотної передаточної функції (12) для навантажень з експоненціальною та експоненціально-косинусною кореляційними функціями показав, що вона має додатні полюси по змінній  $j\omega$ , отже така система не може бути фізично реалізована. Для коректного розв'язку цієї задачі слід виділити частину частотної передаточної функції, що має від'ємні полюси, а іншу частину відкинути.

Для цього необхідно з  $K_{opt}(j\omega)$  виділити частину  $k_{opt}^{real}(j\omega)$ , що фізично реалізується.

Для цього спочатку розкладемо знаменник виразу (12) на комплексні множники:

$$S_{\bar{M}}(\omega) + S_0(\omega) = \psi(j\omega) \cdot \psi(-j\omega), \quad (13)$$

де  $\psi(j\omega)$  – функція, всі полюси якої по комплексній змінній  $j\omega$  є від'ємними;  $\psi(-j\omega)$  – функція, всі полюси якої по комплексній змінній  $j\omega$  є додатними.

Тепер розділимо функцію  $\frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)}$  на дві складові:

$$\frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)} = \left\{ \frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right\}^+ + \left\{ \frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right\}^-, \quad (14)$$

де  $\left\{ \frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right\}^+$  – складова, що має від'ємні полюси комплексної змінної  $j\omega$  і може бути фізично реалізована,  $\left\{ \frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right\}^-$  – складова, що має додатні полюси комплексної змінної  $j\omega$  і не може бути фізично реалізована.

Відкидаючи частину функції  $\frac{S_{\overline{M}}(\omega)}{\psi(-j\omega)}$ , що не може бути фізично реалізована, отримаємо найбільш близьку до оптимальної частотну передаточну функцію замкнутого електроприводу, що може бути фізично реалізована:

$$k_{opt}^{real}(j\omega) = \frac{k_0(j\omega)}{\psi(j\omega)} \cdot \left\{ \frac{S_{\overline{M}_c}(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right\}^+. \quad (15)$$

Для отримання передаточної функції статистично оптимальної системи  $k_{opt}^{real}(s)$  необхідно подати (15) у вигляді відношення поліномів по комплексній змінній  $j\omega$  з послідуною заміною змінної  $j\omega$  на оператор  $s$ .

Після визначення передаточної функції статистично оптимальної системи  $k_{opt}^{real}(s)$  визначається передаточна функція регулятора із наступного співвідношення, яке можна отримати з (9), розв'язавши це рівняння відносно  $W_{reg}(s)$ :

$$W_{reg}(s) = \frac{k_{opt}^{real}(s) - W_M(s)}{k_{opt}^{real}(s) \cdot W_U(s)}. \quad (16)$$

Розрахунки показали, що при навантаженні, що має експоненціальну кореляційну функцію  $R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|}$  передаточною функцією статистично оптимального регулятора буде послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та форсуючої ланки  $W_{reg}(s) = \frac{a_0s + a_1}{b_0s + b_1}$ , а для навантаження з експоненціально-косинусною кореляційною функцією  $R(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau$  – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та форсуючої ланки  $W_{reg}(s) = \frac{a_0s + a_1}{b_0s^2 + b_1s + b_2}$ . Коефіцієнти даних передаточних функцій є функціями параметрів передаточних функцій електроприводу  $W_U(s)$  і  $W_M(s)$  та параметрів кореляційних функцій навантаження  $R(\tau)$ .

Дослідження режимів роботи асинхронних електроприводів з випадковим характером зміни навантаження проведено на прикладі моделювання роботи

електроприводу прямої дробарки зерна із асинхронним двигуном типу 4A80B2, навантаження якої має експоненціально-косинусну кореляційну функцію, яка відповідає статистичним характеристикам реалізацій, отриманих експериментально.

Моделювання роботи електроприводу при застосуванні статистично оптимального регулятора показало зменшення дисперсії вихідних параметрів електроприводу (електромагнітного моменту, струму, швидкості) на 50-70 %.

Оцінити резерви енергоспоживання за рахунок застосування статистично оптимального регулятора можливо за допомогою циклових показників, таких як цикловий ККД та коефіцієнт потужності. Дані показники для електроприводу прямої дробарки зерна подані в табл.1 у випадках нерегульованого електроприводу, електроприводу за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» з типовим регулятором швидкості, спроектованим із умов статичного режиму (з ПІ-регулятором), та із статистично оптимальним регулятором.

Таблиця 1

Енергетичні показники електроприводів		
Вид приводу	Цикловий ККД	$\cos \varphi$
Нерегульований	70 %	0,64
З ПІ-регулятором	71 %	0,68
З статистично оптимальним регулятором	76 %	0,81

З табл. 1 видно, що використання типового ПІ-регулятора не дозволяє отримати суттєве підвищення енергоефективності за рахунок використання оптимального закону регулювання поточозчепленням в умовах дій динамічних стохастичних навантажень внаслідок впливів електромагнітної та електромеханічної інерції. Застосування статистично оптимального регулятора при стохастичних збуреннях дозволило підвищити показники енергоефективності електроприводу. Причому, при скалярному керуванні ці показники близькі до значень, отриманих при статистичній оптимізації електроприводів з векторним керуванням [4] при тих же умовах навантаження, але при простіших умовах технічної реалізації.

### Висновки.

1. В умовах дій динамічних стохастичних навантажень для реалізації оптимального закону керування доцільно застосування статистично оптимальних регуляторів замість або разом з типовими регуляторами.
2. Моделювання роботи електроприводу дробарки зерна показало ефективність фільтрації статистично оптимальним регулятором високочастотних складових випадкових моментів навантаження, підвищення циклових показників енергоефективності електроприводу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. E. Levi, M. Sokola, A. Boglietti, M. Pastorelli. Iron loss in rotor-flux oriented induction machines: identification, assessment of detuning, and compensation // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1996. – vol.11. – no.5. – pp. 698-709. doi: 10.1109/63.535402.
2. Dymko S., Peresada S., Leidhold R. Torque control of saturated induction motors with torque per ampere ratio maximiza-

tion // Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, 2-6 June 2014, Kyiv, Ukraine. – 2014. – pp. 251-256.

3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В. Энерго- и ресурсосберегающие технологии на основе регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. – 2004. – №9. – С. 33-39.

4. Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лавинський Д.С. Оптимізація регуляторів частотно керованих асинхронних електроприводів при стохастичних навантаженнях // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 53-55.

#### REFERENCES

1. E. Levi, M. Sokola, A. Boglietti, M. Pastorelli. Iron loss in rotor-flux oriented induction machines: identification, assessment of detuning, and compensation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, vol.11, no.5, pp. 698-709. doi: 10.1109/63.535402.

2. Dymko S., Peresada S., Leidhold R. Torque control of saturated induction motors with torque per ampere ratio maximization. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*, 2-6 June 2014, Kyiv, Ukraine, pp. 251-256.

3. Braslavskii I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Plotnikov Yu.V. Energy- and resource-conserving technologies based on controllable asynchronous drives. *Russian Electrical Engineering*, 2004, vol.75, no.9, pp. 30-36.

4. Shurub Yu.V., Dudnyk A.O., Lavinskiy D.S. Optimization of regulators of frequency controlled induction electric drives under the stochastic loadings. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2016, no.4, pp. 53-55. (Ukr).

Надійшла (received) 25.10.2016

Шуруб Юрій Вікторович, к.т.н., с.н.с.,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
03680, Київ-57, пр. Перемоги, 56,  
тел/phone +38 044 3662637, e-mail: shurub@bigmir.net

Yu.V. Shurub

The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,  
56, prospekt Peremogy, Kiev-57, 03680, Ukraine.

#### Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control.

**Purpose.** Working out of technique of synthesizing statistically optimal controllers of induction electric drives with frequency scalar control operating under stochastic loads. **Methodology.** It is shown, that one of the ways of increasing the energy efficiency of induction electric drives at random changes of loads is to create closed systems of electric drives with statistically optimal regulators that would take into account the stochastic nature of the disturbances and acted as filters of occasional high frequency fluctuations. The structure of such controls depends on the statistical characteristics of stochastic loads – correlation function and spectral density. In this mode, the minimum loss in dynamic mode with random intensive changed loads is provided by criterion of minimum mean square error of optimal parameter control. In the case of frequency controlled electric drive such a parameter is the optimum rotor flux. **Results.** The optimal structures of regulators of electric drives under stochastic loads according to type of random disturbances are identified. **Originality.** The technique of statistically optimal synthesis with feature of the expansion of a random process load on average, served as a useful signal, and high-frequency fluctuations around the average value, served as barrier, is developed. **Practical value.** On an example of simulation of work of the electric drive of a crusher of grain it is shown efficiency of a filtration by statically optimal regulator of the high-frequency components of random torques of load, reduction of dispersions of its outlet parameters, increase of cyclic indicators of energy efficiency of the electric drive, such as cyclic efficiency and power factor. References 4, tables 1, figures 3.

**Key words:** induction electric drive, frequency scalar control, stochastic load, optimal regulator.



М.И. Баранов, В.В. Князев, С.В. Рудаков

## РАСЧЕТНАЯ И ОПЫТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НОРМИРОВАННОГО ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ СТАНДАРТУ IEC 62305-1-2010 ИМПУЛЬСА ТОКА КОРОТКОГО УДАРА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ НА ТОНКОСТЕННОЕ ПОКРЫТИЕ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

*Приведені результати розрахункової і досвідної оцінки електротермічної стійкості тонкостінного покриття зовнішньої крівлі висотної технічної споруди з неіржавіючої сталі мазкі 12X18H10T до прямої дії на нього нормованого за міжнародним стандартом IEC 62305-1-2010 аперіодичного імпульсу струму штучної блискавки часової форми 10/350 мкс з амплітудою від 100 до 200 кА і заданими допусками на його амплітудно-часові параметри. Показано, що вказаний імпульсний струм блискавки викликає лише локальне поверхневе термічне пошкодження досліджуваного сталевого покриття при радіусі даної зони пошкодження не більше 30 мм і глибині проплавлення його стінки не більше 50 мкм. Бібл. 20, табл. 1, рис. 4.*

*Ключові слова:* імпульс струму штучної блискавки часової форми 10/350 мкс, тонкостінне покриття з неіржавіючої сталі, електротермічна дія струму блискавки на сталеве покриття, радіус і глибина зони проплавлення стінки сталевого покриття, розрахункова і досвідна оцінка зони пошкодження покриття.

*Приведены результаты расчетной и опытной оценки электротермической стойкости тонкостенного покрытия наружной кровли высотного технического сооружения из нержавеющей стали марки 12X18H10T к прямому воздействию на него нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 аперіодического импульса тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс с амплитудой от 100 до 200 кА и заданными допусками на его амплитудно-временные параметры. Показано, что указанный импульсный ток молнии вызывает лишь локальное поверхностное термическое повреждение исследуемого стального покрытия при радиусе данной зоны повреждения не более 30 мм и глубине проплавления его стенки не более 50 мкм. Библ. 20, табл. 1, рис. 4.*

*Ключевые слова:* импульс тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс, тонкостенное покрытие из нержавеющей стали, электротермическое действие тока молнии на стальное покрытие, радиус и глубина зоны проплавления стенки стального покрытия, расчетная и опытная оценка зоны повреждения покрытия.

**Введение.** В [1] авторами были приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных листовых тонкостенных (толщиной 1 мм и размером в плане 500 x 500 мм) образцов наружной кровли из нержавеющей стали марки 12X18H10T высотных технических сооружений к прямому воздействию на них нормированных  $A$ - и  $C$ - компонент импульсного тока искусственной молнии, амплитудно-временные параметры (АВП) которых соответствовали действующим техническим требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412 и SAE ARP 5416 применительно к летательным аппаратам [2, 3]. Как известно, в указанном случае импульсная затухающая синусоидальная  $A$ - компонента тока молнии характеризовалась следующими нормированными АВП [2, 3]: амплитудой тока  $I_{mA} = \pm 200$  кА (при допуске  $\pm 10$  %); интегралом действия тока  $J_A = 2 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (при допуске  $\pm 20$  %); временем, соответствующем амплитуде тока  $I_{mA}$ , составляющем  $t_{mA} \leq 50$  мкс; продолжительностью протекания тока  $\tau_{pA} \leq 500$  мкс. Длительная аперіодическая  $C$ - компонента тока молнии в этом случае имела следующие нормированные АВП [2, 3]: амплитуду тока  $I_{mC} = \pm (200-800)$  А; переносимый током электрический заряд  $q_C = \pm 200$  Кл (при допуске  $\pm 20$  %); продолжительность протекания тока  $\tau_{pC} = (0,25-1)$  с. Отметим, что в [1] соответствующие эксперименты были выполнены на разработанном и созданном в 2007 году на экспериментально-испытательном исследовательском полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (в отделе №4 «Электромагнитных исследований и испытаний») мощном высоковольтном генераторе тока

искусственной молнии УИТОМ-1 [4], формирующем на испытываемом техническом объекте (ТО) АВП импульсы тока грозового разряда с описанными  $A$ - и  $C$ - компонентами по требованиям указанных нормативных документов [2, 3]. Согласно действующим требованиям международного стандарта IEC 62305-1-2010 [5] при оценке защиты от короткого удара молнии зданий, технических сооружений и их частей, включая находящихся в них людей и инженерных сетей, используется нормированный аперіодический импульс тока грозового разряда временной формы  $T_1/T_2 = 10$  мкс/350 мкс положительной полярности, где  $T_1$ ,  $T_2$  – соответственно длительность фронта и длительность полуспада импульса тока молнии. Другие основные АВП такого импульса тока молнии для I уровня молниезащиты ТО характеризуются следующими численными значениями [5]: амплитудой тока  $I_{mL} = 200$  кА (при допуске  $\pm 10$  %); интегралом действия тока (удельной энергией)  $J_L = 10 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (при допуске  $\pm 35$  %); количеством протекшего электрического заряда  $q_L = 100$  Кл (при допуске  $\pm 20$  %). Для II уровня молниезащиты ТО рассматриваемые АВП тока молнии имеют нижеследующие численные значения [5]: амплитуду тока  $I_{mL} = 150$  кА (при допуске  $\pm 10$  %); интеграл действия тока (удельную энергию)  $J_L = 5,6 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (при допуске  $\pm 35$  %); количество протекшего электрического заряда  $q_L = 75$  Кл (при допуске  $\pm 20$  %). Для наиболее низких III–IV уровней молниезащиты ТО указанные АВП тока грозового разряда должны соответствовать следующим техническим требованиям [5]: амплитуде тока  $I_{mL} = 100$  кА (при допуске

© М.И. Баранов, В.В. Князев, С.В. Рудаков

$\pm 10\%$ ); интегралу действия тока (удельной энергии)  $J_L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$  (при допуске  $\pm 35\%$ ); количеству протекшего электрического заряда  $q_L = 50 \text{ Кл}$  (при допуске  $\pm 20\%$ ). В этой связи несомненный практический интерес представляет электрофизическая задача, связанная с оценкой электротермической стойкости тонкостенных листовых покрытий из нержавеющей стали наружной кровли высотных технических сооружений к прямому воздействию на них аperiodического импульса тока короткого удара молнии временной формы 10/350 мкс с АВП, представленными в [5].

**Целью статьи** является определение результатов воздействия на тонкостенное листовое покрытие из нержавеющей стали, установленное на кровле высотного технического сооружения, импульса тока короткого удара молнии с нормированными по требованиям международного стандарта IEC 62305-1-2010 АВП.

**1. Постановка задачи исследования электротермической стойкости тонкостенного стального покрытия к импульсу тока молнии 10/350 мкс.** В рамках данного прикладного исследования рассмотрим плоское листовое тонкостенное стальное покрытие толщиной  $h \leq 1 \text{ мм}$ , испытывающее в воздушной среде с установившейся температурой  $\theta_0$  прямое воздействие на него сильноточного плазменного цилиндрического канала короткого грозового разряда с импульсным аperiodическим током  $i_L(t)$ , соответствующим техническим требованиям [5]. Пусть канал молнии в зоне его привязки на наружной поверхности стального покрытия, выполненного из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т [1], имеет максимальный радиус  $r_0$ , удовлетворяющий в системе СИ в месте размещения защищаемого ТО известной формуле Брагинского [6]:  $r_0 \approx 0,093 \cdot (I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}$ , где  $I_{mL}$  – амплитуда аperiodического импульса тока молнии временной формы 10/350 мкс, а  $t_{mL}$  – время, соответствующее амплитуде тока  $I_{mL}$ . Примем, что величину  $t_{mL}$  можно приближенно определить из соотношения вида [7]:  $t_{mL} \approx 1,6 \cdot T_1$ . Полагаем, что плотность импульсного тока  $\delta_L$  и плотность теплового потока  $g_L$  в цилиндрическом плазменном канале молнии практически равномерно распределены по его круглому поперечному сечению  $S_k = \pi r_0^2$ . Одним из подтверждений тому является то, что в сильноточном канале электрического газового разряда термодинамические электронные и ионные температуры его низкотемпературной плазмы в первом приближении характеризуются практически однородным распределением по его радиусу  $r_0$  [8]. Считаем, что в процессе воздействия канала молнии на рассматриваемое тонкостенное стальное покрытие округлая зона его привязки радиусом  $r_0$  остается практически неподвижной относительно стенки покрытия. Принимаем то допущение, что объем  $V_0$  расплавленного аperiodическим импульсом тока молнии  $i_L(t)$  металла покрытия определяет, в конечном счете, объем зоны его повреждения и при соответствующих условиях форму зоны его проплавления. Расчетную оценку результатов электротермического действия указанного сильноточного цилиндрического канала молнии на стальное покрытие ТО выполним в предположении неизменности в процессе короткого удара

грозового разряда основных теплофизических характеристик материала рассматриваемого покрытия ТО.

**2. Расчетная оценка результатов электротермического воздействия на тонкостенное стальное покрытие импульса тока молнии 10/350 мкс.** Как известно, термическое повреждение металлических и изоляционных (композиционных) элементов ТО в местах прямого удара в них молнии обусловлено наличием интенсивного теплового потока в плазменном канале грозового разряда [9]. Плотность  $g_L$  теплового потока в канале молнии, воздействующая на исследуемое стальное покрытие ТО, определяется плотностью  $\delta_L$  тока в нем (канале) и падением электрического напряжения  $U_{ac}$  в приэлектродной зоне плазменного канала рассматриваемого сильноточного разряда. Для оценки величины плотности  $g_L$  теплового потока, поступающего в стальное покрытие (в один из электродов в расчетной двухэлектродной воздушной системе грозового разряда) ТО, можно воспользоваться следующим приближенным соотношением [10, 11]:

$$g_L = \delta_L \cdot U_{ac}, \quad (1)$$

где  $U_{ac}$  – величина приэлектродного падения напряжения в области стального покрытия, выполняющего в двухэлектродной системе (ДЭС) роль катода при заданной положительной полярности тока молнии.

В соответствии с экспериментальными данными, представленными в [10], величина  $U_{ac}$  для основных проводниковых материалов расчетной ДЭС, используемых в летательных (наземных) аппаратах и иных ТО, изменяется в достаточно узком диапазоне, составляющем от 5 до 10 В. Применительно к рассматриваемому нами стальному покрытию-катоде величина  $U_{ac}$  численно составляет около 6,1 В [10]. Тогда, с учетом (1) для количества тепла  $Q$ , поступающего в стальное покрытие при прямом ударе в него молнии, можно записать следующее расчетное соотношение:

$$Q = \pi \int_0^{\infty} g_L r_0^2 dt = \pi U_{ac} \int_0^{\infty} \delta_L r_0^2 dt = U_{ac} q_L, \quad (2)$$

где  $q_L = \int_0^{\infty} i_L(t) dt$  – количество электрического заряда

положительной полярности из плазменного канала молнии, протекающего через стальное покрытие.

С другой стороны, для величины количества тепла  $Q$ , выделившегося в материале стального покрытия при его поражении прямым ударом молнии, будет справедливо следующее расчетное соотношение [12]:

$$Q = m_0 [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m], \quad (3)$$

где  $m_0 = d_0 V_0$  – масса нагреваемого импульсным током молнии до температуры плавления  $\theta_m$  материала покрытия, имеющего плотность  $d_0$  и объем  $V_0$ ;  $C_0$  – теплоемкость материала покрытия;  $C_m$  – удельная теплота плавления материала покрытия.

**2.1. Расчетная оценка объема зоны расплавления в стенке стального покрытия.** Из (2) и (3) для величины объема  $V_0$  расплавленного материала стального покрытия ТО при воздействии на него короткого удара молнии получаем расчетное выражение вида:

$$V_0 = U_{ac} q_L d_0^{-1} [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что полученное нами описанным выше приближенным электрофизическим путем расчетное аналитическое соотношение для нахождения расплавленного импульсным апериодическим током молнии  $i_L(t)$  объема  $V_0$  тонкостенного стального покрытия ТО полностью соответствует оценочному соотношению, рекомендуемому в этом случае согласно [5] международным стандартом IEC 62305-1-2010 (см. в [5] Приложение D, формулу D.9). Ниже в табл. 1 приведены численные данные для основных электро- и теплофизических параметров используемой нами марки стали для тонкостенного покрытия кровли ТО.

Таблица 1  
Основные электро- теплофизические параметры для стали марки 12X18H10T при комнатной температуре ( $\theta_0=20$  °C) воздушной среды [1, 10, 13]

Параметр	Размерность	Значение
$U_{ac}$	В	6,1
$d_0$	кг/м <sup>3</sup>	7900
$C_0$	Дж/(кг·°C)	462
$\theta_m$	°C	1455
$C_m$	Дж/кг	$84 \cdot 10^3$

Тогда из (4) и данных табл. 1 следует, что для расчетной оценки величины расплавленного коротким ударом молнии объема  $V_0$  металла покрытия ТО необходимо знать лишь величину электрического заряда  $q_L$ , протекающего через исследуемое покрытие. Для нахождения величины заряда  $q_L$  по (2) используем следующее аналитическое выражение для апериодического импульса тока молнии  $i_L(t)$  временной формы 10/350 мкс, протекающего по покрытию ТО [14, 15]:

$$i_L(t) = k_L I_{mL} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (5)$$

где  $\alpha_1 \approx 0,76/T_2$ ,  $\alpha_2 \approx 2,37/T_1$  – соответственно коэффициенты формы апериодического импульса тока молнии с заданными АВП;  $k_L = [(\alpha_1/\alpha_2)^\beta - (\alpha_1/\alpha_2)^\gamma]^{-1}$  – нормирующий коэффициент;  $\beta = \alpha_1/(\alpha_2 - \alpha_1)$ ;  $\gamma = \alpha_2/(\alpha_2 - \alpha_1)$ .

В результате с учетом (5) для величины электрического заряда  $q_L$ , протекающего при используемой временной форме  $T_1/T_2=10/350$  мкс апериодического импульса тока через поражаемое коротким ударом молнии исследуемое стальное покрытие ТО, находим:

$$q_L = \int_0^\infty i_L(t) dt \approx k_L I_{mL} [1,315T_2 - 0,422T_1]. \quad (6)$$

Расчетная численная оценка величины заряда  $q_L$  по предлагаемому соотношению (6) показывает, что при заданной временной форме  $T_1/T_2=10/350$  мкс импульса тока молнии  $i_L(t)$  по (5) с найденным нами нормирующим коэффициентом  $k_L \approx 1,054$  и нормированных согласно техническим требованиям [5] амплитудах этого импульсного тока  $I_{mL}=100$  кА и  $I_{mL}=200$  кА она (величина заряда  $q_L$ ) принимает соответственно численные значения 48,1 и 96,2 Кл. Эти оценочные по (6) значения заряда  $q_L$  для указанных выше двух нормированных случаев лишь на не более чем 4 % отличаются от его (заряда) соответствующих нормированных значений, принимающих по требованиям [5] численные показатели в 50 и 100 Кл. Учитывая последнее, соотношение (6) может быть использовано в области молниезащиты ТО для расчетных

оценок величины электрического заряда  $q_L$ , протекающего через металлическое покрытие ТО при прямом воздействии на него короткого удара молнии.

При определении последствий электротермического воздействия короткого удара молнии на металлическое или изоляционное (композиционное) покрытие ТО важным параметром такого действия является нормированный в [5] интеграл действия  $J_L$  импульсного тока молнии  $i_L(t)$  (удельная энергия с размерностью Дж/Ом). Используя (5), для интеграла действия  $J_L$  апериодического импульса тока молнии  $i_L(t)$  временной формы  $T_1/T_2=10/350$  мкс в принятом приближении получаем следующее расчетное соотношение:

$$J_L = \int_0^\infty i_L^2(t) dt \approx k_L^2 I_{mL}^2 [0,658T_2 - 0,633T_1]. \quad (7)$$

Из (7) при  $T_1/T_2=10/350$  мкс ( $k_L \approx 1,054$ ) в нормируемых по требованиям [5] случаях, когда  $I_{mL}=100$  кА или  $I_{mL}=200$  кА, следует, что величина интеграла действия  $J_L$  принятого апериодического импульса тока молнии  $i_L(t)$  принимает соответственно расчетные численные значения  $2,49 \cdot 10^6$  и  $9,96 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с. Эти полученные нами оценочные значения величины интеграла действия  $J_L$  рассматриваемого импульса тока молнии не более чем на 1 % отличаются от нормируемых при этом в [5] численных значений  $J_L$ , составляющих соответственно  $2,5 \cdot 10^6$  и  $10 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с. Поэтому соотношение (7) может использоваться в области молниезащиты ТО при расчетных оценках величины интеграла действия  $J_L$  апериодического импульса тока линейной молнии временной формы  $T_1/T_2=10/350$  мкс, воздействующего на металлическое или изоляционное (композиционное) покрытие защищаемого ТО.

**2.2. Расчетная оценка глубины лунки проплавления стенки стального покрытия.** Исходя из (4) и цилиндрической формы указанным радиусом  $r_0$  лунки термического повреждения на наружной поверхности исследуемого металлического покрытия ТО из-за действия сильноточного канала молнии, для глубины  $h_m$  лунки проплавления получаем:

$$h_m = 36,8 \cdot U_{ac} q_L d_0^{-1} I_{mL}^{-2/3} t_{mL}^{-1} [C_0(\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1}. \quad (8)$$

Из (8) при нормированной амплитуде  $I_{mL} \approx 184$  кА импульса тока короткого удара искусственной молнии временной формы  $T_1/T_2=15/315$  мкс ( $t_{mL} \approx 24$  мкс;  $k_L \approx 1,083$ ;  $q_L \approx 81,3$  Кл), имитированного нами в лабораторных условиях (см. ниже раздел 4), и исходных электро- и теплофизических параметрах для нержавеющей стали марки 12X18H10T рассматриваемого тонкостенного ( $h \leq 1$  мм) покрытия ТО, приведенных в табл. 1, для глубины  $h_m$  лунки проплавления следует, что она численно составляет около 39,8 мкм. При этом максимальный радиус  $r_0 \approx 0,093 \cdot (I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}$  цилиндрической лунки проплавления для стального покрытия оказывается численно равным около 25,9 мм.

**2.3. Расчетная оценка радиуса лунки сквозного проплавления стенки стального покрытия.** Исходя из (4), для тонкостенного стального покрытия, когда с учетом (8) выполняется условие сквозного проплавления импульсным апериодическим током молнии  $i_L(t)$  временной формы  $T_1/T_2=10/350$  мкс его стенки  $h_m \geq h$ , расчетное соотношение для радиуса  $r_m$

лунки сквозного проплавления стенки исследуемого покрытия принимает следующий приближенный вид:

$$r_m = \{U_{ac} q_L (\pi \pi h_0)^{-1} [C_0 (\theta_m - \theta_0) + C_m]\}^{1/2}. \quad (9)$$

Количественная оценка по (9) величины радиуса  $r_m$  округлой лунки сквозного проплавления стенки рассматриваемого стального покрытия ТО толщиной  $h \approx h_m \approx 40$  мкм коротким ударом молнии с указанными нормированными по [5] значениями АВП импульсного тока ( $I_{mL} \approx 184$  кА;  $T_1 \approx 15$  мкс;  $T_2 \approx 315$  мкс;  $k_L \approx 1,083$ ;  $q_L \approx 81,3$  Кл) показывает, что в этом случае она принимает численное значение, примерно равное 25,9 мм. Видно, что в рассматриваемом приближении численное значение радиуса  $r_m$  лунки сквозного проплавления стенки покрытия практически соответствует расчетному значению максимального радиуса  $r_0$  канала молнии, определяемому приведенной выше формулой Брагинского [6]. Данный результат указывает на достоверность полученного расчетного соотношения (9).

**3. Расчетная оценка температуры плазмы сильноточного канала грозового воздушного искрового разряда.** При комплексном подходе к рассматриваемой нами электрофизической задаче специалистам важно ориентироваться в численных уровнях температуры, возникающих в сильноточных воздушных искровых разрядах молнии и непосредственно воздействующих на наружные элементы защищаемых ТО. При этом будем считать, что для низкотемпературной плазмы сильноточного воздушного искрового разряда молнии при временах  $t \leq t_{mL}$  выполняется условие ее неизотермичности, при котором в ней (плазме) максимальная температура  $T_{me}$  носителей электронного тока превышает максимальную температуру  $T_{mi}$  носителей ионного тока ( $T_{me} > T_{mi}$ ) [12]. Используя результаты прикладных исследований, приведенные в [11, 15], для максимальной электронной температуры  $T_{me}$  плазмы канала короткого разряда молнии в атмосферном воздухе при нормальных условиях (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура равна  $\theta_0 = 0$  °С [12]) можно записать следующее приближенное расчетное соотношение:

$$T_{me} \approx 3,28 \cdot \sqrt[4]{I_{mL}^{1/3} U_{ac} / (\sigma_c t_{mL})}, \quad (10)$$

где  $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)<sup>-1</sup> – постоянная Стефана-Больцмана [12].

Подставив в (10) при  $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)<sup>-1</sup> и  $U_{ac} = 6,1$  В соответствующие исходные численные данные для нормированного по требованиям [5] апериодического импульса тока молнии временной формы  $T_1/T_2 = 10/350$  мкс ( $I_{mL} \approx 2 \cdot 10^5$  А;  $t_{mL} \approx 16 \cdot 10^{-6}$  с), находим, что в исследуемом случае максимальная электронная температура  $T_{me}$  плазмы сильноточного канала грозового воздушного разряда численно составляет  $T_{me} \approx 14,6 \cdot 10^3$  К. Следует отметить, что полученное по (10) численное значение для электронной температуры  $T_{me}$  хорошо согласуется с приведенными в [16, 17] известными экспериментальными результатами для рассматриваемых температур плазменных сильноточных каналов воздушных искровых разрядов, широко применяемых в электротехнологиях, базирующихся на основе высоковольтной импульсной техники [18].

**4. Опытная оценка результатов электротермического воздействия на тонкостенное стальное покрытие импульса тока молнии 10/350 мкс.** Экспериментальную проверку работоспособности некоторых приведенных нами расчетных соотношений (в частности, (4), (6), (8) и формулы Брагинского для  $r_0$ ) выполним на разработанном и созданном в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в 2014 году уникальном мощном высоковольтном генераторе типа ГИТМ-10/350 [19, 20], моделирующем на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке апериодические импульсы тока искусственной молнии временной формы  $T_1/T_2 = 10/350$  мкс в соответствии с действующими требованиями международного стандарта IEC 62305-1-2010 [5]. С этой целью в воздушную ДЭС сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350, размещенную на рабочем столе данного высоковольтного генератора, при  $\theta_0 \approx 20$  °С помещались опытные листовые образцы из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, имеющие размер в плане 500 x 500 мм и толщину  $h = 1$  мм. Отметим, что в использованной в экспериментах ДЭС с верхним электродом цилиндрической формы диаметром 25 мм, выполненным из стали марки Ст. 3, длина воздушного зазора между его закругленным по радиусу около 12,5 мм краем и опытным листовым образцом из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т составляла примерно 14 мм. Для инициирования над опытным стальным образцом сильноточного плазменного канала искрового разряда короткого удара искусственной молнии в воздушный промежуток ДЭС помещалась тонкая медная проволока диаметром 0,2 мм и длиной около 37 мм, закрепленная на ее верхнем стальном электроде и подходящая нормально сверху к плоскости опытного образца стальной кровли ТО с воздушным зазором длиной примерно в 3 мм.

Измерение АВП апериодического импульса тока искусственной молнии, формируемого в сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350 и воздействующего на опытный листовый образец стальной кровли ТО проводилось с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [4], имеющего коэффициент преобразования  $K_{mL} \approx 10417$  А/В, и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. На рис. 1 приведена осциллограмма получаемого в рассматриваемом случае с помощью высоковольтного ГИТМ-10/350 апериодического импульса тока  $i_L(t)$  искусственной молнии положительной полярности при коротком грозовом воздушном разряде.

Укажем, что при получении приведенной на рис. 1 осциллограммы апериодического импульса тока искусственной молнии в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТМ-10/350 три его генератора импульсных токов (ГИТ) содержали в общем количестве 171 шт. параллельно включенных и заряжаемых до постоянного электрического напряжения  $U_{c1-3} \approx 17$  кВ высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3, а четвертый ГИТ был построен на основе 288 шт. последовательно-параллельно включенных и параллельно заряжаемых до постоянного электрического напряжения  $U_{c4} \approx 4,5$  кВ высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140

(на их выходе) [19, 20]. Из данных рис. 1 следует, что воздействующий в указанном случае на опытный листовый образец стальной кровли импульс тока короткого удара искусственной молнии в целом соответствует жестким требованиям международного стандарта IEC 62305-1-2010 [5] применительно к III–IV уровням молниезащиты ТО. Подтверждением тому является то, что основные АВП протекающего через опытный стальной образец ТО толщиной  $h=1$  мм нормированного импульса тока имитированной молнии при этом имели следующие численные значения:  $I_{mL} \approx 100$  кА;  $T_1 \approx 15$  мкс;  $T_2 \approx 315$  мкс;  $q_L \approx 44,2$  Кл;  $J_L \approx 2,32 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с.

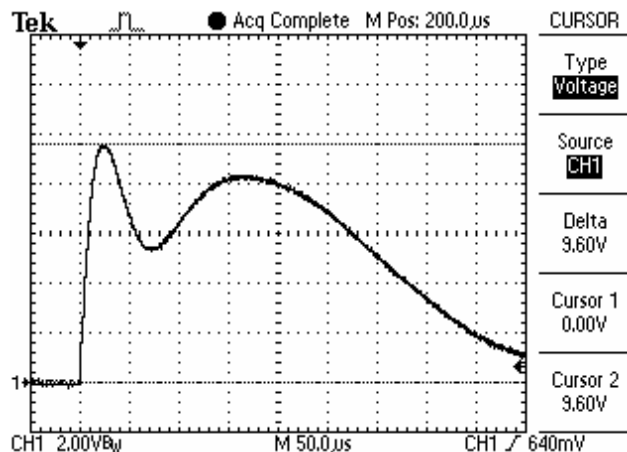


Рис. 1. Осциллограмма нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой  $I_{mL} \approx 100$  кА ( $q_L \approx 44,2$  Кл;  $J_L \approx 2,32 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с), воздействующего в цепи ГИТМ-10/350 на опытный тонкостенный ( $h=1$  мм) листовый образец наружной кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

На рис. 2 показана осциллограмма нормированного по техническим требованиям [5] аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы  $T_1/T_2=15/315$  мкс, воздействующего в высокоомной разрядной цепи ГИТМ-10/350 на опытный образец стальной кровли ТО и практически соответствующего I уровню молниезащиты ТО ( $I_{mL} \approx 184$  кА;  $T_1 \approx 15$  мкс;  $T_2 \approx 315$  мкс;  $q_L \approx 81,3$  Кл;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с).

Из локального скачкообразного «хода» на рис. 2 кривой импульса тока короткого удара искусственной молнии (на его спаде) в разрядной цепи мощной электроустановки ГИТМ-10/350 ( $U_{c1-3} \approx 31$  кВ;  $U_{c4} \approx 9,4$  кВ), размещенной на экспериментально-испытательном исследовательском полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (в отделе №4 «Электромагнитных исследований и испытаний»), протекающего через опытный листовый стальной образец кровли ТО и измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300, следует, что данный импульс тока молнии  $i_L(t)$  с указанным нормированным по [5] значением интеграла действия  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с приводит к большим электротермическим и электродинамическим воздействиям не только на исследуемый стальной образец (рис. 3), но и на токопроводящие элементы конструкции используемого коаксиального шунта. Укажем, что активное сопротивление высокоомной бифилярной цепи шунта типа ШК-300 составляло  $R \approx 0,2$  мОм [1, 4]. Численная

оценка тепловой энергии  $W_i$ , выделяющейся при проводимых высокоомных экспериментах на высокоомном тонкостенном нихромовом диске используемого измерительного шунта типа ШК-300 [4], может быть выполнена по следующей приближенной формуле:

$$W_i \approx R_i J_L^2. \quad (11)$$

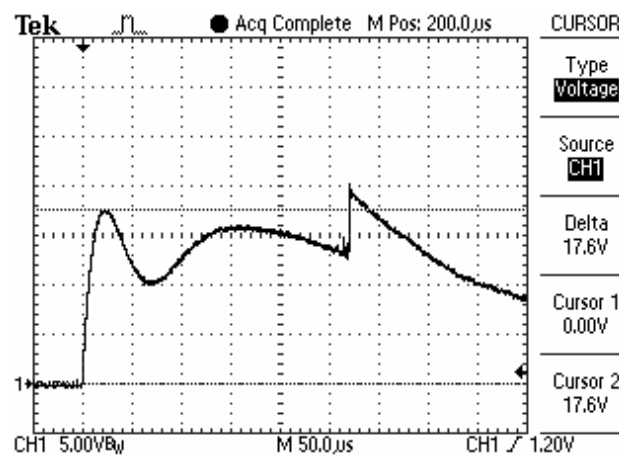


Рис. 2. Осциллограмма нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой  $I_{mL} \approx 184$  кА ( $q_L \approx 81,3$  Кл;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с), воздействующего в цепи ГИТМ-10/350 на опытный тонкостенный ( $h=1$  мм) листовый образец наружной кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

Из (11) при указанных исходных данных ( $R \approx 0,2$  мОм;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с) следует, что в рассматриваемом опыте ( $I_{mL} \approx 184$  кА;  $T_1 \approx 15$  мкс;  $T_2 \approx 315$  мкс;  $q_L \approx 81,3$  Кл) на измерительном шунте типа ШК-300 (в основном на его высокоомном нихромовом тонкостенном диске) выделяется энергия около  $W_i \approx 1,6$  кДж.

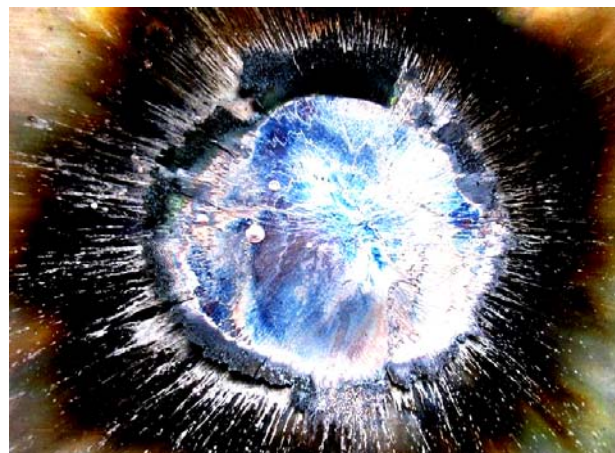


Рис. 3. Результаты электротермического воздействия нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой  $I_{mL} \approx 184$  кА на опытный тонкостенный ( $h=1$  мм) образец кровли ТО из нержавеющей стали марки 12X18H10T

Выполненные на высоковольтной высокоомной установке ГИТМ-10/350 эксперименты показали, что измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300 [4] разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (отдел № 3 «Высоковольтной импульсной техники») практически взрывообразного выделения в нем за счет явления электрического взрыва (ЭВ) металла его тонкостенно-

го нихромового диска [15] такого количества тепловой энергии  $W_i$  не выдерживает. Проведенные экспериментальные опыты показали, что величина выделяющейся на измерительном коаксиальном шунте ШК-300 [4] тепловой энергии  $W_i$  от протекания по нему аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы  $T_1/T_2=15/315$  мкс не должна численно превышать значения, равного 0,5 кДж. Это значение тепловой энергии  $W_i$  соответствует III–IV уровням молниезащиты ТО, когда  $I_{mL} \approx 100$  кА [5, 19]. В рассматриваемом случае более общим показателем рассеиваемой высокоомным тонкостенным нихромовым диском измерительного коаксиального шунта ШК-300 тепловой энергии является предельно допустимая удельная энергия  $W_i/R_i$ , равная предельно допустимому интегралу действия импульса тока молнии  $J_{Li}$  и численно составляющая около  $2,5 \cdot 10^6$  Дж/Ом.

На рис. 4 приведен внешний вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [4] как до, так и после протекания по нему в сильноточной разрядной цепи ГИТМ-10/350 нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой  $I_{mL} \approx 184$  кА ( $q_L \approx 81,3$  Кл;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с). Видно, что этот импульс тока короткого удара имитированной молнии приводит из-за ЭВ определенной части металла тонкостенного нихромового диска измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [4], сопровождающегося резким повышением давления внутри коаксиальной конструкции шунта, к его разрушению и выходу из строя.



Рис. 4. Общий вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 до (слева) и после (справа) протекания через него в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТМ-10/350 нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой  $I_{mL} \approx 184$  кА ( $q_L \approx 81,3$  Кл;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с)

Из данных рис. 3 видно, что прямое воздействие на опытный листовый образец кровли ТО из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной  $h=1$  мм нормированного аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс с амплитудой  $I_{mL} \approx 184$  кА ( $q_L \approx 81,3$  Кл;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с), формируемого в разрядной цепи ГИТМ-10/350, приводит к существенному термическому повреждению лишь его (образца) наружной поверхности в округлой зоне привязки на ней цилиндрического канала сильноточного воздушного искрового разряда имитированной молнии на стадии ее короткого удара. При этом радиус зоны термического повреждения рассматриваемого стального покрытия соответствует радиусу  $r_0 \approx 0,093 \cdot (I_{mL})^{1/3} \cdot (t_{mL})^{1/2}$  согласно формуле

Брагинского для сильноточного плазменного канала искусственного воздушного грозового разряда [6, 7], составляющему около 27 мм. Одной из особенностей данной зоны повреждения является образование по ее округлому периметру торчащей наружу в отрыве от наружной поверхности исследуемого листового покрытия пикообразной стальной «бороды» длиной до 15 мм, толщина которой составляет примерно 40 мкм. Образование подобной «бороды» при прямом воздействии в воздухе на рассматриваемое стальное покрытие короткого удара искусственной молнии с импульсом тока временной формы  $T_1/T_2=15/315$  мкс связано с поверхностным расплавлением стального покрытия в округлой зоне привязки на нем канала молнии и последующим радиальным выбросом наружу расплавленного металла из-за действующих на него электродинамических сил Лоренца [12]. Обследование эпицентра зоны термического повреждения испытываемого в разрядной цепи ГИТМ-10/350 стального покрытия ТО показывает, что в этом случае ( $I_{mL} \approx 184$  кА;  $q_L \approx 81,3$  Кл;  $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с) глубина  $h_m$  лунки проплавления стенки покрытия из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т ( $h = 1$  мм) не превышает 42 мкм. Данное полученное опытным путем численное значение глубины  $h_m$  практически соответствует ее расчетному значению, определенному нами ранее по (8).

#### Выводы.

1. Результаты выполненных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» оценочных расчетных и экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных листовых образцов наружной кровли защищаемого ТО размером в плане 500 х 500 мм из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной  $h=1$  мм к прямому воздействию на них в воздухе нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс с соответствующими допусками на его АВП указывают на то, что исследуемые тонкостенные стальные образцы ТО подвергаются лишь локальному поверхностному термическому повреждению. При указанном действии импульсного тока короткого удара искусственного воздушного грозового разряда, удовлетворяющего требованиям I–IV уровней молниезащиты ТО, глубина  $h_m$  лунки приповерхностного проплавления стенки ( $h=1$  мм) исследуемого стального покрытия не превышает 50 мкм, а ее максимальный радиус  $r_0 = 30$  мм.

2. Установлено, что предельно допустимым уровнем тепловой энергии  $W_i$ , рассеиваемой измерительным коаксиальным шунтом ШК-300 с высокоомным тонкостенным нихромовым диском в сильноточной разрядной цепи высоковольтной электроустановки ГИТМ-10/350 с нормированным по международному стандарту IEC 62305-1-2010 аperiodическим импульсом тока искусственной молнии временной формы 15/315 мкс, является ее численное значение, не превышающее 0,5 кДж и соответствующее требованиям III–IV уровней молниезащиты ТО. Это предельно допустимое значение рассеиваемой указанным шунтом тепловой энергии  $W_i$  соответствует для него такому обобщенному показателю как удельная рассеиваемая им тепловая энергия, определяемая в виде

$W_i/R_i$  и численно равная предельно допустимому для его цепи с сопротивлением  $R_i$  интегралу действия импульса тока искусственной молнии  $J_L \approx 2,5 \cdot 10^6$  Дж/Ом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Князев В.В., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Результаты расчетно-экспериментальных исследований электротермической стойкости опытных образцов из листовой стали к воздействию нормированных компонент импульсного тока искусственной молнии // *Электротехника і електроμηχανіка*. – 2016. – №3. – С. 40-49. doi: [10.20998/2074-272X.2016.3.07](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.3.07).
2. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
3. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
4. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – №3. – С. 81-85. doi: [10.1134/s0020441208030123](https://doi.org/10.1134/s0020441208030123).
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Точка, 2010. – 407 с.
8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
9. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
10. Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии // *Электричество*. – 1986. – №11. – С. 22-27.
11. Баранов М.И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №5. – С. 18-21.
12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
13. [http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik\\_stalej/12h18n10t](http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik_stalej/12h18n10t).
14. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
15. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.
16. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
17. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
18. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
19. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами // *Электротехніка і електроμηχανіка*. – 2015. – №1. – С. 51-56. doi: [10.20998/2074-272X.2015.1.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.10).
20. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial light-

ning with a rationed temporal form of  $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$  with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2015. – vol.58. – no.6. – pp. 745-750. doi: [10.1134/s0020441215060032](https://doi.org/10.1134/s0020441215060032).

#### REFERENCES

1. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Results of calculation-experimental investigations of electro-thermal resistibility of sheet steel samples to action of rationed components of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 40-49. (Rus). doi: [10.20998/2074-272X.2016.3.07](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.3.07).
2. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
3. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
4. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: [10.1134/s0020441208030123](https://doi.org/10.1134/s0020441208030123).
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Lozanskiy E.D., Firsov O.B. *Teoriya iskry* [Theory of spark]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 272 p. (Rus).
7. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektiv i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2010. 407 p. (Rus).
8. Rayzer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas charge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).
9. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. *Molnija i molniezashchita* [Lightning and protection from lightning]. Moscow, Znak Publ., 2003. 330 p. (Rus).
10. Abramov N.R., Kuzhekin I.P., Larionov V.P. Characteristics of penetration of the walls of metal objects when exposed to lightning. *Electricity*, 1986, no.11, pp. 22-27. (Rus).
11. Baranov M.I. An approximate calculation of the maximum temperature of the plasma in high-current high-voltage spark discharge channel switch air atmospheric pressure. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2010, no.5, pp. 18-21. (Rus).
12. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
13. Available at: [http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik\\_stalej/12h18n10t](http://www.sgkarkas.ru/spravochnik/marochnik_stalej/12h18n10t) (Accessed 11 July 2015).
14. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
15. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektiv i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).
16. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snykh tokov i magnitnykh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
17. Gulyi G.A. *Nauchnyye osnovy razriadno-impul'snykh tekhnologii* [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
18. Mesiats G.A. *Impul'snaya energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
19. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A powerful high-voltage generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters

rated on an International Standard IEC 62305-1-2010. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 51-56. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.10.

20. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10  $\mu$ s/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.

Поступила (received) 29.08.2016

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., гл.н.с.,  
Князев Владимир Владимирович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,  
Рудаков Сергей Валерьевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,  
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,  
тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg\_73@i.ua

M.I. Baranov<sup>1</sup>, V.V. Kniaziev<sup>1</sup>, S.V. Rudakov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> National University of Civil Protection of Ukraine,  
94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

**Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel.**

**Purpose.** Calculation and experimental researches of electro-thermal resistibility of the pre-production thin-walled sheet models of outward roof of height technical buildings from stainless steel are easily soiled 12X18H10T to direct action on them rationed by the International Standard IEC 62305-1-2010 aperiodic impulse of current of short bow of artificial lightning of temporal form 10/350  $\mu$ s with the proper admittances on his peak-temporal parameters (PTP). **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high voltage and large impulsive currents (LIC), and also scientific and technical bases of planning of high-voltage impulsive devices and measuring methods in them LIC with followings below extreme PTP: amplitude of impulse of current of  $I_{mL}=200$  kA (with admittance  $\pm 10$  %); integral of

action of impulse of current of  $J_L=10 \cdot 10^6$  A<sup>2</sup>·s (with admittance  $\pm 35$  %); duration of wavefront current of  $T_1=10$   $\mu$ s (with admittance  $\pm 20$  %); time, proper amplitude of impulse of current of  $I_{mL}$ ,  $t_{mL} \leq 24$   $\mu$ s (with admittance  $\pm 20$  %); duration of flowing of impulse of current of  $T_2=350$   $\mu$ s (with admittance  $\pm 10$  %).

**Results.** The results of evaluation calculation and experimental researches of electro-thermal resistibility of the indicated pre-production sheet models are resulted measuring in the plan of 0,5 x 0,5 m from stainless steel are easily soiled the 12X18H10T thickness of 1 mm to action on them of aperiodic impulse of current of short blow of artificial lightning with rationed PTP on the requirements of the International Standard IEC 62305-1-2010. In high current experiments amplitude of  $I_{mL}$  of the aperiodic rationed impulse of current of artificial lightning of temporal form of  $T_1/T_2=15$   $\mu$ s/315  $\mu$ s changed in the range of (100-184) kA. The integral of action of  $J_L$  of impulse of current for I-IV of levels of protection of lightning of technical objects (TO) numeral made from  $2,32 \cdot 10^6$  A<sup>2</sup>·s to  $7,88 \cdot 10^6$  A<sup>2</sup>·s, and the flowing through the probed pre-production steel models electric charge of  $q_L$  numeral changed from 44,2 Kl to 81,3 Kl. It is shown that direct influence rationed by the International Standard IEC 62305-1-2010 impulse of current of short blow of artificial lightning with in-use PTP on the indicated pre-production steel models causes in them the rounded small hole of melting of surface of coverage a depth no more than 50  $\mu$ m and diameter no more than 60 mm. The results of calculation and experiment coincide within the limits of 5 %. **Originality.** First in world practice on the unique generator of LIC of short blow of artificial lightning of type of GITM-10/350 experimental researches of electro-thermal resistibility of pre-production sheet models of outward roof are conducted TO of stainless steel 12X18H10T is easily soiled to direct action on them of impulses of current of an artificial storm air spark digit with extreme parameters. **Practical value.** Drawing on the got results in practice of protection height TO from linear lightning will allow substantially to promote their functional and fire-prevention safety in the conditions of direct action on them of the plasma ductings of high current storm air spark discharge. References 20, tables 1, figures 4.

**Key words:** artificial lightning impulse current of temporary shape 10/350  $\mu$ s, thin-walled coverage made of stainless steel, electro-thermal effect of lightning current to the steel cover, radius and depth of penetration of the steel wall coverage, calculation and experimental estimation of damage zone of coverage.



Д.В. Винников, К.В. Корытченко, В.И. Ткачев, В.В. Егоренков, Д.В. Кудин, Т.Ю. Мирная

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОПРОВОДНОЙ ВОДЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ПОДВОДНЫХ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ

*Надані результати експериментального дослідження змінення фізико-хімічних властивостей водопровідної води під впливом потужних підводних іскрових розрядів атмосферного тиску. Виявлена залежність змінення окисно-відновлювального потенціалу і рН оброблюваної води від параметрів імпульсів, що задаються параметрами електричного розрядного кола, та їх кількості. Дослідження проведені на розрядних електродах, виготовлених з матеріалів двох типів: нержавіюча сталь і графіт. Бібл. 10, табл. 5, рис. 13.*

*Ключові слова:* підводний іскровий розряд, матеріал електродів, властивості води, окисно-відновлювальний потенціал, водневий показник рН.

*Представлены результаты экспериментального исследования изменения физико-химических свойств водопроводной воды под воздействием мощных подводных искровых разрядов атмосферного давления. Выявлена зависимость изменения окислительно-восстановительного потенциала и рН обрабатываемой воды от параметров импульсов, задаваемых параметрами электрической разрядной цепи, и их количеством. Исследования проведены на разрядных электродах, изготовленных из материалов двух типов: нержавеющей стали и графит. Библ. 10, табл. 5, рис. 13.*

*Ключевые слова:* подводный искровой разряд, материал электродов, свойства воды, окислительно-восстановительный потенциал, водородный показатель рН.

**Введение.** Мощные подводные искровые разряды (ПИР) нашли широкое применение в различных областях промышленности и науки. Это разрушение и деформация материалов, очистка технологических отверстий, изменение физико-химических свойств жидких сред и их обеззараживание [1-3].

Подводный разряд характеризуется множеством физических факторов, воздействующих на обрабатываемую среду, как на стадии пробоя, так и на последующих стадиях развития разряда. К этим факторам относятся: воздействие сильного электрического поля на среду в предпробойной стадии разряда, ударное сжатие окружающей среды, интенсивное ее импульсное облучение в широком диапазоне длин волн, термическое воздействие в области токопроводящего канала, выброс в парогазовую среду высокотемпературных мелкодисперсных частиц материала электродов в результате электроэрозии, кавитационные процессы. Такое многофакторное воздействие позволяет не только изменять физико-химические свойства обрабатываемой среды, но, из-за развития интенсивных гидрогазодинамических течений в больших объемах, реализовать на основе ПИР электрохимические реакторы идеального смешения дискретного действия. Таким образом, дискретность воздействия и идеальное смешение являются основными отличительными характеристиками электрохимических реакторов на основе мощных ПИР.

Одними из основных показателей, характеризующих воздействие разряда на химический состав воды, являются показатель рН и окислительно-восстановительный потенциал (ОВП – redox potential). Изменение этих показателей приводит к активации воды. Установлено [4], что для нормального протекания биохимических процессов в организме человека ОВП питьевой воды должен соответствовать ОВП межклеточной жидкости и находиться в диапазоне от +100 до –200 mV. ОВП питьевой практически всегда

больше нуля, и обычно находится в пределах от +100 до +400 mV [4]. Вода с ОВП ниже –200 mV обладает высокой биологической активностью, и её приём должен быть ограничен.

Из-за большого количества воздействующих факторов ПИР, представляет трудность выявить влияние каждого из них в отдельности на изменение свойств обрабатываемой жидкости. В тоже время, для управляемого изменения физико-химических свойств воды, необходимо количественно оценить изменение требуемых свойств жидкости в используемом химическом реакторе в зависимости от параметров разрядных импульсов и их количества.

**Цель работы** – исследование на установке «ГИДРА» [4] зависимости изменения ОВП и рН обрабатываемой воды от количества импульсов, а также их параметров, задаваемых такими параметрами электрической разрядной цепи как емкость и зарядное напряжение накопителя.

**Постановка эксперимента.** Устройство установки «ГИДРА» и возможные области ее применения ранее описаны в работах [4-6]. Общий вид реактора установки «ГИДРА» и электрическая схема представлены на рис. 1, 2.

Батарея конденсаторов  $C_1$  через управляемый трехэлектродный воздушный разрядник  $F$  разряжается на химический реактор 1, электроды которого 2 и 3 образуют разрядный промежуток  $l$  и подключенное параллельно ему демпфирующее сопротивление  $R_d$ . В конденсаторной батарее использовались импульсные конденсаторы типа ИК-100/0,4 и ИК-100/0,25.

Зарядка конденсаторной батареи  $C_1$  осуществляется от источника постоянного напряжения, образованного следующими элементами: зарядным устройством  $CU$  в виде повышающего высоковольтного трансформатора УРС-70 и автотрансформатора; однополупериодным выпрямителем  $VD$  в виде последовательно соединенных диодных сборок типа КЦ-201Е; заряд-

ным сопротивлением  $R_I$ , набранного из последовательного соединения резисторов типа ТВО-60 с эквивалентным сопротивлением 270 kOhm.

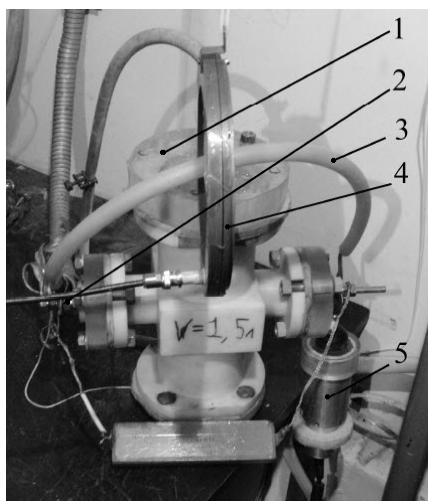


Рис. 1. Общий вид электрохимического реактора:  
1 – корпус реактора; 2, 3 – токопроводы к разрядным электродам; 4 – пояс Роговского; 5 – делитель напряжения

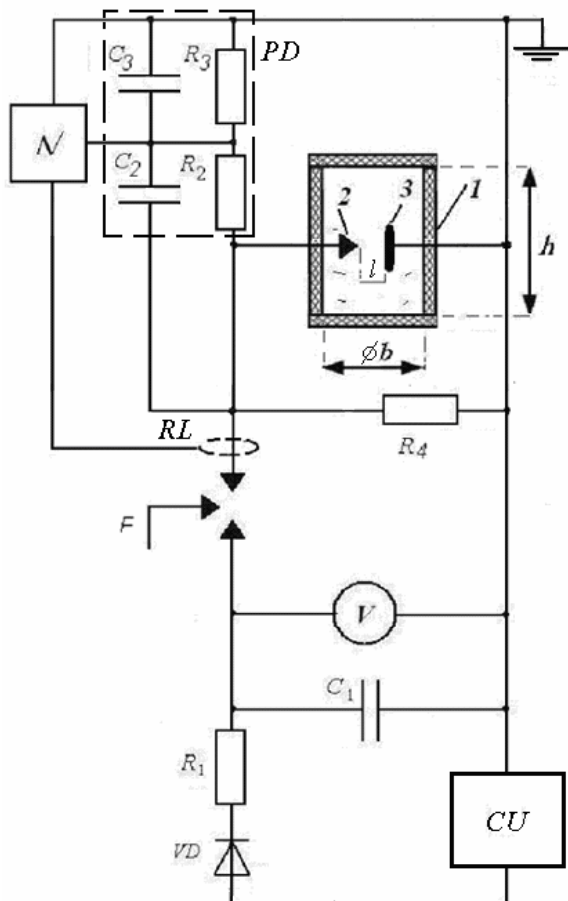


Рис. 2. Электрическая схема установки «ГИДРА»:  
1 – электроразрядный химический реактор;  
2, 3 – разрядные электроды

Работа воздушного разрядника  $F$  осуществлялась в качестве двух- или трех- электродного разрядника. В случае работы разрядника  $F$  без использования третьего электрода напряжение заряда конденсаторной батареи регулировалось величиной межэлектродного промежутка разрядника  $F$ . При использовании

третьего управляющего электрода разрядника напряжение заряда конденсаторной батареи регулировалось при помощи автотрансформатора. Зарядное напряжение конденсаторной батареи равнялось 10 kV, 15 kV и 20 kV.

Напряжение заряда конденсаторной батареи  $C_1$  измерялось электростатическим киловольтметром типа С 196. Паспортная погрешность составляла  $\pm 1\%$  от максимального значения диапазона измерений.

Измерение разрядного тока осуществлялось поясом Роговского  $RL$ , имеющего чувствительность 3627 A/V. Определение чувствительности датчика  $PP$  осуществлялась на частоте 2,2 МГц по паспортизированному безиндукционному датчику тока CSNM 191 фирмы Honeywell с выходом по току и работающему на эффекте Холла. Результаты сравнения эталонного сигнала, получаемого с датчика CSNM 191, и сигнала с изготовленного пояса Роговского представлены на рис. 3. Относительная погрешность эталонного сигнала не превышала  $\pm 0,5\%$ .

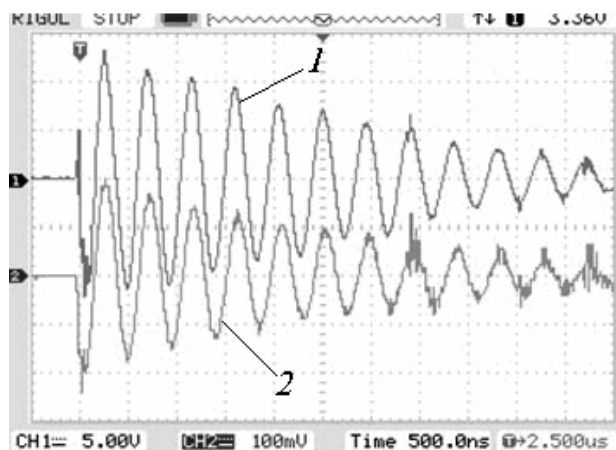


Рис. 3. Результаты осциллографирования разрядного тока:  
1-й канал – датчиком тока CSNM 191;  
2-й канал – изготовленным поясом Роговского

Напряжение на разрядном промежутке измерялось с помощью компенсированного емкостно-омического делителя напряжения  $PD$  фирмы North Star High voltage типа  $PVM-12$  с коэффициентом деления 1:1000, полосой пропускания 80 МГц и максимальным напряжением в импульсе 32 kV.

Демпфирование высокочастотных электрических колебаний, возникающих из-за наличия паразитных емкостей цепи, обеспечивалось резистором  $R_4$ , подключенным параллельно разрядному промежутку.  $R_4$  безындуктивный резистор типа ТВО-60 номиналом 47 kOhm.

Регистрация напряжения на промежутке и разрядного тока производилась на двухканальном электронном осциллографе фирмы ATEN типа ADS 1102 CAL<sup>+</sup> с полосой пропускания 100 МГц и частотой дискретизации 1 GSa/s. Развертка сигналов осуществлялась в ждущем режиме по фронту входного сигнала с делителя напряжения.

Электрохимический реактор представлял собой диэлектрическую камеру, корпус которой был изготовлен из капролона (рис. 2). Толщина стенки корпуса 5 mm. Высота камеры  $h = 240$  mm, ее

диаметр  $b = 90$  мм. Использовалась система электродов вида игла – полусфера (рис. 4). С целью исследования влияния материала электродов, были изготовлены две пары электродов: из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т и из графита для производства электроугольных изделий (ГОСТ 10274-79). Марка стали определялась рентгенофлуоресцентным методом на установке «СПРУТ». Электрод-игла имел форму конуса с углом  $60^\circ$  при высоте 25 мм и диаметре основания 30 мм. Радиус полусферы второго электрода 10 мм. Токовводы в виде шпилек, к которым крепились электроды, были помещены в диэлектрик, для предотвращения их окисления, уменьшения предпробивных потерь. Величина межэлектродного промежутка  $l$  варьировалась в диапазоне 1...5 мм.

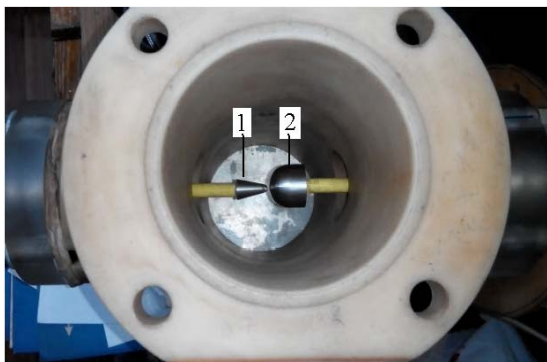


Рис. 4. Внешний вид разрядных электродов: 1 – игла; 2 – полусфера

Промышленные конденсаторы типа ИК-100/0,4 и ИК-100/0,25 имеют высокий разброс номинальных значений (допустимое отклонение  $\pm 10\%$ ), что не позволяет с достаточной точностью рассчитать полную энергию разряда. Абсолютная ошибка определения емкости возрастала при соединении конденсаторов в конденсаторную батарею. Для получения уточненных значений полной емкости, проводилось ее измерение двумя способами: косвенным способом по результатам осциллографирования изменения напряжения в процессе разряда конденсаторной батареи и прямым измерением с помощью приборов.

В косвенном способе параметры зарядной цепи подбирались таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$R_c \gg 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где  $R_c$  – зарядное сопротивление;  $C$  – емкость конденсаторной батареи;  $L$  – эквивалентная индуктивность зарядной цепи.

Также выполнялось условие по соотношению сопротивлений в виде:

$$R_c \gg R_{ir}, \quad (2)$$

где  $R_{ir}$  – внутреннее сопротивление источника постоянного тока.

В этом случае емкость конденсатора  $C$  рассчитывается из постоянной времени  $\tau$ , определяемой экспериментально, по выражению:

$$C = \tau/R_c. \quad (3)$$

Емкости заряжались от источника постоянного напряжения  $U_{const} = 4$  В. Зарядное сопротивление рав-

нялось  $R_c = 1 \pm 0,01$  МОhm. Результаты измерения напряжения на конденсаторе представлены на рис. 5. Из представленной осциллограммы напряжения видно, что снижение напряжения от  $-4$  В до  $U_{const}/e = -1,47$  В происходит через  $\tau = 390$  ms. Отсюда, в данном случае имеем  $C = 0,39$   $\mu$ F.

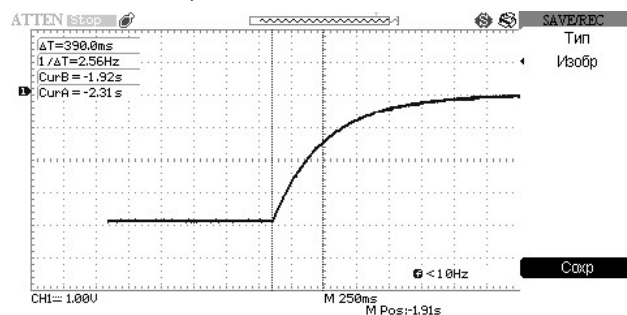


Рис. 5. Определение  $\tau$  из кривой напряжения на конденсаторе при его разряде

Также емкость конденсаторных сборок измерялась с помощью измерителя LCR цифрового Е 7–8, имеющего погрешность в диапазоне измерений до 10  $\mu$ F не более  $\pm 1,6$  nF, и измерителя DL-6243. Результаты измерений представлены в табл. 1.

В расчетах принималось значение емкости конденсаторной батареи, определяемое методом наименьших квадратов (МНК) по представленным результатам измерений: для № 1 принималось  $C = 1,037$   $\mu$ F, для № 2 –  $C = 1,924$   $\mu$ F, для № 3 –  $C = 2,947$   $\mu$ F.

Таблица 1  
Результаты измерения емкостей конденсаторных батарей в  $\mu$ F

Номер батареи	Способ измерения			
	косвенный	Прибор Е 7-8	Прибор DL 6243	МНК
№ 1	1,05	1,0495 $\pm$ 0,0016	1,013	1,037
№ 2	1,92	1,927 $\pm$ 0,0016	1,925	1,924
№ 3	2,95	2,947 $\pm$ 0,0016	2,945	2,947

При расчете энергии разряда, емкости батареи задавались по результатам пяти измерений с их обработкой методом наименьших квадратов.

Мощность ПИР значительной мерой задается индуктивностью разрядной цепи. Эквивалентная индуктивность цепи определялась из анализа кривой тока разряда в режиме короткого замыкания по выражению [7]:

$$L = \frac{T}{C \left[ 4 \cdot \pi^2 + \left( \ln \frac{I_1}{I_3} \right)^2 \right]}, \quad (4)$$

где  $T$  – период разряда;  $I_1$  и  $I_2$  – амплитуда тока в первый и третий полупериоды разряда.

Из-за сильного влияния паразитных высокочастотных колебаний на кривую разрядного тока в первый полупериод разряда, индуктивность рассчитывалась по амплитудным значениям тока второго и четвертого полупериода разряда.

Эквивалентное сопротивление цепи, включающее активное сопротивление соединительных проводов и внутреннее сопротивление конденсаторной батареи, определялось методом перебора, подбираемого при аппроксимации кривой разрядного тока. Резуль-

таты измерения разрядного тока в режиме короткого замыкания и соответствующая аппроксимирующая кривая тока при подобранном сопротивлении представлена на рис. 6. Осциллограмма получена при разряде конденсаторной батареи  $C = 1,924 \mu\text{F}$  с напряжением заряда  $U_{\text{charge}} = 10 \text{ kV}$ .

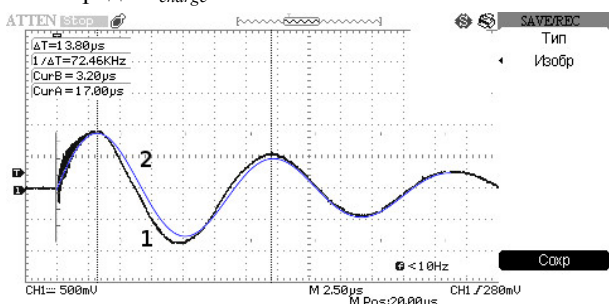


Рис. 6. Разрядный ток в режиме короткого замыкания 1 и кривая аппроксимации 2

В представленных результатах индуктивность разрядной цепи составила  $2,398 \mu\text{H}$ , а расчетное активное сопротивление разрядной цепи равнялось  $R = 200 \text{ mOhm}$ . Подобным образом были измерены параметры цепи в случае применения разных батарей (табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерения индуктивности и сопротивления разрядной цепи

Номер батареи	Индуктивность, $\mu\text{H}$	Сопротивление, $\text{mOhm}$
№ 1	2,40	200
№ 2	2,54	225
№ 3	2,62	240

Незначительное изменение индуктивности и сопротивления при изменении емкости конденсаторной батареи дает основание считать достаточным установление зависимости изменения свойств воды в установке «ГИДРА» от емкости, напряжения заряда батареи и количества импульсов.

Измерение свойств воды проводилась следующими приборами. Измерение концентрации нитратов в воде осуществлялось нитратомером ИТ – 1201 с диапазоном показаний массовой концентрации от  $0,001$  до  $9999 \text{ mg/l}$  и пределом погрешности  $\pm 11\%$ . Использовался измеритель проводимости BANTE 902 с диапазоном  $0\text{--}200 \text{ mS/cm}$ , погрешностью  $\pm 0,5\%$ . ОВП (redox potential) измерялся анализатором вод Анион – 7051 с пределом абсолютной погрешности измерения ЭДС  $\pm 2 \text{ mV}$ . pH воды измерялось прибором BANTE 902 с диапазоном измерений  $\text{--} 2.000 \sim 20.000 \text{ pH}$  и абсолютной погрешностью  $\pm 0,002 \text{ pH}$ . Изменение концентрации железа в водном растворе определялось фотометрическим методом анализа по способу [8], позволяющему определить Fe в концентрациях  $\sim 10^{-6} \text{ mole/l}$ .

Электроды диагностических приборов промывались в дистиллированной воде перед каждым измерением. Измерения одного и того же образца (исходная и обработанная вода) проводилось до трех раз. Образцы диагностировались в течении первых 15 минут после обработки, а также через 3 и 6 часов после эксперимента.

Измерение массы разрядных электродов прово-

дилось на весах марки ВЛР – 200 с погрешностью взвешивания до  $50 \text{ g} - 0,5 \text{ mg}$ , от  $50 \text{ g}$  до  $200 \text{ g} - 1 \text{ mg}$ . Для электродов из нержавеющей стали сравнение их массы осуществлялось после 280 импульсов, для электродов из графита – после 30 импульсов. При этом ПИР осуществлялись при следующих параметрах:  $U_{\text{charge}} = 10 \text{ kV}$ ,  $C = 2,947 \mu\text{F}$ , энергия одиночного импульса равнялась  $W = 152,5 \text{ J/pulse}$ .

Объектом исследования была выбрана водопроводная вода, отстоянная в течение суток, с проводимостью  $758 - 766 \mu\text{S/cm}$ . Для определения изменения рассматриваемых свойств воды проводилась серия импульсов от 1 до 200.

**Результаты исследований.** В результате обработки воды с помощью ПИР на установке «ГИДРА» в ней образовывалась взвесь частиц, которые со временем выпадали в осадок. Результаты обработки со стальными электродами представлены на рис. 7 при следующих электрических параметрах цепи:  $U_{\text{charge}} = 20 \text{ kV}$ ,  $C = 2,947 \mu\text{F}$ .

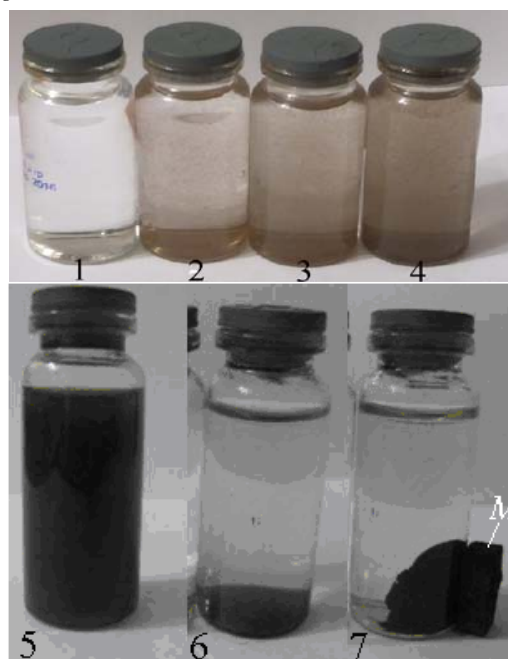


Рис. 7. Образцы с водопроводной водой, обработанной подводными искровыми разрядами:

- 1 – исходный образец; 2 – образец после 5 импульсов;
- 3 – 25 импульсов; 4 – 50 импульсов; 5 – 200 импульсов;
- 6 – образец №5, отстоянный в течение 4-х суток,
- 7 – образец №5 с осадком, отсепарированным постоянным магнитом (М)

Образование осадка во времени происходит не равномерно, что свидетельствует о наличии во взвешенном состоянии частиц разных размеров. Наиболее интенсивно осадок образовывался в течение первых минут после обработки. При этом, с увеличением числа импульсов, воздействующих на водопроводную воду, происходит возрастание объема осадка. По результатам визуальных наблюдений, осаждение частиц в стоячей воде завершается после 3-х, 4-х суток с момента завершения обработки.

На основании обработки результатов исследований на установке «ГИДРА» выявлены зависимости изменения ОВП и pH обрабатываемой воды от коли-

чества  $N$  импульсов при разных параметрах электрической разрядной цепи (емкость и напряжение заряда конденсатора), представленные на рис. 8-10, на которых приняты следующие обозначения для напряжения заряда конденсаторной батареи: ■ – 10 kV, ▲ – 15 kV, ● – 20 kV. Результаты получены на стальных электродах.

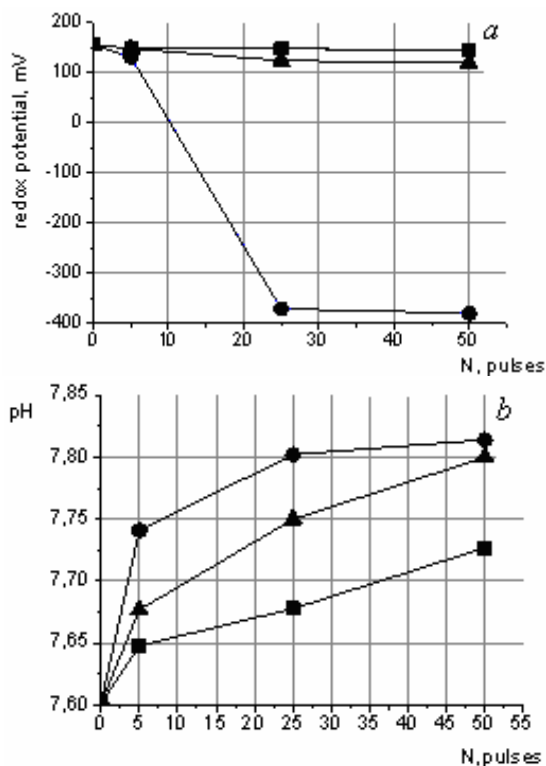


Рис. 8. Зависимость свойств воды от количества импульсов при  $C = 1,037 \mu\text{F}$ :  $a$  – ОВП,  $b$  – pH

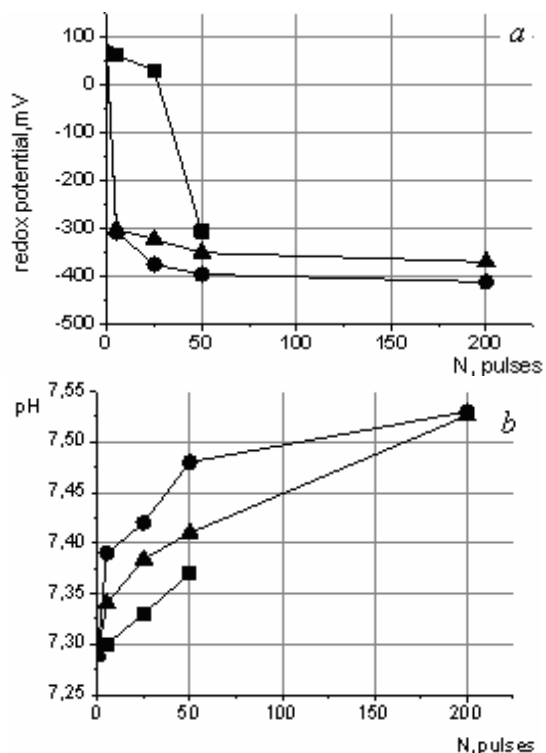


Рис. 9. Зависимость свойств воды от количества импульсов при  $C = 1,924 \mu\text{F}$ :  $a$  – ОВП,  $b$  – pH

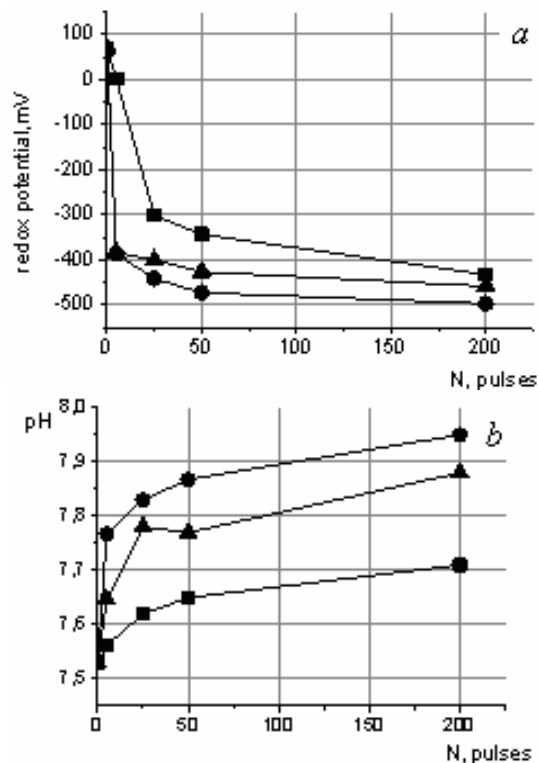


Рис. 10. Зависимость свойств воды от количества импульсов при  $C = 2,947 \mu\text{F}$ :  $a$  – ОВП,  $b$  – pH

С ростом количества импульсов наблюдается уменьшение ОВП, а при определенном пороге импульсов происходит изменение положительного ОВП на отрицательный. Имеет место возрастание pH обрабатываемой воды с увеличением количества импульсов  $N$ .

Для уточнения точки перехода ОВП дискретность шага по количеству импульсов была уменьшена. Шаг в один импульс был выбран вплоть до 5 ПИР, затем было проведена дополнительная серия импульсов с возрастающим шагом. Результаты представлены на рис. 11.

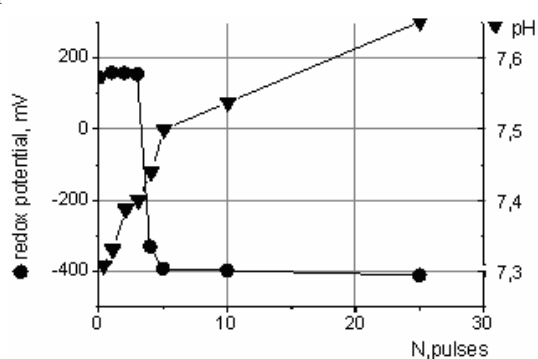


Рис. 11. Зависимость показателей воды от количества импульсов при  $U_{\text{charge}} = 20 \text{ kV}$ ,  $C = 1,924 \mu\text{F}$

Выявлено, что изменение положительного ОВП на отрицательный происходит уже после 3-5 импульсов.

Полагается, что изменение данных свойств воды происходит под воздействием продуктов эрозии электродов. Известно [9], что масса продуктов эрозии практически линейно зависит от энергии разряда. Поэтому потребовалось выявление зависимости измене-

ния ОВП от полной энергии серии разрядов (рис. 12). Под полной энергией понимается сумма полных энергий одиночных импульсов ( $\Sigma[C \times U_{charge}^2/2]$ ).

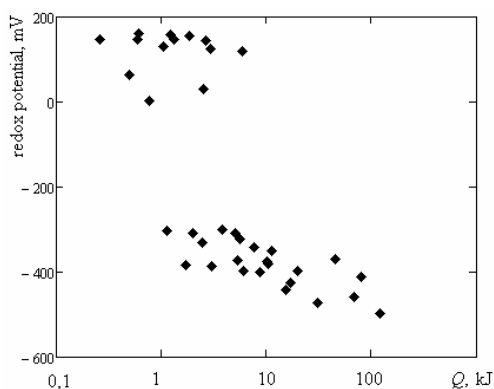


Рис. 12. Зависимость ОВП воды от полной энергии серии разрядов

На установке «ГИДРА» изменение положительного ОВП воды на отрицательный происходит в диапазоне полной энергии от 1 до 10 кДж. Наличие такого широкого диапазона может быть связано с отличием дисперсности частиц, через которую задается площадь поверхности взаимодействия материала частиц с водой. То есть, при одинаковой массе продуктов эрозии имеет место отличие в площади поверхности частиц.

Отмечен некоторый рост проводимости воды и нахождение количества нитратов в пределах ПДК не более 20 мг/л, при нормах ЕС 50 мг/л.

С целью определения влияния материала электрода на зависимость изменения исследуемых свойств воды, проведены эксперименты с электродами из графита. Следует отметить, что данный материал из-за своей хрупкости выдерживает меньшие ударные нагрузки. Поэтому количество импульсов в серии уменьшено в 2...2,5 раза. Результаты исследований представлены на рис. 13.

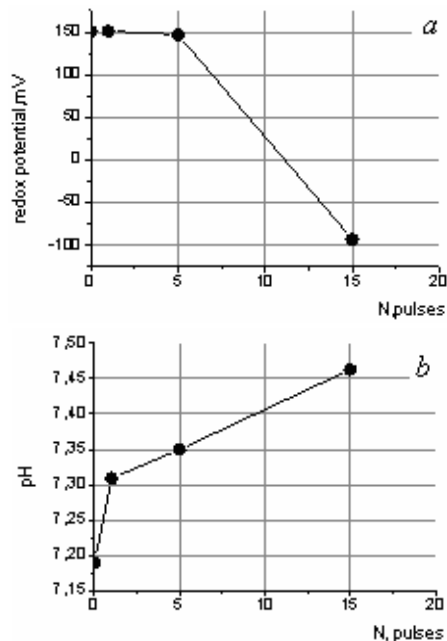


Рис. 13. Зависимость свойств воды от количества импульсов при  $U_{charge} = 20$  кВ,  $C = 1,924 \mu\text{F}$ , где  $a$  – ОВП,  $b$  – рН

На графитовых электродах тенденция по изменению положительного ОВП воды на отрицательный с ростом количества ПИР сохранилась. При тех же параметрах разрядной цепи скачек ОВП произошел уже при третьем импульсе. Это может быть связано с более интенсивным уменьшением массы электродов, как вследствие эрозии, так и из-за механического разрушения.

В табл. 3 представлены результаты изменения массы электродов. Видно, что графитовый электрод эродирует быстрее. Изменение массы катода из графита не удалось измерять из-за его механического разрушения. В таблице принято:  $m_1, m_2$  – масса электродов до и после разрядов, соответственно.

Таблица 3

Изменение массы разрядных электродов

	$m_1, g$	$m_2, g$	массопотеря $\mu\text{g}/\text{J-pulse}$
Анод-игла из нерж.ст.	3,86520	3,79025	1,76
Катод-полусфера из нерж. ст.	62,31290	62,24010	1,7
Анод-игла из графита	5,48075	5,47880	1,96

Для определения устойчивости внесенных изменений в свойства воды, спустя сутки анализу подвергалась вода, обработанная при параметрах разрядной цепи:  $C = 2,947 \mu\text{F}$ ,  $U_{charge} = 20$  кВ,  $N = 200$ , где: №1 – исходный образец воды, №2 – исходный образец, пропущенный через фильтр, №3 – отфильтрованный образец воды после серии из 200 импульсов, №4 – образец воды после серии из 200 импульсов, отстоянный сутки и пропущенный через угольный фильтр (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение свойств воды в результате ее обработки на установке «ГИДРА»

	№1	№2	№3	№4
ОВП	+160	+158	-496	-330
рН	7,745	7,745	7,95	7,78

Фильтрация проводилась с целью исключения влияния на свойства воды примесей, в частности, материала эрозии электродов. Из представленной таблицы видно, что образцы №1 и №2 отличаются друг от друга в пределах погрешности приборов, т.е. угольный фильтр сам по себе не вносит изменений в показания. Образец №3 имеет сильно отрицательный ОВП и увеличившийся показатель рН. Свойства образца №4 дают основание полагать о необратимости внесенных изменений в свойства воды, полученных в результате ее обработки.

Дополнительно проведено исследование изменения рН дистиллированной (ДВ) и водопроводной воды (ВВ) после воздействия подводными искровыми разрядами при следующих параметрах электрической цепи:  $U_{charge} = 20$  кВ;  $C = 2,947 \mu\text{F}$ ; количество импульсов  $N = 100$ . Измерение рН потенциометрически с точностью до 0,1 ед. рН. Результаты измерений представлены в табл. 5 (нижний индекс «0» соответствует измерениям воды, не обработанной ПИР, индекс «1» – после обработки).

С течением времени (6-7 суток) рН незначительно увеличивается. Полагается, это является следстви-

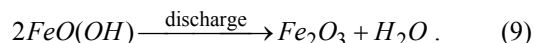
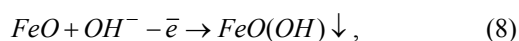
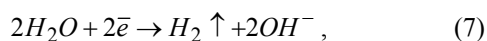
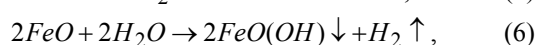
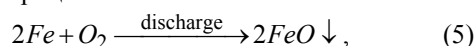
ем удаления из водного раствора газообразных продуктов после электролиза и продуктов хлорирования.

Таблица 5

Результаты исследования изменения pH дистиллированной (ДВ) и водопроводной воды (ВВ)

Время \ Тип воды	30 минут после обработки	24 часа	7 суток	14 суток
ДВ <sub>0</sub>	6,65	6,66	6,67	6,65
ДВ <sub>1</sub>	7,12	7,14	7,12	7,12
ВВ <sub>0</sub>	7,70	7,72	7,71	7,71
ВВ <sub>1</sub>	8,1	8,34	8,68	8,64

Выявлено, что при прохождении электрического разряда с использованием электродов из стали возможны такие процессы:



При этом в растворе может образовываться очень малое количество Fe(III). Поэтому спектрофотометрическим методом проведено исследование изменения концентрации железа в воде в результате обработки ПИР. Измерения проводились в необработанной воде (ВВ<sub>0</sub>) и в четырех образцах после обработки разрядами с одинаковыми параметрами электрической цепи:  $U_{charge} = 20 \text{ kV}$ ,  $C = 2,947 \text{ }\mu\text{F}$ . Количество импульсов – 100. Получены следующие концентрации железа: ВВ<sub>0</sub> = 0,48 mg/l; ВВ<sub>11</sub> = 0,54 mg/l; ВВ<sub>12</sub> = 0,56 mg/l; ВВ<sub>13</sub> = 0,54 mg/l; ВВ<sub>14</sub> = 0,56 mg/l. Данные результаты свидетельствуют о пренебрежимо малом изменении концентрации чистого железа в воде в результате обработки ПИР. Для сравнения, количество железа в водопроводной воде составляет 0,3 mg/l.

Выявлена возможность магнитной сепарации частиц из воды, находящихся как во взвешенном состоянии в воде, так и выпавших в осадок. Известно, что магнитными свойствами обладает оксид железа (II, III), называемый магнитным железняком FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом образование оксид железа (III) по реакции (9) возможно за счет термического воздействия разряда на ранее образовавшиеся частицы оксид железа (II). Таким образом, установку «ГИДРА» с магнитной сепарацией представляется возможным использовать для управляемого изменения окислительно-восстановительного потенциала и pH воды.

Изменение свойств воды в установке «ГИДРА» имело место и при использовании электродов из графита. Это дает основание предположить о наличии реакции (7) в процессе ПИР. Следует отметить, что теоретическое исследование влияния газоразрядных процессов на свойства воды сделано в работе [10].

#### Выводы.

На установке «ГИДРА» проведено исследование зависимости изменения ОВП и pH обрабатываемой

воды от количества импульсов и параметров импульсов, задаваемых параметрами электрической разрядной цепи (емкостью, зарядным напряжением). Выявлено уменьшение ОВП при возрастании напряжения заряда конденсаторной батареи, ее емкости и полной суммарной энергии разрядов. При этом, pH воды возрастает. Изменение ОВП и pH воды сохраняется в течение продолжительного времени после удаления осадка. Для заданных параметров разряда существует порог импульсов, при превышении которого происходит изменение положительного ОВП на отрицательный. Установку «ГИДРА» с магнитной сепарацией можно использовать в качестве электрохимического реактора идеального смешения дискретного действия с удалением продуктов воздействия.

*Особое уважение за обсуждение результатов проф. В.Б. Юферову.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во Томского университета, 1975. – 258 с.
2. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986.
3. Баранов М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности // Электротехника и электромеханика. – 2009. – №1. – С. 42-54. doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.10.
4. Винников Д.В., Озеров А.Н., Юферов В.Б., Сакун А.В., Корытченко К.В., Месенко А.П. Экспериментальное исследование электрического разряда в жидкостях, создаваемого между электродами с конусной выемкой // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №1. – С. 55-60. doi: 10.20998/2074-272X.2013.1.13.
5. Юферов В.Б., Винников Д.В., Пономарев А.Н., Буравилов И.В., Муфель Е.В. Сравнительный анализ акустических импульсов от излучателей от излучателей милли – и микросекундного диапазонов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: «Электрофизика высоких напряжений». – 2009. – №11. – С. 185-189.
6. Юферов В.Б., Винников Д.В., Буравилов И.В., Муфель Е.В., Пахомов А.Ю., Гарбуз В.В., Живанков К.И., Пономарев А.Н. Электрогидравлический метод обезгаживания вакуумируемых жидкостей // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: «Электрофизика высоких напряжений». – 2011. – №16. – С. 211-217.
7. Кондриков Б.Н., Вовченко А.И., Анников В.Э., Иванов В.В. Взрывные превращения электрической и химической энергии. – Киев: Наук.думка, 1987. – 128 с.
8. Патент РФ № 2298171. Способ фотометрического определения железа (III) в растворах чистых солей и искусственных смесей / Новопольцева В.М., Коровина О.А., Осипов А.К., Нищев К.Н. – 2006.
9. Горovenko Г.Г., Ивлиев А.И., Малюшевский П.П., Пастухов В.Н. Электровзрывные силовые импульсные системы. – Киев: Наук.думка, 1987. – 220 с.
10. Vinnikov D.V. Numerical investigation of the influence produced by electric circuit parameters on the formation of chemically active radicals in water vapors // Вопросы атомной науки и техники. – 2015. – №3(97). – С. 159-165.

#### REFERENCES

1. Ushakov V.Ya. *Impul'snyj elektricheskij proboj zhidkостей* [Pulsed liquid breakdown]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1975. 258 p. (Rus).
2. Yutkin L.A. *Elektrogidravlicheskij effect i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad, Mashinostroeniye Publ., 1986. 252 p. (Rus).

3. Baranov M.I. Breakthrough impulse material processing technologies: history, basic physics and technical feasibilities. *Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.1, pp 42-54. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.10.
4. Vinnikov D.V., Ozerov A.N., Yuferov V.B., Sakun A.V., Korytchenko K.V., Mesenko A.P. Experimental investigation of electrical discharge in liquid initiated between cone channel electrodes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 55-60. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2013.1.13.
5. Yuferov V.B., Vinnikov D.V., Ponomaryov A.N., Buravilov I.V., Mufel' E.V. Comparative analysis of acoustic pulses generated by the sources of millisecond and microsecond ranges. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2009, no.11, pp 185-189. (Rus).
6. Yuferov V.B., Vinnikov D.V., Buravilov I.V., Mufel' E.V., Pahomov A.Yu., Garbuz V.V., Zhivankov K.I., Ponomaryov A.N. Electrohydraulic method of degassing of de-aerated liquids. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no.16, pp. 211-217. (Rus).
7. Kondrikov B.N., Vovchenko A.I., Annikov V.E., Ivanov V.V. *Vzryvnye prevrasheniya elektricheskoy i himicheskoy energii* [Explosive conversions of electric and chemical energies]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1987. 128 p. (Rus).
8. Novopolzeva V.M., Korovina O.A., Osipov A.K., Nishev K.N. *Sposob fotometricheskogo opredeleniya zheleza (III) v rastvorah chistyyh soley i iskusstvennyh smesey* [Fe (III) photometric definition process in the pure salt solutions and synthetic mixtures]. Patent Russian Federation, no. 2298171, 2006. (Rus).
9. Gorovenko G.G., Ivliev A.I., Malyushevskiy, Pastuhov V.N. *Elektrovzryvnye silovye impul'snye sistemy* [Electroexplosive power pulsed systems]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1987. 220 p. (Rus).
10. Vinnikov D.V. Numerical investigation of the influence produced by electric circuit parameters on the formation of chemically active radicals in water vapors. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, no.3(97), pp. 159-165.

Поступила (received) 01.11.2016

Винников Денис Викторович<sup>1</sup>, м.н.с.,  
 Кoryтченко Константин Владимирович<sup>2</sup>, д.т.н.,  
 Ткачев Виталий Иванович<sup>1</sup>, м.н.с.,  
 Егоренков Владимир Владимирович<sup>1</sup>, м.н.с.,  
 Кудин Дмитрий Викторович<sup>1</sup>, м.н.с.,  
 Мирная Татьяна Юрьевна<sup>2</sup>, к.х.н.,

<sup>1</sup> Национальный научный центр  
 «Харьковский физико-технический институт»,  
 61108, Харьков, ул. Академическая, 1,  
 тел/phone +38 057 3356326, e-mail: vinniden@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»,  
 Факультет военной подготовки,  
 61098, Харьков, ул. Полтавский шлях, 192,  
 тел/phone +38 057 3726167, e-mail: korytchenko\_kv@ukr.net

D.V. Vinnikov<sup>1</sup>, K.V. Korytchenko<sup>2</sup>, V.I. Tkachov<sup>1</sup>,  
 V.V. Egorenkov<sup>1</sup>, D.V. Kudin<sup>1</sup>, T.Y. Mirnaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology»,

1, Akademicheskaya Str., Kharkov, 61108, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 192, Poltavskyy Shliakh Str., Kharkiv, 61098, Ukraine.

**Investigation of changes of physical and chemical properties of tap water under influence of powerful underwater spark discharges.**

**Purpose.** The purpose of this investigation is to study the changes in the redox potential and pH-value of the tap water as a function of underwater spark discharges, storage device capacitance and the charging voltage. **Methodology.** To define the electric parameters of discharge circuit we used the Rogowski loop and the compensated capacitance-ohm potential divider. To determine water properties before and after the treatment we used the following devices: the water analyzer Anion -7051 with the limit of absolute error of the EMF measurement  $\pm 2$  mV, the BANTE 902 device with the absolute error of  $\pm 0.002$  pH. **Results.** We managed to establish the time of the origination of changes in the properties of treated water. A change in the positive redox potential to a negative one occurred already after the third pulse at a total energy input of  $\geq 1$  kJ. The pH value increased in the range of 0.2 – 0.45 pH units. We obtained the relationship of a change in the redox potential as a function of total energy of the pulse train that actually exhibits the linear relation to the mass of erosion products. We established that the electrodes made of stainless steel and the electrodes made of graphite provide similar changes in water properties. An increase in pH is indicative of the progress of reactions that result in the formation of OH<sup>-</sup>. **Originality.** The obtained experimental data prove a rapid and reliable change in the redox potential from positive to negative changes in the redox potential exponent can persist during ten days and even longer. The erosion products of electrodes can be removed from the treated water using the method of magnetic separation. **Practical value.** The «HYDRA» plant can be used as the electrochemical ideal mixing reactor of a discrete action with the removal of erosion products of the electrode using the method of magnetic separation. References 10, tables 5, figures 13.

**Key words:** underwater spark discharge, electrodes material, water properties, redox potential, pH – value.



О.В. Голик, Л.А. Щебенюк

## СТАТИСТИЧНІ АСПЕКТИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТНОСТІ ПОЛІМІДНОЇ ЕМАЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

*Представлено результати застосування статистичної моделі тренду до аналізу показників дефектності ізоляції при неруйнівному технологічному контролі емаль проводу на основі поліімідного полімеру в умовах виробництва. Розглянуто застосування цього контролю для використання результатів в активному технологічному контролі. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання параметрів функції тренду в технологічному контролі. Параметром тренду є швидкість зменшення (чи збільшення) довжини проводу з заданою дефектністю впродовж технологічного циклу. Теоретично показана і вимірюваннями підтверджена можливість кількісної оцінки тенденції зміни впродовж технологічного циклу дефектності емаль ізоляції для проводу ПЭЭИДХ2 – 200 з двошаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм. Виділення тенденції зміни дефектності емаль ізоляції впродовж неперервного технологічного циклу і кількісна оцінка цієї тенденції дозволяє кількісно оцінити випадкову похибку технологічного контролю – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є характеристикою випадкової складової стабільності технологічного контролю і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою. Бібл. 7, табл. 1, рис. 8.*

*Ключові слова:* емаль провід, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, статистична модель тренду, технологічний неруйнівний контроль.

*Представлены результаты применения статистической модели тренда к анализу показателей дефектности изоляции при неразрушающем технологическом контроле эмаль провода на основе полиимидного полимера в условиях производства. Рассмотрено применение такого контроля для использования результатов в активном технологическом контроле. Предложены рекомендации для практического использования параметров функции тренда в технологическом контроле. Параметром тренда является скорость уменьшения (или увеличения) длины провода с заданной дефектностью в течение технологического цикла. Теоретически показана и измерениями подтверждена возможность количественной оценки тенденции изменения в течение технологического цикла дефектности эмальизоляции для провода ПЭЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм. Выделение тенденции изменения дефектности эмаль изоляции в течение непрерывного технологического цикла и количественная оценка этой тенденции позволяет количественно оценить случайную ошибку технологического контроля – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является характеристикой случайной составляющей стабильности технологического контроля и обусловлена большим количеством причин, влиянием каждой из которых можно пренебречь по сравнению с суммой. Библ. 7, табл. 1, рис. 8.*

*Ключевые слова:* эмаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, статистическая модель тренда, технологический неразрушающий контроль.

**Постановка проблеми.** В кабельному виробництві впровадження відносно дорогої інноваційної продукції зумовлює використання в якості основного критерію ліквідності ціновий фактор. Такою інноваційною продукцією для вітчизняної кабельної промисловості є емаль провід на основі поліімідних синтетичних співполімерів з температурним індексом 200 °С. Такі емаль проводи мають найвищі на сьогодні електричні і механічні властивостями ізоляції [1, 2]. Для їх виробництва застосовують складне і дороге технологічне обладнання з високими швидкостями емалювання (до 1000 м/хв.) і глибоким каталітичним спаленням розчинників емаль лаків [2]. Впровадження таких інноваційних видів кабельної продукції у виробництво дозволяє забезпечити найвищий сучасний рівень електричної, механічної міцності і нагрівостійкості виткової ізоляції обмоток електричних машин і апаратів. Відповідно забезпечити конкурентоспроможність електромашинобудування.

Протиріччя між відносно високою вартістю інноваційної продукції, виготовлення якої базується на використанні сучасних передових технологій і матеріалів, з одного боку, і використання в якості основного критерію ліквідності цінового фактору, з іншого, вимагає від виробника такої продукції впровадження

нестандартних технічних і організаційних рішень щодо технологічного забезпечення найвищого сучасного рівня продукції із одночасним зменшенням затрат на її виробництво.

Вирішення цієї задачі для виробників в період освоєння відомої в світі, але інноваційної саме для них продукції, вимагає нестандартних рішень щодо технологічного контролю з метою суттєвого зменшення кількості продукції, яка не пройшла приймальний контроль. Це наглядно демонструє сучасна концепція «Шість сігм» («6σ») [1]. В ній критерієм якості продукції є її висока однорідність, що забезпечує мінімізацію кількості продукції, яка за характеристиками не відповідає вимогам користувача. По суті концепція «Шість сігм» (визначається статистичною процедурою нормального розподілу [2]) є демонстрацією досягнень у і маркетинговим захистом виробника масової продукції. Освоєння інноваційної продукції конкретним виробником вимагає розроблення і впровадження нестандартних технічних і організаційних рішень технологічного контролю з обов'язковою прив'язкою технічних параметрів до досягнутого рівня технології виробництва. В даному разі представлено таке рішення щодо контролю показників дефект-

ності ізоляції при неруйнівному технологічному контролі емаль проводу на основі поліімідного полімеру в умовах виробництва.

Особливістю поліефірідних і поліамідідних емаль лаків є те, що повне завершення процесу полімеризації відбувається тільки в тонких шарах (до 2...3 мкм). Тому на сучасних емаль агрегатах застосовують маршрути з кількістю проходів проводу через лак до 24 при довжині одного проходів через піч до 10 м. Це зумовлює необхідність:

1) використання високих швидкостей емальовання (до 1000 м/хв.);

2) неперервності технологічного циклу виготовлення максимально можливої кількості котушок проводу;

3) автоматичного моніторингу числа дефектів в емаль ізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід.

Проблема полягає в тому, що результати такого моніторингу, реалізованого на сучасних емаль агрегатах (наприклад, система EFHP фірми MAG-ECOTESTER [3]), не є нормованими в технічній документації на провід, в якій одним з основних критеріїв є напруга пробою і дисперсія напруги пробою [5]. В даному разі неруйнівний технологічний контроль статистичних показників кількості дефектів емаль ізоляції, реалізований у сучасному емаль агрегаті, який мав би забезпечити активну складову системи контролю, практично не використаний.

**Аналіз літератури.** Протириччя між відносно високою вартістю продукції і використанням в якості основного критерію ліквідності цінового фактору для проводів з поліімідною ізоляцією в [1] запропоновано вирішити шляхом встановлення нижчого рівня вимог до напруги пробою і коригування допуску на товщину ізоляції. Наприклад, для низьковольтних виробів менший рівень напруги пробою ізоляції є достатнім. Тобто запропоновано впровадження спектру потреб різних клієнтів. Впровадження спектру технічних вимог відповідно до потреб різних клієнтів значно розширює діапазон застосованих технічних вимог, а це, щонайменше, розмиває діапазони допустимих значень параметрів одного і того ж виробу і ускладнює відносини між виробником і користувачем продукції.

Прикладом сучасного технологічного контролю, в якому критерії прийняття технологічних рішень встановлює виробник, є використання системи неперервного статистичного контролю питомої кількості дефектів ( $er$ ) ізоляції в режимі *онлайн* [3]. Кількість дефектів – це кількість місць, в яких струм через ізоляцію перевищує встановлений. Дискретне вимірювання струму через ізоляцію при дії високої напруги постійного струму (рис. 1) забезпечує система EFHP фірми MAG-ECOTESTER [3].

Необхідність оцінки кількості дефектів ізоляції емаль проводу є загально визнаною. Саме поняття дефекту ізоляції емаль проводу досить умовне:

- від відсутності ізоляції в місці дефекту: в місці співпадання дефектів на сусідніх витках обмотки пробивна напруга дорівнює нулю [4];

- до заданого наперед підвищеного струму через емаль ізоляцію, що свідчить про наявність в даному місці дефекту ізоляції [3].

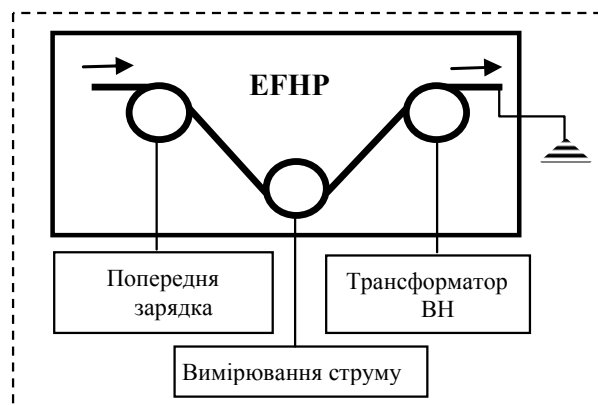


Рис. 1. Принципова схема моніторингу числа дефектів в емаль ізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід

Значення струму, яке в [3] детекторна схема реєструє як дефект, регулюється і, наприклад, для радіальної товщини ізоляції  $\approx 30$  мкм становить 10 мкА при випробувальній напрузі 1500 В.

Тому одним з основних нормованих контрольних параметрів залишається напруга пробою [1, 3-5], а дисперсія напруги пробою є параметром, який опосередковано кореспондується з питомою кількістю локальних дефектів ізоляції. Обидві характеристики, і дисперсія напруги пробою, і питома кількість дефектів, відображують однорідність ізоляції.

Контроль дисперсії основних технічних параметрів продукції слугує інформаційною базою для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001:2000. Однак такий контроль не передбачений нормативною технічною документацією.

Використання системи EFHP [3] для контролю статистичних показників кількості дефектів ізоляції емаль проводу на основі поліімідних співполімерів є реальним технологічним заходом, який дає необхідну інформацію для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001.

Для визначення статистичних показників дефектності в системі EFHP застосовано уніфіковані статистичні програмні модулі. Для кожної котушки фіксується кількість контрольних ділянок проводу (по 100 м) чотирьох груп дефектності: 1 група – від 0 до 3 дефектів; 2 група – від 4 до 9 дефектів; 3 група – від 10 до 18 дефектів; 4 група – більше 18 дефектів (позначення дефекту  $er$ ). Крім того фіксуються три основних статистичних показники: середня кількість дефектів на контрольній ділянці,  $M[er]$ ; кількість дефектів на контрольній ділянці з найбільшою кількістю дефектів,  $er_m$ ; середньоквадратичне відхилення кількості дефектів на контрольній ділянці,  $\sigma[er]$ .

Очевидно, що зафіксовані результати випробування за допомогою системи EFHP залежать від дисперсії багатьох параметрів дроту: механічних характеристик і діаметру провідника  $d_p$ , технологічних параметрів емальовання і товщини ізоляції  $\Delta$ , значення випробувальної напруги  $U$  і мінімального значення

струму через ізоляцію  $I$ , за якого система фіксує наявність дефекту.

Тому аналіз результатів поточного технологічного контролю дефектності ізоляції емальпроводу – складна багатовимірна задача. Прийняття технологічних рішень за результатами такого контролю залежить від досвіду відповідального технолога і не є встановленим. У підсумку арбітром при прийнятному контролі залишається напруга пробою і дисперсія напруги пробою [5]. В даному разі контроль статистичних показників кількості дефектів емаль ізоляції, реалізований у сучасному емаль агрегаті, практично не використаний. На наш погляд, це зумовлено фундаментальною відмінністю між задачами приймального і технологічного контролю.

Задача приймального контролю у масовому виробництві – встановлення відповідності рівня основних параметрів готової продукції нормативним технічним вимогам. Задача технологічного контролю – вчасне попередження виходу основних параметрів виробу за межі встановленого технологічного допуску на конкретній технологічній лінії.

Сама задача попередження включає необхідність синхронізації контролю технічних, технологічних параметрів і технологічного часу в тому чи іншому вигляді. Наприклад, для кабелів і проводів при випробуваннях «на прохід» технологічний час визначається довжиною виробу, що пройшла через вимірювач, помноженою на швидкість руху.

Оцінювання тенденції змінювання технічних і технологічних параметрів впродовж технологічного часу є основною задачею технологічного контролю.

**Мета роботи** – виконати аналіз результатів неруйнівних випробувань високою напругою на прохід емаль проводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С, виготовлений на вітчизняному кабельному заводі, який дозволяє розділити:

- **тренд** технологічного процесу – суттєву детерміновану зміну результатів технологічного контролю впродовж технологічного процесу з метою встановлення технологічних чинників, які спричиняють таку зміну для прийняття рішень корекції технологічних параметрів; **тренд** є детермінованою кількісною характеристикою стабільності технологічного процесу;

- **випадкову похибку** технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою.

Метою такого розділення є розроблення детермінованого і статистичного критеріїв стабільності швидкісного автоматизованого технологічного процесу виготовлення емаль проводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід.

**Основні одержані результати.** Експериментально визначено кількість  $er$  дефектів на кожній оди-

ничній довжині 100 м для п'ятдесяти котушок емаль проводу (всього 180000 м проводу) в хронологічній послідовності виготовлення в неперервному автоматичному технологічному процесі.

Поточний контроль діаметра  $d_p$  мідного провідника в процесі емалювання (рис. 2) свідчить про наявність в технологічному процесі як тенденції поступової зміни параметрів (впродовж маршруту емалювання відбувається технологічна витяжка провідника – тренд технологічного процесу), так і випадкової складової діаметра  $d_p$  (після проходження калібрів №4 і №10 збільшення діаметра  $d_p$  є похибкою вимірювань), яка є частиною випадкової складової стабільності даного технологічного процесу.



Рис. 2. Діаметр мідного провідника  $d_p$  після проходження відповідного калібру в маршруті емалювання: впродовж маршруту відбувається технологічна витяжка провідника, яка складає більше одного відсотка

Для аналізу ряду спостережень за кількістю  $er$  дефектів на кожній одиничній довжині 100 м емаль проводу застосовано статистичну модель тренда з помилкою (тільки помилка є випадковою величиною) для ряду спостережень за значеннями величини  $x$  [6]:

$$x_i = f(t_i) + \delta_i, \quad (1)$$

де  $t_i$  – детермінована змінна, яка є технологічним часом, який в даному разі пропорційний номеру виготовленої котушки проводу;  $f(t_i)$  – детермінована функція (тренд процесу);  $\delta_i$  – випадкова величина (випадкова складова стабільності технологічного процесу).

Значення  $\delta_i$  є незалежними, однаково і нормально розподіленими. Функція  $f(t)$  задана формулою або алгоритмом обчислень і залежить від ряду невідомих параметрів  $c_1, \dots, c_k$ , значення яких визначають методом максимальної правдоподібності.

В разі лінійної функції для кожного  $t$  значення  $x$  нормально розподілене з середнім  $x(t) = a + b(t - t_m)$  і середньоквадратичним  $\sigma$ . Оцінки невідомих параметрів  $a$ ,  $b$  і  $\sigma$ :

$$a^* = x_m; \quad (2)$$

$$b^* = \frac{\sum(t_i - t_m)(x_i - x_m)}{[\sum(t_i - t_m)^2]}; \quad (3)$$

$$\sigma^* = \left\{ n^{-1} \sum [x_i - a^* - b^*(t_i - t_m)]^2 \right\}^{0.5}, \quad (4)$$

де  $t_m$  – середнє значення детермінованої змінної  $t$ ;  $x_m$  – середнє в ряду спостережень за значеннями величини  $x$ .

Достовірні  $p$ -процентні границі для  $x(t)$  при заданому  $t$  визначає параметр  $\gamma_p$  розподілу Стюдента з  $n - 2$  ступенями свободи:

$$a^* + b^*(t - t_m) \pm \gamma_p \sigma^* (n - 2)^{-0.5} [1 + (t - t_m)^2 n / \sum(t_i - t_m)^2]^{0.5}. \quad (5)$$

Для емаль проводу з подвійною ізоляцією на рис. 3 наведено результати визначення кількості одиничних довжин

(100 м), які містять від 18 дефектів і більше. Умовно такі одиничні довжини можна вважати найбільш дефектними (далі: «гірші стометрівки»).

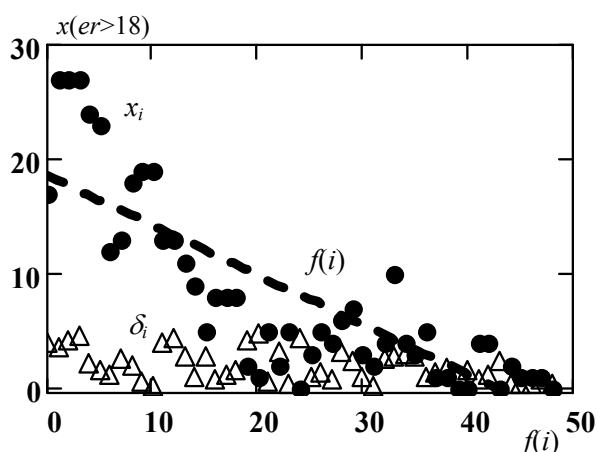


Рис. 3. Результати визначення кількості одиничних довжин (по 100 м), які містять від 18 дефектів і більше для емаль проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів:  $x_i$  – кількість «гірших стометрівок» (18 дефектів і більше) на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення;  $f(i)$  – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3);  $\delta_i$  – випадкова складова процесу, визначена як  $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$

Тенденцію зменшення кількості «гірших стометрівок» впродовж технологічного періоду спостережень кількісно характеризує детермінована функція  $f(i)$ . Випадкову складову стабільності технологічного процесу представлено як масив  $\delta_i$  абсолютних значень відхилення кількості «гірших стометрівок»  $x_i$  від детермінованої функції  $f(i)$ :

$$\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}. \quad (6)$$

В наведеному прикладі масив  $\delta_i$  не має вираженого тренду і середнє значення  $\delta_m$  є кількісною оцінкою технологічної похибки впродовж технологічного періоду спостережень, зокрема – похибки використаного методу контролю.

Дані на рис. 3 свідчать про принципову можливість розділення і кількісної оцінки:

- по-перше, тренду технологічного процесу, причини якого і відповідні технологічні заходи мають бути встановлені технологічною службою;
- по-друге, випадкової складової стабільності технологічного процесу, середнє значення якої є кількісною оцінкою технологічної похибки, яка є предметом статистичного контролю технологічного процесу.

Очевидно, що має бути передбачена можливість наявності тренду випадкової складової стабільності технологічного процесу. В такому разі має бути застосовано статистичну модель тренда з помилкою до випадкової складової  $\delta_i$  (рис. 4).

Послідовність статистичних масивів і відповідних статистичних параметрів, визначених рекурентними процедурами за формулами (2) – (6) наведена в табл. 1.

Параметри тренду, визначені статистично з заданою точністю (формула (5)), є параметрами детермінованих функцій. В прикладі на рис. 3 це параметр  $b^*$  функції  $f(i)$  – швидкість зменшення кількості «гірших

стометрівок»:  $b^* = -86,88 \pm 9,25$  (м/год), що орієнтовно становить зменшення на одну «гіршу стометрівку» за час виготовлення двох котушок (зменшення на 1,4 % довжини відносно дефектного емаль проводу на одну котушку).

Таблиця 1

№ п/п	Масиви	Параметри тренду	Статистичні параметри випадкової складової	
			Середнє	Середньоквадратичне відхилення
1	$x_i, \delta_i$	$a^*, b^*, \sigma^*$	$\delta_m$	$s\delta$
2	$\delta_{i2}, \delta_{2i}$	$a2^*, b2^*, \sigma2^*$	$\delta_{2m}$	$s\delta2$
3	$\delta_{i3}, \delta_{3i}$	$a3^*, b3^*, \sigma3^*$	$\delta_{3m}$	$s\delta3$
...	...	...	...	...

Автоматизація контролю і статистичної обробки даних, виділення детермінованого тренду і представлення його результатів у вигляді кількісного параметру тренду забезпечує можливість поточного коригування технологічного процесу.

Однчасне виділення випадкової складової процесу  $\delta_i$  ( $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$ ) дозволяє кількісно оцінити похибку процесу, причин появи якої може бути дуже багато і зниження якої за необхідності потребує комплексного підходу, який в світовій практиці прийнято називати методом Демінга [7].

Наведений приклад, – один лінійний тренд, одна випадкова складова процесу, – найпростіший. Детермінована функція  $f(i)$  може не бути лінійною (вона може бути і періодичною [6]). Наприклад, масив  $x_i$  на рис. 3 може бути краще описаний спадною експоненціальною функцією, яка зміною системи координат може бути зображена прямою. Виконані відповідні розрахунки виявилися більш складними, але технологічні висновки залишилися незмінними.

На рис. 4 наведені результати статистичного аналізу стабільності технологічного процесу виготовлення того ж емаль проводу по кількості бездефектних одиничних довжин на котушці у вигляді кількості  $x_i$  одиничних довжин (по 100 м), які містять три і менше дефектів:  $x_i$  – кількість «кращих стометрівок» на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення.

Кількість таких рекурентних процедур  $n$  може бути обмеженою наявністю тренду випадкової складової, але вона незначна, оскільки дисперсія кожної наступної випадкової складової  $D[\delta n]$  швидко наближається до нуля (рис. 5).

Найбільш ефективною є процедура виділення першого тренду, оскільки при цьому коефіцієнт варіації випадкової складової  $\delta 1_i$  наближається до одиниці, що свідчить про приблизну рівність середнього  $\delta 1_m$  і середньоквадратичного відхилення  $s\delta 1$  випадкової складової процесу (рис. 6). Важливо те, що залежності  $V[\delta n] = f(n)$  (рис. 5) мають подібний характер для масивів (див. рис. 3 і 4), які відрізняються і за формою візуальної прогонки (рис. 3 – експоненціальне спадання; рис. 4 – лінійне зростання), і за напрямом тренду (рис. 3 – спадання; рис. 4 – зростання).

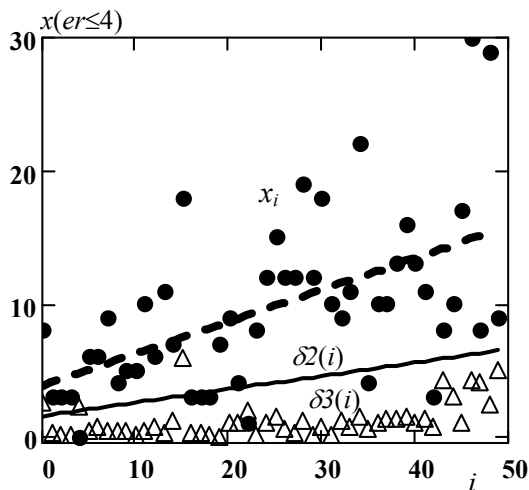


Рис. 4. Кількість одиничних довжин, які містять три або менше дефектів:  $x_i$  – кількість «кращих стометрівок» на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення;  $f(i)$  – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3);  $\delta_2(i)$  – другий тренд процесу (випадкової складової  $\delta_i$ );  $\delta_3_i$  – масив випадкової складової

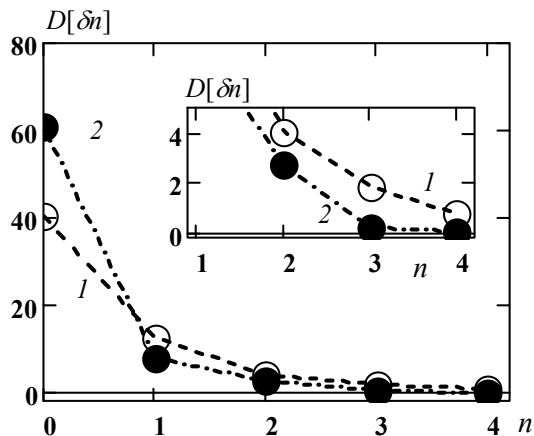


Рис. 5. Залежність дисперсії випадкової складової  $D[\delta n]$  від номеру  $n$  рекурсивної статистичної процедури: 1 –  $D[\delta n(er \leq 3)]$ ; 2 –  $D[\delta n(er > 18)]$

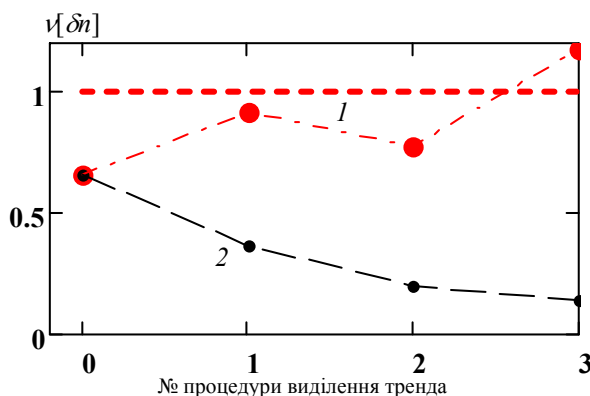


Рис. 6. Залежність коефіцієнту варіації випадкової складової  $v[\delta n]$  від номеру  $n$  рекурсивної статистичної процедури  $v[\delta n] = f(n)$ : 1 –  $v[\delta n(er \leq 3)]$ ; коефіцієнт варіації зростає і наближається до одиниці (1), а відносно середньоквадратичне відхилення експоненціально зменшується (2)

Доцільно використати саме коефіцієнт варіації випадкової складової  $v[\delta]$  масиву даних як критерій кількості рекурсивних процедур  $n$ , яка дозволяє виді-

лити випадкову складову технологічного процесу  $\delta n_i$  ( $\delta n_i = ([\delta(n-1)_i - \delta(n-1)(i)]^2)^{0.5}$ ) і тим самим оцінити похибку процесу. Похибка даного технологічного контролю становить  $\pm 1$  «краща стометрівка».

Параметри трендів, які є параметрами детермінованих функцій технологічно мають бути проаналізовані, оскільки вони не є випадковими.

Значна різниця між швидкістю збільшення кількості «бездефектних стометрівок» ( $\approx 48$  м/год), з одного боку, і швидкістю зменшення кількості «гірших стометрівок» ( $\approx -86$  м/год), з іншого, однозначно свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емаль агрегатах в принципі не є стабільним. В ньому слід розрізняти, використовуючи термінологію технічної надійності, періоди припрацювання (підвищеної дефектності ізоляції), нормального ізолювання (дефектність ізоляції характеризує рівень технології) і період «втоми» (дефектність ізоляції зростає швидше, ніж в період нормального ізолювання).

Тривалість цих періодів, а отже і технологічна логістика емалювання в умовах конкретного виробництва має бути визначена шляхом розділення і кількісної оцінки параметрів дефектності ізоляції, а саме:

- трендів дефектності ізоляції, причини яких і відповідні технологічні заходи мають бути встановлені технологічною службою;
- випадкової складової стабільності технологічного процесу, середнє значення якої є кількісною оцінкою статистичної похибки технологічного контролю.

Для кількісної оцінки відповідних параметрів необхідна модель суперпозиції тренду і випадкової складової масиву даних. На рис. 7 представлена ілюстрація такої моделі для масиву даних, наведених на рис. 4.

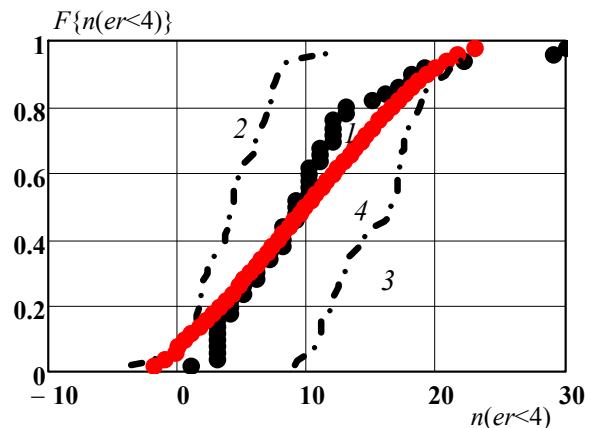


Рис. 7. Модель емпіричної функції розподілу кількості бездефектних контрольних довжин у вигляді нормальної функції розподілу з математичним сподіванням, що лінійно змінюється впродовж технологічному процесу і стабільної дисперсії похибки контролю: 1 – емпірична функція розподілу  $F^*\{n(er < 4)\}$ ; 2 – функція розподілу на початку періоду спостереження; 3 – функція розподілу в кінці періоду спостереження; 4 – модель функції розподілу

Оскільки значення контрольного параметру є додатними, а процедура нормального розподілу передбачає в моделі появу від'ємних значень, для визначення випадкової складової застосовано роз-

поділ Вейбула (РВ) (рис. 8), який, по перше, точніше, ніж нормальний розподіл (НР), описує масив даних (для НР критерій Колмогорова становить 0,71; для РВ 0,95).

По-друге, дозволяє оцінити випадкову складову масиву як параметр експоненціального розподілу, в який вироджується РВ при значенні параметра форми, що дорівнює одиниці.

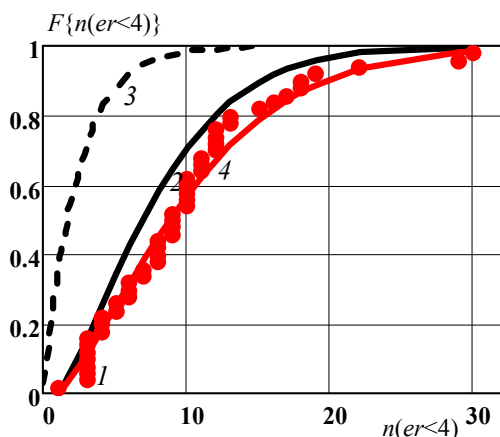


Рис. 8. Модель емпіричної функції розподілу кількості бездефектних контрольних довжин у вигляді функції розподілу Вейбула: 1 – емпірична функція розподілу  $F^*\{n(er<4)\}$  (точки); 2 – апроксимація функції  $F^*\{n(er<4)\}$  функцією розподілу Вейбула; 3 – функція розподілу випадкової складової масиву (штрихова, параметр форми в розподілі Вейбула  $bv = 1,01$ ); 4 – модель функції розподілу  $F\{n(er<4)\}$  як суперпозиція тренду і випадкової складової масиву

### Висновки.

1. Результати контролю дефектності емаль ізоляції на основі поліімідних синтетичних співполімерів в процесі неруйнівних технологічних випробувань високою напругою на прохід свідчать про можливість і доцільність виділення **тренду** технологічного процесу – детермінованої кількісної характеристики стабільності технологічного процесу. Доцільність виділення **тренду** полягає у встановленні технологічних чинників, які спричиняють детерміновану зміну контрольного параметру для прийняття рішень корекції технологічного процесу.

2. Виділення **тренду** технологічного процесу дає можливість кількісно оцінити **випадкову похибку** технологічного процесу, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою.

3. Виділено **тренд** технологічного процесу ізолювання проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів на швидкісних автоматичних емаль агрегатах у вигляді швидкості (параметр тренду  $b^*$ ) зменшення дефектності впродовж технологічного циклу:  $b^* = -86,88 \pm 9,25$  (м/год), що орієнтовно становить зменшення на 1,4 % довжини відносно дефектного емаль проводу на одну катушку.

4. Співставлення швидкості зменшення дефектності в різні періоди технологічного циклу свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емаль агрегатах в принципі

не є стабільним. В ньому слід розрізняти, використовуючи термінологію технічної надійності, періоди припрацювання (підвищеної дефектності ізоляції), нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна і характеризує рівень технології) і період «втоми» (дефектність ізоляції зростає швидше, ніж в період нормального ізолювання). Тривалість цих періодів, а отже і технологічна логістика емальовання в умовах конкретного виробництва має бути визначена шляхом обмеження тривалості неперервного технологічного циклу періодом нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна і характеризує рівень технології). Критерієм такого обмеження має бути зміна знака швидкості зменшення дефектності впродовж елементів неперервного технологічного циклу, тривалість яких визначена за принципом Мізеса [6].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 19-23.
2. Щербенюк Л.А., Антоненко С.Ю. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальованих проводів // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – №23. – С. 166-169.
3. Голік О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход // Украинский метрологический журнал. – 2009. – №1. – С. 15-18.
4. Андрианов А.В., Андрианов В.К., Быков Е.В. О статистике точечных повреждений обмоточных проводов и витковых замыканий обмоток // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 28-31.
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
6. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
7. Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. – New York: NY 10016 Copyright, 1986. – 262 p.

### REFERENCES

1. Zelenetsky Yu.A. About the improvement of technical documentation for enameled wires. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 19-23. (Rus).
2. Shchebeniuk L.A., Antonets S.Yu. Statistical method purpose is the reduce of quantifying defects of enameled wire. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2012, no.23, pp. 166-169. (Ukr).
3. Golik O.V. Quantifying of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide isolation by tests by high voltage. *Ukrainian metrological journal*, 2009, no.1, pp. 15-18. (Rus).
4. Andrianov A.V., Andrianov V.K., Bykov E.V. About the statistics of pin-hole damages of winding wires and inter-turn short-circuits in windings. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 28-31. (Rus).
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
6. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka riadov nabludeniya* [Statistical analysis of observation series]. Moscow, Znanie Publ., 1973. 64 p. (Rus).
7. Mary Walton. *The Deming Management Method*. Foreword by W. Edward Deming. New York: NY 10016 Copyright, 1986. 262 p.

Надійшла (received) 05.11.2016

Голик Оксана В'ячеславівна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Щебенюк Леся Артемівна<sup>1</sup>, к.т.н., проф.,  
<sup>1</sup> Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 21,  
e-mail: unona.2013@mail.ru, agurin@kpi.kharkov.ua

*O.V. Golik<sup>1</sup>, L.A. Shchebeniuk<sup>1</sup>*  
<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Statistic methods of polyimide enamel isolation defective non-destructive control at the conditions of production.**

*In this paper can be used to not-destructive technological testing of defects isolation enameled wire with polyimide polymer. The thesis is devoted to the statistical method for processing, comparison and analysis of results of measurements of parameters isolation it enameled wire because of mathematical model of*

*trend for application in active technological monitoring is developed; to development used of the recommendations for parameters of such testing. Is theoretically justified and the possibility of a diminution of dependence of an error from a velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects enameled isolation not destroying tests by high voltage. This work is devoted to the statistical method for processing, comparison and analysis of results of measurements of parameters of polyimide isolation. The method is operating not destroying technological monitoring an amount of enameled isolation defect. The dependence of average value of amount of defects for enameled wire ПЭЭИДХ2 – 200 with two-sheeted polyimide by isolation in a range of nominal diameter 0.56 mm is experimentally determined. The technological monitoring purpose is reducing of quantifying of enameled isolation defect. References 7, tables 1, figures 8.*

**Key words: enameled wire, polyimide isolation, isolation defective, statistical model of the trend, non-destructive testing.**

В.О. Бондаренко, И.В. Доманский, Г.Н. Костин

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВЫМИ НАГРУЗКАМИ

*У статті запропоновані інноваційні напрямки енергозбереження в тягових мережах залізниць і нові схемотехнічні рішення присоединения тягових підстанцій до мереж енергосистем, що забезпечують енергобезпеку процесу перевезень. Дано обґрунтування необхідності розрахунку тягових підстанцій по векторному методу трифазного споживання енергії від підстанцій НЕК «Укренерго». Бібл. 15, табл. 3, рис. 4.*

*Ключові слова:* енергетична безпека, залізничний транспорт, процес перевезень, мережі енергосистем, енергоефективність режимів, пересувні тягові підстанції.

*В статье предложены инновационные направления энергосбережения в тяговых сетях железных дорог и новые схемотехнические решения присоединения тяговых подстанций к сетям энергосистем, обеспечивающие энергобезопасность перевозочного процесса. Дано обоснование необходимости расчета тяговых подстанций по векторному методу трехфазного потребления энергии от подстанций НЭК «Укрэнерго». Библ. 15, табл. 3, рис. 4.*

*Ключевые слова:* энергетическая безопасность, железнодорожный транспорт, процесс перевозок, сети энергосистем, энергоэффективность режимов, передвижные тяговые подстанции.

**Введение и постановка проблемы.** Анализ изменения структуры энергобаланса железных дорог показывает стойкую тенденцию ориентации их энергетики преимущественно на электропотребление. Так, за прошлый период (1997-2012 гг.) удельный вес электроэнергии в общем энергобалансе железных дорог вырос с 51 % до 70,5 %. К известным позитивным свойствам электроэнергии (легкая доступность, транспортабельность, готовность к потреблению и др.) добавилось еще одно, чрезвычайно важное в современных условиях – низшая себестоимость работ и услуг, которые выполняются с использованием электрической энергии по сравнению с другими основными видами потребления топливно-энергетических ресурсов [1-5].

В Украине с 1950-х гг. по системе переменного тока 25 кВ, 50 Гц электрифицировано 5,5 тыс. км (53 % полигона) железных дорог. Мировым опытом подтверждены неоспоримые преимущества системы переменного тока перед системой электрификации на постоянном токе 3 кВ. В настоящее время доля электрифицированных участков от общей эксплуатационной длины железных дорог составляет 47,3 %, при этом доля электротяги в общем грузообороте равна 91,2 %. Однако последствия экономического кризиса существенно снизили темпы электрификации железных дорог в 2014-2016 гг. В результате важнейшая электрифицированная линия Харьков – Полтава – Кременчуг – Знаменка работает в вынужденных режимах с питанием тяговой сети от передвижных подстанций [5-8].

Одним из актуальных вопросов обеспечения энергобезопасности процесса перевозок является эффективная реализация тяговой электроэнергетической резервной мощности электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока. Пути реализации резервной мощности разные. Если основным направлением на железных дорогах стран с развитой экономикой является размещение на тяговых подстанциях стационарных тяговых резервных агрегатов, то на железных дорогах Украины этот вопрос решается за счет передвижных резервных тяговых

подстанций. Последние вводятся в эксплуатацию в период устойчивого роста объема перевозок. При падении перевозок они могут быть задействованы на других направлениях, на которых ожидается рост объемов перевозок. Естественно, что такая «гибкая» система резервирования должна быть увязана схемно и режимно с системами внешнего электроснабжения.

С целью уменьшения расходов на обеспечение отрасли электроэнергией все железные дороги Украины осуществляют снабжение электроэнергией потребителей по регулируемому тарифу, что позволяет экономить сотни млн. грн. при закупке электроэнергии (в 2014 г. – 631 млн. грн.). Преимущества закупки электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии очевидны, однако появляются некоторые особенности оплаты за электроэнергию в условиях вынужденных режимов работы электротяговых сетей с применением передвижных тяговых подстанций [2-5].

Темпы старения устройств электроснабжения при существующем дефиците финансирования продолжают опережать темпы реконструкции. Длина линий электрифицированного полигона, которые эксплуатируются сверх усредненного срока (40 лет) выросла до 6393 км или 62,3 % в 2012 году, а на сегодня эта цифра приближается до 6820 км или 67 %. Со сроком службы свыше 30 лет работают 232 стационарных (78 % от общего количества) и 10 передвижных тяговых подстанций. В настоящее время необходима полная реконструкция больше 50 % развернутой длины контактной сети и тяговых подстанций. Для стабилизации положения нужно увеличение темпов обновления устройств тягового электроснабжения в период с 2016 по 2020 годы ежегодно не менее 600-670 км контактной сети и 10-15 тяговых подстанций при средней потребности в финансировании на одну подстанцию около 50 млн. грн. [1, 7, 8].

Причины низкой энергоэффективности электроснабжения лежат в технических, экономических, организационных процессах: непригодное состояние электрических сетей из-за износа оборудования; несимметрия нагрузки фаз линий; неполнофазные



режимы работы линий электропередач; влияние потоков энергии в общих элементах сети (эффект нелинейности потерь); нескомпенсированные перетоки реактивной мощности.

Поэтому вопрос о существенном увеличении объемов работ по модернизации, повышению надежности и энергоэффективности тягового электроснабжения, а также по электрификации новых железнодорожных линий относится в настоящее время к важнейшим приоритетам развития железнодорожной энергетики Украины.

**Цель статьи** – анализ и разработка путей повышения энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками и обоснование необходимости расчета тяговых подстанций по векторному методу трехфазного потребления энергии от подстанций НЭК «Укрэнерго».

**1. Анализ энергоэффективности тягового и внешнего электроснабжения электрифицированной линии Полтава – Кременчуг – Александрия.** Общий недостаток схем присоединений тяговых подстанций (ТП) электрифицированных участков за период 1993-2011 гг. заключается в том, что практически все подстанции присоединялись к сетям 110 кВ Облэнерго, а ряд из них до таких сетей 110 кВ, которые соединяли разные энергосистемы.

Выбор схемы внешнего электроснабжения ТП (рис. 1) выполнен в соответствии с «Нормами технологического проектирования энергетических систем и электрических сетей 35 кВ и выше» и новыми схемотехническими решениями присоединения ТП к сетям энергосистем, которые обоснованы в работах [5, 9] и используются при электрификации железных дорог.

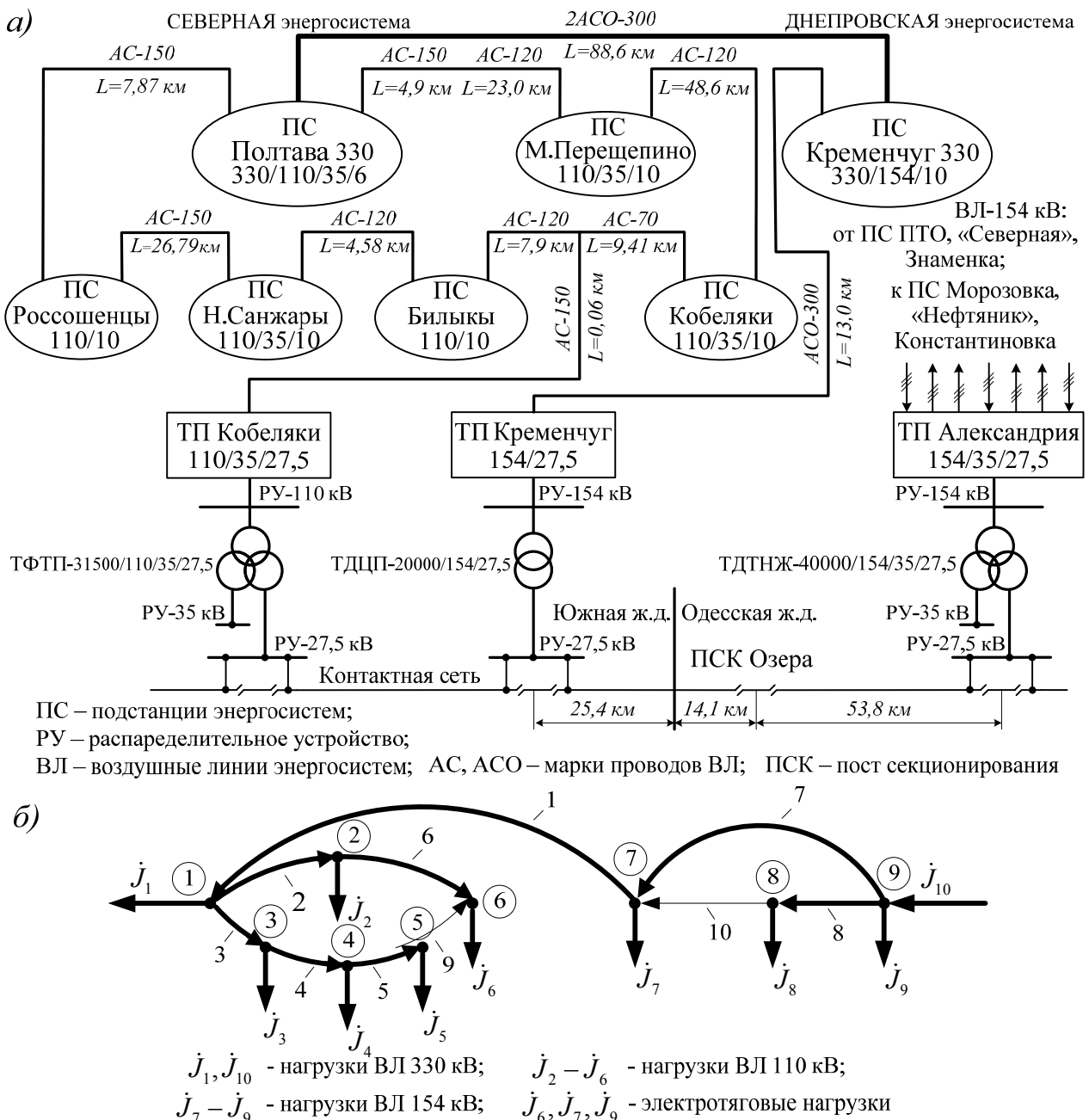


Рис. 1. Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций на стыке Южной и Одесской ж. д. и ее направленный граф

Источником внешнего электроснабжения тяговых подстанций являются подстанции 330 кВ Северной и Днепровской энергосистем. Подстанция 330/110 кВ Полтава вводилась в эксплуатацию с 1964 г. по 1997 г. В настоящее время на подстанции установлены 4 автотрансформатора: два по 125 МВА и два по 200 МВА. Открытое распределительное устройство (ОРУ) 330 кВ ПС Полтава выполнено по схеме 330-10 «трансформатор – шины с присоединением линий через два выключателя». На этом напряжении имеются связи со Змиевской ТЭС, с подстанциями 750/330 кВ Североукраинская и 330/154 кВ Кременчугская.

ОРУ 110 кВ Полтава имеет четыре секции, два секционных и два совмещенных с обходными шиносоединительных выключателя. Распределение электрической мощности от ПС Полтава на напряжении 110 кВ осуществляется потребителям г. Полтава и Полтавской области, а также тяговым подстанциям.

ОРУ 154 кВ тяговой подстанции Александрия имеет три секции шин 154 кВ на которые поступает питание от ПС «Северная» и ПС Знаменка. Распределение электрической мощности от ТП Александрия на напряжении 154 кВ осуществляется потребителям ПС Константиновка, ПС «Нефтяник» и ПС Морозивка.

На ТП Александрия в 2009 году введено в работу три плавно регулируемых установок поперечной емкостной компенсации (КУ) (производитель ЧРД ЭЛЕКТРОТЕХНИКА), общей мощностью 18,4 Мвар. В фазу А и фазу В включены регулируемые установки СТК с конденсаторами типа СUEFS 23-8.7/600/WF и реакторами компенсирующим и декомпенсирующим соответственно КТЛ-182/155 и КТЛ-192/210 с  $Q_A=7609$  квар и  $Q_B=7565$  квар. Нерегулируемая установка КУ с конденсаторами КЭК1-1,05-63-1У1 и реактором ФРОМ-3200/35 У1, мощностью  $Q=5699$  квар включается в фазу А или В. Для обеспечения компенсации (декомпенсации) реактивной мощности и фильтрации высших гармонических составляющих напряжения и тока применяется общая схема динамической компенсации, при которой преобразователь системы СОМРАСТ осуществляет регулировку величины фазного тока декомпенсирующих реакторов. В основе этой системы – блок полупроводникового преобразователя, который включает в себя оптоэлектронные тиристоры с защитными резисторно-конденсаторными элементами и блок сигнализации.

До установки КУ среднесуточное потребление электроэнергии тяговой подстанции в 2009 г. составляло  $S = 250 - j80$  МВА,  $\text{tg}\varphi = 0,32$ . Для такой нагрузки, установленные мощности конденсаторов (18,4 Мвар) превышают правильно рассчитанные по реактивной мощности, режиму напряжения, несимметрии, гармоникам в несколько раз [10-15]. Вполне возможно, при такой громадной мощности конденсаторов тиристоры постоянно полностью открыты. Интересно бы узнать их реальное состояние и режим работы. Анализируя состояние КУ в части оценки потерь энергии, в первую очередь следует обратить внимание на установки с фильтровыми маслонаполненными реакторами типа ФРОМ-3200/35 У1. Кроме повышенной сложности технического обслуживания этих реакторов, для них характерны повышенные потери

энергии. В частности, мощность потерь только в стали сердечников реакторов составляет 10,5 кВт.

Технико-экономические расчеты показывают, что для тяговых сетей отечественных железных дорог в настоящее время применение плавно регулируемых установок КУ связано с большими капитальными вложениями, что определяет большие сроки окупаемости инвестиций (более 10-15 лет).

В общем случае для повышения экономичности работы неоднородной сети могут быть применены следующие мероприятия: деление сети низшего напряжения, применение продольно-емкостной компенсации в линиях высшего напряжения, включение вольтодобавочных трансформаторов в ветви связи сетей разных номинальных напряжений. Наивыгоднейшее решение определяется путем технико-экономических расчетов на имитационных моделях с учетом режимов работы питающих энергосистем [3-5]. В настоящее время контактная сеть участка Кобеляки – Кременчуг – Александрия секционирована нейтральными вставками и представляет собой длинные консольные участки с односторонним питанием.

Параллельно работающие электротяговая сеть 27,5 кВ и сети 110, 154, 330 кВ (рис. 1) разнородны и передача мощности по ним происходит при увеличенном значении потерь активной мощности и энергии, то есть при сниженной экономичности работы сети в целом. Неоднородность тяговых и питающих сетей энергосистем приводит к увеличению эквивалентного активного сопротивления  $R_{eq}$  на пути передачи энергии. Так, если для однородной сети, эквивалентное активное сопротивление  $R_{eqo}$  будет равно

$$R_{eqo} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{r}{2}, \text{ то для разнородной, граф которой}$$

показан на рис. 1,б,  $R_{eq} = Re \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$ , и увеличение

активного сопротивления можно определить следующим выражением

$$\frac{R_{eq} - R_{eqo}}{R_{eqo}} = \frac{(\xi_1 - \xi_2)^2}{2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}, \quad (1)$$

где  $\xi_1, \xi_2$  – отношения реактивного сопротивления к активному, соответствующих ветвей графа.

Расчеты с реальными значениями сопротивлений по выражению (1) позволяют сделать вывод о том, что при параллельной работе сетей 110 и 27,5 кВ, 154 и 27,5 кВ приходится ожидать увеличения эквивалентного сопротивления на 15-20 %. Следовательно, на 15-20 % большими будут потери мощности.

Основной нагрузкой сети является нагрузка системы  $\dot{J}_1$  и  $\dot{J}_{10}$ , нагрузки тяговых подстанций  $\dot{J}_6, \dot{J}_7, \dot{J}_9$  имеют существенно меньшее значение. Ветви графа схемы, приведенной к одному напряжению имеют различные отношения реактивного сопротивления к активному  $\xi = x/r$ . Для приведенной схемы условия нагрева проводов сети низшего напряжения ограничивают пропускную способность всей сети. Часть сети более высокого напряжения (330 кВ, 154 кВ) недогружается, а часть сети с менее высоким

напряжением перегружается. Переток мощности идет по ветвям 6 и 10 графа схемы.

Неоднородность параллельно работающих сетей 330, 154, 110, 27,5 кВ, специфические режимы их эксплуатации сводят к минимуму преимущества замкнутых сетей, заключающиеся в большей надежности электроснабжения, лучшем качестве электроэнергии и если нет возможности учесть перетоки мощности по тяговой сети в тарифах, неизбежно использование консольных схем питания.

Тяговые подстанции Кобеляки и Кременчуг питаются от Северной энергосистемы, а Александрия – от Днепровской энергосистемы. Схема параллельной работы и секционирования тяговой сети показана на рис. 2. Включение тяговых подстанций на параллельную работу неизбежно вызовет перетоки мощности по тяговой сети даже при соответствии нормированных значений напряжений на первичных обмотках по причине различия их мощностей.

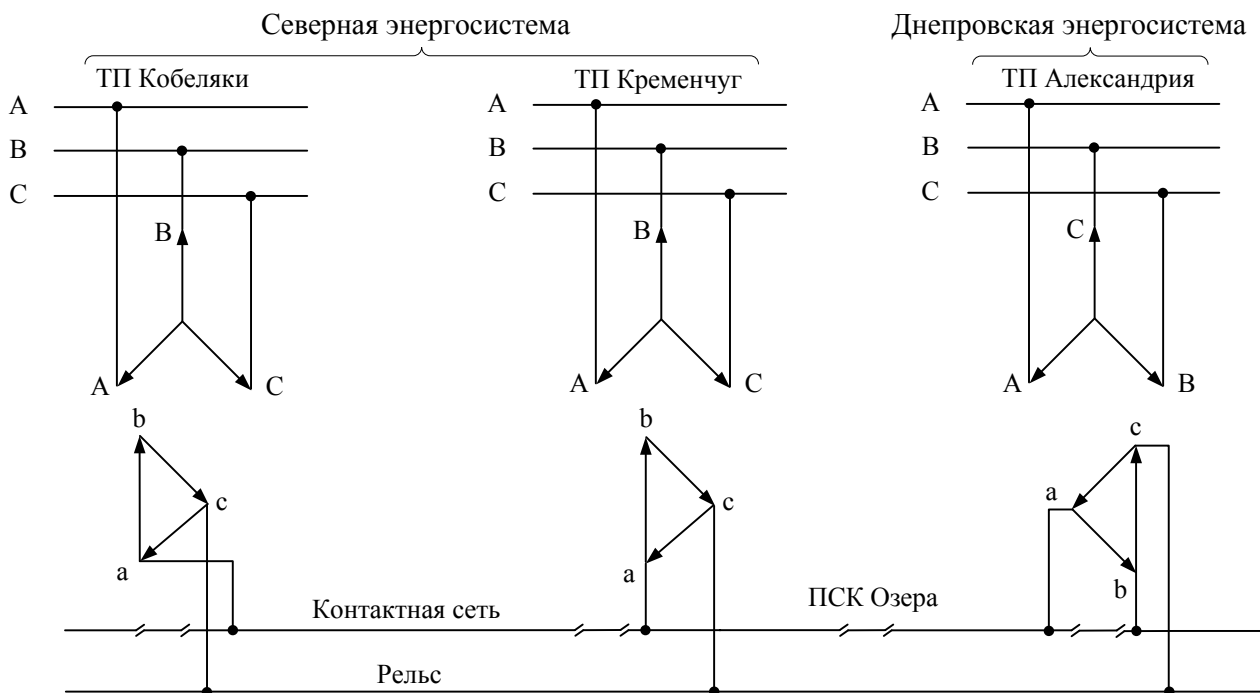


Рис. 2. Схема параллельной работы тяговых подстанций

Учитывая, что полный расход электроэнергии тяговой подстанции состоит из расхода электроэнергии на тягу поездов, потерь и перетоков электроэнергии по тяговой сети, можно предложить формулу для определения перетока

$$W_{over} = W - \Delta W - W_{TS} = \sum_{i=1}^n (I_{shi} \dot{U}_{ti} - \Delta \dot{S}_i) - W_{Tsi}^*$$

где  $W$  – полный расход электроэнергии тяговой подстанции;  $W_{TS}$  – расход электроэнергии на тягу поездов;  $\Delta W$  – потеря энергии в тяговых сетях;  $I_{shi}$  – сопряженный комплекс мгновенных значений токов плеч питания тяговой подстанции;  $\dot{U}_{ti}$  – мгновенное значение напряжения на шинах тяговой подстанции;  $n$  – количество решенных мгновенных схем при имитационном моделировании режимов электротяговых сетей.

Предварительная оценка схемы питания тяговой сети и выбор схемы, позволяющей приблизиться к энергосберегающему режиму системы тягового электроснабжения, определяется моделированием перетоков мощности и потерь энергии. В то же время реализация автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии на всех железных дорогах Украины позволяет уже сегодня использовать данные

счетчиков электроэнергии тяговых подстанций и осуществлять фактическое определение расходов электроэнергии при различных схемах питания. Последние модификации счетчиков на тяговых подстанциях (при соответствующем программном обеспечении) могут измерять и потери энергии на межподстанционной зоне. Анализируя эту информацию, энергодиспетчер может выбрать энергосберегающую схему питания [5].

**2. Вынужденные режимы работы подвижных тяговых подстанций и питающих линий энергосистем.** Реальности сегодняшнего дня таковы, что, практически не имея резерва, подвижные подстанции длительное время работают вместо стационарных на грузонапряженных участках, а на некоторых сверхдлинных консольных участках нагружены только одним плечом питания, что приводит к резкой несимметрии токов фаз тяговых трансформаторов (наименее нагруженными являются две фазы) и в итоге к повышенным потерям энергии [5, 6].

В мае 2014 г. была введена в эксплуатацию передвижная подстанция «Тяга Кременчуг», которая присоединена непосредственно к магистральным электрическим сетям Северной энергосистемы, а именно ПС-330 «Кременчуг». Режимы ее работы определены техническими условиями, в том числе и режимы при питании длинных консольных участков одним плечом

питания («отстающей» или «опережающей» фазой) [8]. Это необходимо для реализации перевозочного процесса по условию обеспечения минимально допустимого уровня напряжения электроподвижного состава на лимитирующих участках ( $U = 21$  кВ). Как показано ниже такие режимы работы передвижной подстанции вызывают протекание в одной из фаз питающей линии тяговых трансформаторов активно-емкостного тока и, как результат, генерацию энергии в питающую сеть линии электропередачи 154 кВ, что и фиксируется расчетными электросчетчиками. Согласно теории электрических сетей и существующих правил учета электроэнергии, для таких режимов трехфазной питающей сети необходимо использование векторного метода, т.е. учета электроэнергии как сумм энергий во всех фазах с учетом знака.

Известно, что на дорогах однофазного тока питание тяговой сети, как правило, осуществляется от трехфазной линии передачи через трансформаторы, соединенные в ту или иную схему [3]. Из всех возможных схем соединения обмоток трехфазных трансформаторов наибольшее распространение на железных дорогах Украины получила схема, в которой тяговая обмотка соединена в треугольник. При соединении тяговых обмоток в треугольник загружаются хоть и не одинаково, но все три фазы высоковольтной линии. При этом возможно питание районной нагрузки от третьей обмотки трансформатора напряжением 10 или 35 кВ. Первичная обмотка трехфазного трансформатора всегда соединяется в звезду. При соединении тяговой обмотки в треугольник нет цепи для токов нулевой последовательности основной частоты. В этом случае значительно меньше мешающее влияние высоковольтной линии на линии связи. Указанные обстоятельства оказали решающее влияние на то, что тяговая обмотка трехфазного трансформатора соединяется в треугольник. Более равномерная нагрузка фаз трехфазной линии передачи достигается при питании тяговых подстанций от всех трех фаз линии передачи. В этом случае секции тяговой сети слева и справа от подстанции питаются от различных фаз линии передачи и, следовательно, имеют напряжения, не совпадающие по фазе друг с другом.

При рассмотрении схем тяговых подстанций за положительное направление токов ( $I_A, I_B, I_C$ ) в линии передачи, в ответвлениях от линии передачи к подстанции, а также в фидерах, питающих тяговую сеть ( $I_L, I_R$  и  $I_P$ ), будем принимать направление от питающего центра к потребителю. За положительное направление токов в электрических локомотивах будем принимать направление от контактного провода к рельсу. Для схемы питания (рис. 3) совмещенная векторная диаграмма напряжений и токов для частного случая (наименее нагруженными являются две фазы) показана на рис. 4. При построении диаграммы принимаем коэффициент трансформации равным единице и пренебрегаем током холостого хода и потерями напряжения в обмотках. Тогда напряжения  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  и соответственно напряжения  $\dot{U}_{ac}, \dot{U}_{ba}$  и  $\dot{U}_{cb}$  будут представляться одними и теми же векторами (рис. 4). Вектор тока  $\dot{I}_L$  (левая сторона) принятого на-

пряжения следует ориентировать относительно вектора напряжения  $\dot{U}_{ac}$ . На векторной диаграмме показан ток  $\dot{I}_L$ , сдвинутый от «своего» напряжения на некоторый угол  $\varphi_L$ . Вектор тока  $\dot{I}_R$  (идущего вправо от подстанции) при направлении, показанном на рис. 3, ориентируется от вектора «своего» напряжения  $-\dot{U}_{cb}$ , противоположного напряжению  $\dot{U}_{cb}$ , показанному на диаграмме (рис. 4). Отложив на диаграмме напряжение  $-\dot{U}_{cb}$  (показано пунктиром), сможем относительно него со сдвигом на некоторый угол  $\varphi_R$  нанести вектор тока  $\dot{I}_R$ . Зная  $\dot{I}_L$  и  $\dot{I}_R$  нетрудно найти ток  $\dot{I}_P$  в проводе, присоединенном к рельсу, как уравновешивающую их величину (как так  $\dot{I}_L + \dot{I}_R + \dot{I}_P = 0$ ), а также токи фаз трансформатора [3]:

$$\dot{I}_a = \frac{2}{3} \dot{I}_L + \frac{1}{3} \dot{I}_R; \dot{I}_b = \frac{1}{3} \dot{I}_R - \frac{1}{3} \dot{I}_L; \dot{I}_c = -\frac{2}{3} \dot{I}_R - \frac{1}{3} \dot{I}_L.$$

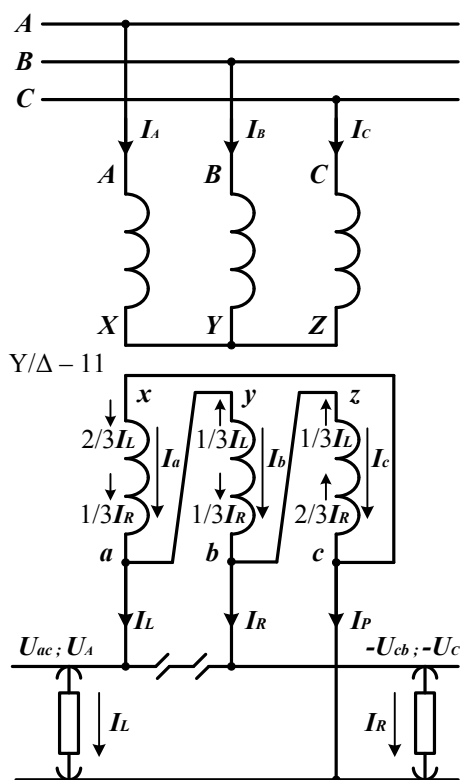


Рис. 3. Схема питания тяговой сети однофазного тока при помощи трехфазного трансформатора, соединенного по схеме Y/Δ-11

Левая фидерная зона с током  $\dot{I}_L$  питается от напряжения  $\dot{U}_{ac}$ . Это напряжение генерируется как в обмотке  $ax$ , так и в обмотках  $ybzc$  (где оно получается в результате геометрического сложения напряжений двух обмоток  $by$  и  $cz$ ). Но сопротивление обмотки  $ax$  в два раза меньше сопротивления двух других обмоток, соединенных последовательно. Поэтому ток  $\dot{I}_L$  разделяется между этими генерирующими напряжение  $\dot{U}_{ac}$  обмотками в отношении 2:1. Аналогичным образом делится и ток  $\dot{I}_R$ . Можно заметить (рис. 3), что наименее нагруженной фазой является та фаза треугольника, которая непосредственно не соединена с рельсами. В данном случае, когда одна из нагрузок,  $\dot{I}_L$  или  $\dot{I}_R$ , равна нулю, наименее нагруженными оказываются две фазы.

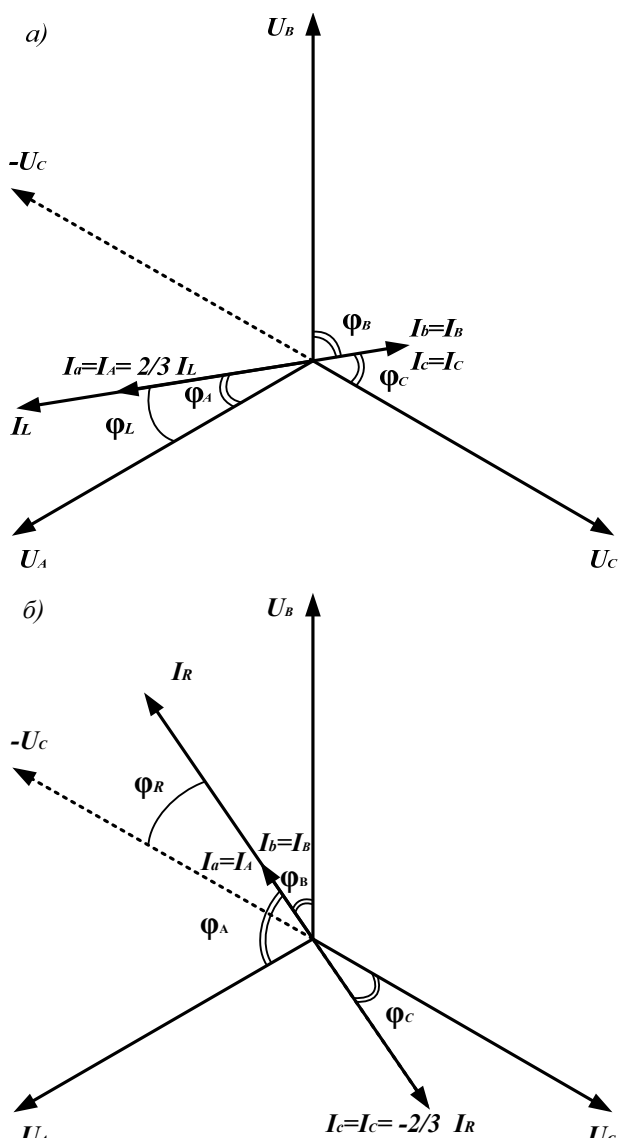


Рис. 4. Векторная диаграмма для определения токов фаз трехфазного трансформатора для частного случая: а – нагрузка  $\dot{I}_R$  правого плеча питания равна нулю; б – нагрузка  $\dot{I}_L$  левого плеча питания равна нулю

Разберем более подробно частный случай, когда наименее нагруженными оказываются две фазы, например, при питании тяговой нагрузки только левого плеча «отстающей» фазой (рис. 4,а) или только правого плеча «опережающей» фазой (рис. 4,б). При питании нагрузки левого плеча  $\dot{I}_L$  «отстающей» фазой (рис. 4,а) углы сдвига фаз между токами  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  и напряжениями  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$  значительно увеличиваются. Заметим, что  $\varphi_A = \varphi_L$ , ток  $\dot{I}_B$  отстает от напряжения  $\dot{U}_B$  на угол  $\varphi_B$ , а  $\dot{I}_C$  опережает напряжение  $\dot{U}_C$  на угол  $\varphi_C$ . Таким образом, одна из наименее нагруженных фаз тягового трансформатора начинает генерировать ток в питающую сеть. При питании нагрузки правого плеча  $\dot{I}_R$  «опережающей» фазой (рис. 4,б)  $\varphi_C = \varphi_R$ , ток  $\dot{I}_B$  опережает напряжение  $\dot{U}_B$  и теперь эта фаза тягового трансформатора генерирует ток в питающую сеть.

При наличии районной нагрузки на тяговой подстанции и малых тяговых нагрузках такого режима

может и не быть, но для передвижных подстанций (РУ-10 кВ для районных потребителей не всегда проектируются) они неизбежны.

Экспериментальные исследования проводились для нормального и вынужденного режимов работы электротяговой сети. Вынужденным (временным) режимом, в условиях работы передвижной тяговой подстанции, считается режим, при котором участок Кременчуг–Озера питается напряжением 27,5 кВ фазы А, а фаза В находится в холостом режиме. Нормальным режимом будем считать режим, при котором тяговая подстанция питает участок Кременчуг – Озера (фаза А) и Кременчуг – Кобеляки (фаза В). Установлено, что мощность передвижной тяговой подстанции «Тяга Кременчуг» 20 МВт не позволяет обеспечить процесс перевозок на консольном участке тяговой сети длиной 39,5 км Кременчуг–Озера в нормальном режиме по причине необходимости обеспечения минимально допустимого уровня напряжения 21 кВ на пантографе электроподвижного состава лимитирующего перегона.

Приведенные результаты измерений подтверждают, что обратное направление энергии в наименее нагруженной фазе В со стороны высшего напряжения возникает в результате смещения токов в обмотке  $ub$  тягового трансформатора в вынужденном режиме работы передвижной подстанции «Тяга Кременчуг».

Экспериментальными исследованиями подтверждены причины возникновения режима генерации в фазе В ВЛ-154 кВ и соответствие тяговой нагрузки требованиям ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в сетях электроснабжения общего назначения».

Отсутствие источника генерации со стороны тяговой нагрузки подтверждена экспериментальными измерениями на вводе 27,5 кВ тягового трансформатора передвижной подстанции «тяга Кременчуг» при различных нагрузках на фидерной зоне Кременчуг – Озера (табл. 1). Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические исследования по вопросу применения векторного алгоритма учета объемов электроэнергии при питании передвижных тяговых подстанций от магистральных электрических сетей НЕК Укрэнерго.

**3. Оценка учета электрической энергии на тяговых подстанциях.** Известно, что на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог приборы коммерческого учета электрической энергии должны устанавливаться на границе балансовой принадлежности оборудования, то есть на уровне питающего напряжения тяговых трансформаторов. Однако на большинстве тяговых подстанций учет электрической энергии ведется на уровне низкого и среднего напряжения. При этом потери электрической энергии в тяговых и понизительных трансформаторах определяются расчетным путем. Устройство учета электрической энергии на уровнях низкого и среднего напряжения объясняется отсутствием измерительных трансформаторов тока и напряжения на уровне высокого напряжения трансформаторов стационарных подстанций старого типа, а на передвижных они не предусмотрены даже проектом.

Таблица 1

## Экспериментальные измерения на вводе 27,5 кВ ТП «Тяга Кременчуг»

№	№ изм.	$P_a$ , кВт	$P_b$ , кВт	$Q_a$ , квар	$Q_b$ , квар	$U_{ab}$ , В	$U_{ca}$ , В	$U_{bc}$ , В	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$\varphi_a$	$\varphi_b$
1	32	2604,3	60,9	577,5	38,9	102,6	94,6	86,2	99,0	2,6	133,2	272,6
2	36	3313,8	64,7	498,6	24,3	102,4	95,3	84,7	122,4	2,5	128,9	260,8
3	37	4513,3	64,8	156,0	20,2	101,6	95,0	83,4	162,1	2,5	122,7	257,2
4	41	4868,1	63,5	-1004,9	24,9	101,3	95,7	83,6	179,3	2,6	108,3	261,5
5	40	6391,0	61,4	-1944,8	24,8	100,2	95,3	82,6	239,6	2,5	103,1	262,2
6	33	8250,0	62,4	-2558,6	17,8	99,3	95,6	82,3	306,6	2,5	102,9	255,3
7	34	8789,0	63,0	-2328,2	18,9	99,0	96,3	81,1	321,4	2,6	104,6	256,6
8	25	10142,0	62,9	-3898,4	27,6	98,3	97,2	81,7	383,8	2,8	98,9	263,1
9	21	13013,0	186,4	-5024,8	78,8	96,8	96,3	78,2	485,4	8,1	99,1	263,1
10	10	14855,5	203,7	-5802,5	70,0	95,6	97,1	78,0	555,0	8,8	98,0	258,4
11	11	16439,5	218,1	-6666,0	70,7	94,8	96,6	76,5	615,2	9,5	98,2	258,3
12	14	18155,5	227,0	-6886,0	78,8	94,0	96,9	74,3	673,6	10,2	99,3	259,2
13	19	21235,5	246,5	-7804,5	87,8	92,5	97,9	72,4	781,0	11,4	99,8	259,8

Примечание. 9-13 – кратковременные включения фазы В для питания тяговой сети фидерной зоны Кременчуг – Кобеляки; (коэффициент ТТ – 1000/5, коэффициент учета – 55000).

Точки расчета с ОРЭ за потребленную электроэнергию расположены в ячейке № 2 ОРУ-154 кВ ПС-330 «Кременчуг». Расчетный учет на тягу поездов установлен на фидерах контактной сети, а технический учет – на вводе 27,5 кВ силового трансформатора передвижной подстанции «Тяга Кременчуг». Сравнительный анализ объема покупаемой и отпу-

щенной электрической энергии за период май – ноябрь 2014 г. свидетельствует о наличии небаланса, который превышает 10 % (табл. 2, 3). Анализ данных (см. табл. 2, 3) показывает, что расчет объема перетока электрической энергии в точке расчета осуществляется преднамеренно или ошибочно по следующему принципу.

Таблица 2

## Отчетные данные отпуска и приема электроэнергии ТП «Тяга Кременчуг»

Месяц	Объем электроэнергии на ВЛ-154 кВ, тыс. кВт·ч		Прием на шины 27,5 кВ, кВт·ч	Расчетные потери, тыс. кВт·ч		Небаланс ВЛ-154 кВ	
	Отпуск	Генерация		в трансформаторе	ВЛ-154	тыс. кВт·ч	%
Май	3 270,6	406,8	2 855,7	27,082	1,686	386,115	11,8
Июнь	3 643,2	457,2	3 172,3	27,877	2,223	440,758	12,1
Июль	3 965,4	472,68	3 472,6	29,541	2,557	460,697	11,6
Август	4 215,6	526,86	3 666,3	30,629	2,904	515,796	12,2
Сентябрь	4 726,8	600,48	4 100,5	29,427	3,881	593,009	12,5
Октябрь	5 238,0	635,04	4 573,2	31,544	4,594	628,704	12,0
Ноябрь	5 455,8	671,58	4 751,7	31,961	5,218	666,926	12,2

Таблица 3

## Отчетные балансы отпуска и приема электроэнергии ПС-330 Кременчуг

Месяц	Получено на шины 154 кВ, тыс. кВт·ч			Отпущено с шины 154 кВ, тыс. кВт·ч	Небаланс шин 154 кВ, тыс. кВт·ч
	От автотрансформатора	От других источников	От тяговой подстанции		
Май	169 862,4	4 908,6	406,8	175 132,4	-361,8
Июнь	163 753,2	4 307,4	457,2	168 269,4	-208,8
Июль	185 108,4	8 172,0	473,4	193 366,8	-86,4
Август	223 824,6	543,6	527,4	224 535,6	-167,4
Сентябрь	206 530,2	1 656,0	599,4	208 222,2	-64,8
Октябрь	212 432,4	6 161,4	635,4	218 410,2	-421,2
Ноябрь	200 809,8	7 444,8	671,4	208 215,0	39,6

Установленные в расчетной точке электросчетчики настроены на пофазный учет в обоих направлениях, а при определении объема перетока электрической энергии учитываются объемы отпущенной электроэнергии по каждой фазе отдельно. Таким образом, при наличии режима генерации в любой

фазе данный объем из расчета исключается. В результате такого расчета железная дорога ежемесячно, начиная с мая 2014 г. (с момента ввода в эксплуатацию ВЛ-154 кВ и передвижной тяговой подстанции «Тяга Кременчуг»), закупает электрической энергии почти на 500 тыс. кВт·ч больше, чем постав-

ляет потребителю. При месячном объеме перетока по ВЛ-154 кВ 4000-4500 тыс. кВт·ч потери на ВЛ превышают 10 % при нормативных потерях по тарифу 1-го класса закупки энергии 3,66-3,86 %. В итоге небаланс между объемом электрической энергии, отпущенным с ПС-330 «Кременчуг», и фактическим объемом, полученным железной дорогой на ТП «Тяга Кременчуг» за период май-ноябрь 2014 г., составил 3 771 тыс. кВт·ч. Вместе с тем следует отметить, что при определении величины небаланса шин 154 кВ ПС-330 «Кременчуг» и подстанции в целом расчет осуществляется с учетом полнофазного режима перетока электроэнергии во всех точках учета, в том числе и с учетом генерации фазы В ВЛ-154 «Тяга Кременчуг». Таким образом, алгоритм расчетов при составлении баланса ПС-330 «Кременчуг» является отличным от алгоритма расчетов объема для поставщиков электрической энергии, присоединенных к этой подстанции, что противоречит установленным правилам.

#### Выводы.

1. Анализ электрических систем с тяговыми нагрузками показывает, что для повышения их энергоэффективности нужна полномасштабная программа модернизации. Инвестиционные программы структур входящих в состав ПАТ «Укрзалізниця» должны быть синхронизированы по своим технологическим показателям, а также по критериям энергоэффективности и качества энергообеспечения с аналогичными инвестиционными программами внешней энергетики.

2. При анализе рисков и угроз энергообеспечению процесса перевозок железных дорог со стороны внешнего электроснабжения предлагается использовать систему рейтинговых оценок состояния энергетической безопасности по совокупности следующих индикаторов: надежность системы энергоснабжения, с учетом высокой меры износа основных производственных фондов энергетического хозяйства региона; отношение суммы мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей к максимальной электрической нагрузке потребителей на территории региона; оценка перетоков мощности в электротяговой сети и учет их в тарифах при расчетах за электроэнергию.

3. Для повышения качества электроэнергии, надежности и безопасности электроснабжения и снижения расходов и времени строительства тяговых подстанций предлагаются новые схемотехнические решения внешнего электроснабжения, которые базируются на присоединении к сетям НЕК «Укрэнерго» (220-330 кВ) и использовании устройств регулируемой компенсации реактивной мощности.

4. В результате теоретических и экспериментальных исследований вынужденных режимов работы передвижной тяговой подстанции «Тяга Кременчуг» установлено, что при отсутствии нагрузки левого или правого плеча питания тяговой сети одна из двух наименее нагруженных фаз тягового трансформатора вызывает протекания в одной из фаз питающей линии активно-емкостного тока обратного направления, что фиксируется расчетными электросчетчиками с пофазным алгоритмом расчетов как генерация наименее

нагруженной фазы. Такие режимы линий энергосистем неизбежны и вызваны необходимостью обеспечения минимально допустимого уровня напряжения электроподвижного состава на длинных консольных участках тяговой сети и для них необходимо использование векторного метода определения объема электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетична стратегія Укрзалізниці на період до 2015 р. і на перспективу до 2020 р. Затв. державною адміністрацією залізничного транспорту України 26.11.2013 р. – К., 2013. – 104 с.
2. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор). – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
3. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Рене Пелисье. Энергетические системы: пер. с франц. [предисловие и коммент. В.А. Веникова]. – М.: Высш. шк., 1982. – 568 с.
5. Доманський І.В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями: монографія. – Харків: Вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.
6. Доманский И.В. Режимы в электрических системах с передвижными тяговыми подстанциями переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – № 1. – С. 19-25.
7. Доманський І.В. Електрифікація залізниць – джерело підвищення енергетичної ефективності процесу перевезень // Залізничний транспорт України. – 2014. – №1. – С. 19-23, 31-33.
8. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009: Затв. Наказ Укрзалізниці 24.12.2004 р., № 1010-ЦЗ. / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 80 с.
9. Доманський І.В. Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №3. – С. 54-63. doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
10. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения // К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
11. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии // М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
12. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог // М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
13. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
14. Доманский И. В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №3. – С. 59-66. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.09.
15. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – №1. – С. 26-34.

#### REFERENCES

1. *Energetichna strategija Ukrzaliznici na period do 2015 r. i na perspektivu do 2020 r. Zatv. derzhavnoju administraciju zalizничного транспорту Ukrainu 26.11.2013 r.* [Energy Strategy Railways for the period up to 2015 and for the future by 2020. Approved by State Administration of Railway Transport of Ukraine 11.26.2013]. Kyiv, 2013. 104 p. (Ukr).

2. Kornienko V.V., Kotelnikov A.V., Domanskyi V.T. *Elektrifikacija zheleznyh dorog. Miroye tendencii i perspektivy (Analiticheskij obzor)* [Electrification of railways. Global trends and perspectives (Analytical review)]. Kyiv, Transport of Ukraine Publ., 2004. 196 p. (Rus).
3. Markvard K.G. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p. (Rus).
4. Rene Pelis'e. *Energeticheskie sistemy* [Energy Systems]. Moscow, Higher School Publ., 1982. 568 p. (Rus).
5. Domanskyi I.V. *Osnovi energoefektivnosti elektrichnih sistem z tjavovimi navantazhennjami: monografija* [Basics of energy efficiency of electrical systems with traction load: monograph]. Kharkiv, TOV «Tsentri informatsiyi transportu Ukrainy» Publ., 2016. 224 p. (Ukr).
6. Domanskyi I.V. Modes in electrical systems with mobile AC traction substations. *Vestnik of Railway Research Institute*, 2016, vol.75, no.1. pp. 19-25. (Rus).
7. Domanskyi I.V. Electrification of railways – source of energy efficiency of process transportations. *Railway Transport of Ukraine*, 2014, no. 1, pp. 19-23, 31-33. (Ukr).
8. *Pravyta ulashuvannia systemy tiahovoho elektropostachannia zaliznyts Ukrainy. № TsE-0009: Zatv. Nakaz Ukrzaliznytsi 24.12.2004 r., № 1010-TsZ. / Min-vo transp. ta zviazku Ukrainy* [Terms ordering system Traction Power railways of Ukraine. Number IS-0009: approved. Order Railways year 24.12.2004., № 1010-CH. Ministry of Transport and Communications of Ukraine]. Kyiv, 2005. 80 p. (Ukr).
9. Domansky I.V. System analysis of external power supply of railways traction substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no.3, pp. 54-63. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
10. Shidlovskij A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. *Optimizacija nesimmetrichnyh rezhimov sistem elektrosnabzhenija* [Optimization of asymmetrical modes of power supply systems]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 174 p. (Rus).
11. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo elektroenergii* [Loss of electricity. Reactive power. Power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p. (Rus).
12. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. *Kondensatornye ustanovki elektrificirovannyh zheleznyh dorog* [Condenser units for electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983. 183 p. (Rus).
13. German L.A., Goncharenko V.P. Modern longitudinal capacitive compensation scheme in the traction power supply. *Bulletin of Rostov State Transport University*, 2013. no.2. pp. 12-17. (Rus).
14. Domanskyi I.V. Modes of operation of the system of traction power AC using reactive power compensation devices. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.3, pp. 59-66. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.09.
15. German L.A., Serebryakov A.S., Maksimova A.A. Filter compensating installation in AC traction networks. *Vestnik of Railway Research Institute*, 2016. no.1. pp. 26-34. (Rus).

Поступила (received) 29.11.2016

Бондаренко Владимир Омелянович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Доманский Илья Валерьевич<sup>1</sup>, к.т.н.,  
 Костин Геннадий Николаевич<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»,  
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
 e-mail: dvt.nord@mail.ru

<sup>2</sup>Харьковское региональное отделение  
 филиала «Энергосбыт» ПАО «Укрзалізниця»,  
 61052, Харьков, ул. Конарева, 7,  
 e-mail: ee\_ugd\_kh@ukr.net

V.O. Bondarenko<sup>1</sup>, I.V. Domanskyi<sup>1</sup>, G.N. Kostin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 21, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>Kharkiv regional department of the branch «Energosbyt»  
 of Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway»,  
 7, Konareva Str., Kharkiv, 61052, Ukraine.

#### **Analysis of energy efficiency of operating modes of electrical systems with the traction loads.**

*Innovative scenarios of reliable energy supply of transportation process aimed at reducing the specific energy consumption and increase energy efficiency of the systems of electric traction. The paper suggests innovative energy saving directions in traction networks of railways and new circuit solutions accessing traction substations in energy systems networks, ensure energy security of the transportation process. To ensure the energy security of rail transport special schemes were developed to propose the concept of external power traction substations, which would increase the number of connections to the networks of 220 – 330 kV, as well as the creation of transport and energy corridors, development of its own supply of electric networks of 110 kV substations and mobile RP-110 kV of next generation. Therefore, the investment program of the structures owned by the Ukrainian Railways (Ukrzaliznytsia) need to be synchronized in their technological characteristics, as well as the criteria of reliability and quality of power supply with the same external energy investment programs. It is found that without any load on left or right supplying arm one of two less loaded phases of traction transformer begins generating specific modes in the supplying three-phase line. Thus, modes of mobile substation cause leakage in one of the phases of the supply line of traction transformers of active-capacitive current, and as a result generating energy in the main power line of 154 kV, which is fixed and calculated by electricity meters. For these three phase mode supply network is necessary to use 1st algorithm, i.e. taking into account the amount of electricity as the energy in all phases. For effective application of reactive power compensation devices in the AC traction power supply systems it is proposed to develop regulatory documentation on necessity of application and the order of choice of parameters and placement of compensation systems taking into account operation mode of power systems and the use of software systems with imitation of instantaneous inter-related schemes of transport loads. References 15, tables 3, figures 4.*

**Key words: energy security; railway transport; the process of transportation; networks of power systems; efficiency of modes; mobile traction substations.**



Ю.Н. Веприк

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

*Показані необхідність переходу до розробки моделей на основі рівнянь у фазних координатах і можливості підвищення ефективності таких розробок за рахунок використання неявних методів інтегрування, переходу на більш високий рівень декомпозиції і уніфікації моделей, що розробляються.* Бібл. 3.

*Ключові слова:* стаціонарні режими роботи, електричні мережі, математичні моделі, фазні координати, перехідні процеси.

*Показаны необходимость перехода к разработке моделей на основе уравнений в фазных координатах и возможности повышения эффективности таких разработок за счет использования неявных методов интегрирования, перехода на более высокий уровень декомпозиции и унификации разрабатываемых моделей.* Библ. 3.

*Ключевые слова:* стационарные режимы работы, электрические сети, математические модели, фазные координаты, переходные процессы.

**Введение.** Современный этап развития электрических систем характеризуется тем, что все более существенным становится влияние целого ряда факторов, негативно влияющих на качество электрической энергии. Эти факторы связаны, во-первых, с появлением новых технологических процессов и нового оборудования, а, во-вторых, со старением и износом основного оборудования электрических систем. Внедрение новых технологических процессов, как правило, связано с увеличением источников высших гармоник, искажающих форму кривой напряжения в электрических сетях, а износ оборудования приводит к увеличению источников несимметрии, так как отдельные элементы сети вынужденно работают неполным числом фаз в течение продолжительного времени, необходимого для проведения профилактических и ремонтных работ на поврежденной фазе.

Для решения задач анализа работы электрических систем в этих новых условиях необходимы разработки и новых, более полных и точных математических моделей и соответствующих программных средств, позволяющих воспроизводить режимы работы систем при наличии источников несимметрии и гармоник. В рамках традиционного подхода к моделированию, основанного на переходе от реальной трехфазной схемы к однофазным эквивалентам (в симметричных составляющих,  $d-q-0$ ,  $\alpha-\beta-0$  координатах и др.), такие модели в принципе не могут быть реализованы, так как сам переход строго обоснован и возможен лишь при наличии симметрии и синусоидальности [1]. По этой же причине попытки развития моделей, основанных на переходе к однофазным эквивалентам, в направлении, обеспечивающем учет несимметрии и гармоник, не имеют смысла.

**Цель статьи** – обоснование необходимости перехода к разработке моделей в фазных координатах и определение путей повышения эффективности таких разработок.

**Изложение основного материала.** Необходимость перехода от однофазных эквивалентов к трехфазным моделям (в фазных координатах), в условиях, когда возможности развития моделей на основе традиционного подхода исчерпаны, становится очевидной. Однако трехфазные модели, воспроизводящие режим трех фаз с учетом всех основных влияющих факторов, особенно в переходных процессах, значительно сложнее однофазных и, соответственно, их разработка и программная реализация требуют больших затрат времени и средств [2]. Поэтому количество работ в этом направлении до сих пор невелико.

На кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» разработка моделей электрических систем на основе уравнений в фазных координатах в стационарных и переходных, симметричных и несимметричных режимах ведется в течение достаточно продолжительного времени, и уже имеющийся опыт показывает, что эти сложности преодолимы, если:

Во-первых, для решения систем дифференциальных уравнений использовать неявные методы численного интегрирования. При применении неявных методов численного интегрирования отпадает необходимость приведения систем дифференциальных уравнений к нормальной форме Коши, что существенно снижает трудоемкость этого этапа моделирования и его программной реализации, особенно при моделировании сложных систем. Кроме того, неявные методы обеспечивают более высокую вычислительную устойчивость. И еще одним фактором в пользу выбора неявных методов численного интегрирования для решения поставленных задач является то, что при этом обеспечивается возможность полного структурного моделирования – т.е. необходимо сначала разработать конечно-разностные (дискретные) модели отдельных элементов сложной системы, а затем выполнять формирование модели системы в целом.

Во-вторых, перейти на более высокий уровень декомпозиции – в качестве элементов расчетной схемы рассматривать не двухполюсные  $R, L, C$  элементы, а трехфазные многополюсники, соответствующие трехфазным элементам сети. Схемы замещения сложных систем, составленные даже на одну фазу, имеют большое число двухполюсных  $R, L, C$  элементов и сложную конфигурацию, при переходе к трехфазным схемам и при учете наряду с продольными параметрами поперечных емкостных и индуктивных связей линий электропередачи их количество возрастает более чем втрое, что значительно усложняет процедуру формирования систем уравнений как в стационарных, так и, тем более, в переходных режимах. При переходе на уровень трехфазных многополюсников количество элементов сокращается, топология схемы упрощается, все особенности конструктивного исполнения, параметры фаз и их взаимное влияние отражается в матрицах параметров третьего порядка соответствующих элементов и процедура составления систем уравнений на уровне трехфазных многополюсников становится менее сложной. Следует также отметить, что при переходе на уровень трехфазных многополюсников матрицы коэффициентов систем уравнений в целом как в стационарных, так и в переходных режимах приобретают четко выраженную блочную структуру, и возможности повышения эффективности моделирования обеспечиваются за счет использования новых средств современных языков программирования (вложенные типы, объектно-ориентированное программирование и др.).

И, в-третьих, представить уравнения трехфазных многополюсных элементов в фазных координатах в унифицированной форме. При использовании для решения систем дифференциальных уравнений неявных методов численного интегрирования, как уже было сказано, обеспечивается возможность реализации формализованных процедур построения модели системы по предварительно сформированным моделям отдельных элементов. При этом существенного упрощения всех этапов моделирования можно достичь, если дискретные модели всех элементов системы на этапе их формирования представить в унифицированной форме.

При разработке моделей элементов целесообразно выделить две группы элементов:

- статические элементы (воздушные и кабельные линии (ВЛ и КЛ), силовые трансформаторы и автотрансформаторы, статические элементы узлов нагрузки, средства компенсации реактивной мощности);
- вращающиеся электрические машины (синхронные генераторы, синхронные компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели).

Уравнения переходных процессов любого из статических элементов (ВЛ, КЛ, трансформаторы и др.) в фазных координатах в матричной форме имеют вид:

$$[L]_{ij}^F \frac{d}{dt} [i]_{ij}^F + [R]_{ij}^F [i]_{ij}^F = [\Delta u]_i^F, \quad (1)$$

и для разных элементов отличаются только порядком и структурой матриц  $[L]$  и  $[R]$ , где  $[L]$  – матрица соб-

ственных и взаимных индуктивностей фаз (обмоток трансформатора, проводов ВЛ или КЛ и др.),  $[R]$  – матрица активных сопротивлений фаз соответствующего элемента.

Для интегрирования неявными методами уравнения элемента (1) в фазных координатах необходимо представить в нормальной форме

$$\frac{d}{dt} [i]_{ij}^F = [L]_{ij}^{F-1} [\Delta u]_{ij}^F - [L]_{ij}^{F-1} [R]_{ij}^F [i]_{ij}^F, \quad (2)$$

и при использовании для дискретизации уравнений, например, метода Эйлера-Коши

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2} (f_{k+1} + f_k)$$

выполнить аппроксимацию исходных дифференциальных уравнений по формулам:

$$[i]_L^{(K+1)} = [i]_L^{(K)} + \frac{h}{2} \left( \frac{d}{dt} [i]_L^{(K+1)} + \frac{d}{dt} [i]_L^{(K)} \right). \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения для производных из (2), получим выражения:

$$[i]_{ij}^{(k+1)} = [i]_{ij}^{(k)} + \frac{h}{2} \left( [L]_{ij}^{-1} [u]_{ij}^{(k+1)} - [L]_{ij}^{-1} [R]_{ij} [i]_{ij}^{(k+1)} \right) + \frac{h}{2} \left( [L]_{ij}^{-1} [u]_{ij}^{(k)} - [L]_{ij}^{-1} [R]_{ij} [i]_{ij}^{(k)} \right),$$

которые можно разрешить относительно токов на текущем шаге интегрирования:

$$[i]_{ij}^{(k+1)} = \frac{h}{2} [K]_L^{(-1)} [L]_{ij}^{(-1)} [u]_{ij}^{(k+1)} + \frac{h}{2} [K]_L^{(-1)} [L]_{ij}^{(-1)} [u]_{ij}^{(k)} + [K]_L^{(-1)} [i]_{ij}^{(k)} - \frac{h}{2} [K]_L^{(-1)} [L]_{ij}^{(-1)} [R]_{ij} [i]_{ij}^{(k)},$$

где  $[K]_L = [E] + \frac{h}{2} [L]_{ij}^{-1} [R]_{ij}$ ,  $[E]$  – единичная матрица.

Полученные уравнения можно представить в виде:

$$[i]_{ij}^{(k+1)} = [Y]_{ij} [u]_{ij}^{(k+1)} + [Y]_{ij} [u]_{ij}^{(k)} + [A]_{ij} [i]_{ij}^{(k)}, \quad (4)$$

где  $[Y]_{ij}$ ,  $[A]_{ij}$  – матрицы, определяемые соответственно продольными и поперечными параметрами элемента.

Уравнения связывают напряжения и токи фаз на текущем шаге интегрирования с напряжениями и токами фаз на предыдущем шаге.

Они применимы как для моделирования переходных процессов в соответствующем элементе, так и для включения в модель системы. Причем тот факт, что уравнения разрешены относительно токов, позволяет при формировании дифференциальных уравнений системы в целом использовать наиболее эффективный узловый метод.

Воспользовавшись любым другим из неявных методов численного интегрирования, дифференциальные уравнения (1) любого статического элемента можно представить на шаге интегрирования в виде (4).

Система дифференциальных уравнений электрических машин (синхронных, асинхронных) в фазных координатах в матричной форме включает две группы уравнений:

1) уравнения потокосцеплений  

$$[\Psi]_S = [L]_S [i]_S + [L_{SR}] [i]_R, \quad [\Psi]_R = [L]_{RS} [i]_S + [L]_R [i]_R, \quad (5)$$

2) уравнения равновесия напряжений всех электрических контуров на статоре и роторе.

$$[U]_S = -\frac{d}{dt} [\Psi]_S - [R]_S [i]_S, \quad [U]_R = \frac{d}{dt} [\Psi]_R - [R]_R [i]_R, \quad (6)$$

где индексы  $S$  и  $R$  приняты для обозначения величин, относящихся к обмоткам статора и ротора, соответственно.

Потокосцепления обмоток являются функциями угла поворота ротора  $\gamma$ . Поэтому производные от потокосцеплений по времени с учетом этой зависимости имеют вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma L)}{d\gamma} \frac{d\gamma}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + [L(\gamma)] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}.$$

Подставив производные от потокосцеплений в уравнения (6), получим

$$\begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + \left( \omega \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma L)}{d\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Так как при вращении ротора индуктивности обмоток зависят от углового положения  $\gamma$  ротора, уравнения равновесия напряжений (7) содержат как трансформаторные ЭДС  $L_{ij} \frac{di}{dt}$ , обусловленные изменением тока в  $j$ -м контуре, так и ЭДС вращения  $\frac{dL_{ij}}{d\gamma} \omega_{ij}$ , обусловленные изменением индуктивностей при вращении ротора.

Однако если учесть, что ЭДС вращения, как и падения напряжения зависят от токов в обмотках, в уравнениях (7) для выражения в скобках можно принять обозначение

$$\left( \omega \begin{bmatrix} \frac{dL}{d\gamma} \end{bmatrix} + [R] \right) = [R_1],$$

и записать их в виде

$$[L] \frac{d}{dt} [i] + [R_1] [i] = \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix},$$

то можно сказать, что они аналогичны уравнениям статических элементов и отличаются тем, что элементы матриц индуктивностей фаз являются периодическими функциями времени.

Для перехода к разностным уравнениям нужно полученные уравнения разрешить относительно производных

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} = -[L(\gamma)]^{-1} \left( \omega \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} + [L(\gamma)]^{-1} \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix};$$

и перейти к разностной аппроксимации в соответствии с формулой Эйлера-Коши

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)} - h [L(\gamma)^{k+1}]^{-1} \times \\ \times \left( \omega \begin{bmatrix} \frac{dL(\gamma)^{k+1}}{d\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_S & \\ & r_R \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + \\ + h [L(\gamma)^{k+1}]^{-1} \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k+1)}.$$

Если полученное уравнение разрешить относительно токов в обмотках на  $(k+1)$ -м шаге, то уравнения примут вид:

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k+1)} = [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k+1)} + \\ + [Y(\gamma)^{(k+1)}] \begin{bmatrix} u_S \\ u_R \end{bmatrix}^{(k)} + [A(\gamma)^{(k+1)}]^{-1} \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix}^{(k)}, \quad (8)$$

где  $[Y(\gamma)]$ ,  $[A(\gamma)]$  – матрицы, элементы которых определяются собственными и взаимными индуктивностями обмоток и являются функциями угла поворота ротора  $\gamma$ .

В уравнениях (8), как и в дискретных уравнениях статических элементов электрической сети, токи в обмотках на текущем шаге численного интегрирования уравнений переходных процессов выражены через напряжения на обмотках на текущем шаге и токи в обмотках на предыдущем шаге интегрирования. В отличие от статических элементов дискретные параметры являются переменными и должны вычисляться на каждом шаге вычислительного процесса в функции углового положения роторов. В такой унифицированной форме уравнения могут быть включены в систему уравнений, решаемых на шаге численного интегрирования.

Положительный эффект, получаемый при представлении элементов электрических систем в унифицированной форме (4) – (8), заключается в том, что:

- алгоритмы моделирования переходных процессов в отдельных элементах можно рассматривать как модификации единого обобщенного алгоритма, основными элементами которого являются: расчет элементов исходных матриц  $R$ ,  $L$ , формирование матриц дискретных параметров  $Y$ ,  $A$ , расчет параметров переходного процесса на шаге;
- унификация моделей элементов позволяет унифицировать и другие этапы моделирования системы в целом – топологический анализ схемы сети, формирование системы уравнений, решение полученной системы, что, в свою очередь, существенно облегчает реализацию моделей в фазных координатах на основе структурного подхода к моделированию сложных систем.

Реализация предлагаемого подхода, выполненная в рамках исследования режимов работы электрических систем с несимметрией [3], подтверждает его эффективность и целесообразность – на единой алгоритмической и методической основе выполнена раз-

работка программных средств, позволяющих моделировать стационарные и переходные режимы при наличии произвольного количества несимметричных элементов и коммутаций.

#### **Выводы.**

Дальнейшее развитие методов и средств моделирования режимов работы электрических систем для решения актуальных задач управления ими возможно только на основе уравнений в фазных координатах.

Повышение эффективности разработок моделей в фазных координатах обеспечивается на основе применения неявных методов численного интегрирования, перехода на более высокий уровень декомпозиции, унификации моделей элементов и использования новых возможностей современных алгоритмических языков.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Голов П.В., Шаров Ю.В., Строев В.А. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах // *Электричество*. – 2007. – №5. – С. 2-11.
2. Мисриханов М.Ш. Уточнение определения мест повреждения на ВЛ при использовании фазных составляющих // *Электрические станции*. – 2001. – №3. – С. 36-40.
3. Веприк Ю.Н. Компьютерное моделирование режимов работы электрических систем: монография. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – 304 с.

#### **REFERENCES**

1. Golov P.V., Sharov Yu.V., Stroyev V.A. System of mathematical models for the calculation of transients in complex power systems. *Electricity*, 2007, no.5, pp. 2-11. (Rus).
2. Misrikhanov M.Sh. Clarification of the definition of places of damage to overhead lines by using the phase components. *Electric stations*, 2001, no.3, pp. 36-40. (Rus).

3. Vepryk Yu.N. *Komp'uternoe modelirovanie rezhimov raboty elektricheskikh sistem: monografiia* [Computer simulation of electrical systems modes: monograph]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2015. 304 p. (Rus).

*Поступила (received) 20.11.2016*

*Веприк Юрий Николаевич, д.т.н., проф.,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
тел/phone +38 057 7076246, e-mail: veprik@email.ua*

*Yu.N. Vepryk  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.*

#### **Ways to improve the efficiency of computer simulation of electrical systems modes based on equations in phase coordinates.**

*The development of electrical systems must be accompanied by the development of tools and their modeling. However, the possibility of development models, traditionally developed on the basis of the transition from the real to the single-phase three-phase circuits equivalents, represented exhausted. Therefore, along with the use of single-phase three-phase equivalents need to develop models in phase coordinates. Showing the need to move to the development of models based on equations in the phase coordinates and the possibility of increasing the effectiveness of development through the use of implicit methods of integration, the transition to a higher level of decomposition and unification models developed for the implementation of the structural approach to modeling complex systems. References 3.  
Key words: stationary modes, electric networks, mathematical models, phase coordinates, transients.*

Я.С. Бедерак

## ПРО ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ

*Метою дослідження є обґрунтування вибору найбільш доцільних економіко-математичних методів забезпечення енергоефективного режиму роботи виробничих об'єктів. Розглянуті методи можуть бути використані для вибору найкраще працюючих технологічних ліній, агрегатів, насосних, компресорних, вентиляторних установок, або інших електроприймачів з декількох їм подібних за критеріями рівної та нерівної ваги. Описано спосіб контролю енергоефективності роботи виробничих об'єктів в трикутних координатах у випадку, коли електричне навантаження залежить від двох параметрів при наявності їх граничних обмежень. Наведено приклад порівняння ефективності роботи виробничих об'єктів хімічної промисловості методами апріорного ранжування та морфологічним (геометричним). Зроблений висновок про те, що тотожність поточного значення енергоспоживання з розрахованим методом Хольта прогнозованим значенням при визначених заздалегідь оптимальних сталих згладжування визначає стабільність роботи технологічного процесу. Доведена доцільність застосування коефіцієнту автокореляції першого порядку вибірок електроспоживання для перевірки технологічних процесів на стабільність роботи. Бібл. 10, табл. 3, рис. 5.*

*Ключові слова:* електроспоживання, критерії рівної та нерівної ваги, коефіцієнт автокореляції, енергоефективність.

*Целью исследования является обоснование выбора наиболее целесообразных экономико-математических методов обеспечения энергоэффективного режима работы производственных объектов. Рассмотренные методы могут быть использованы для выбора наиболее энергоэффективных технологических линий, агрегатов, насосных, компрессорных, вентиляторных установок или других электроприемников с нескольких им подобных по равновесным и неравновесным критериям. Приведен пример сравнения эффективности работы производственных объектов химической промышленности методами априорного ранжирования и морфологическим (геометрическим). Описан способ контроля энергоэффективности работы производственных объектов в случае, когда электрическая нагрузка зависит от двух параметров при наличии предельных ограничений их, используя треугольные координаты. Сделан вывод о том, что тождество текущего значения энергопотребления с рассчитанным методом Хольта прогнозируемым значением при определенных заранее оптимальных постоянных сглаживания определяет стабильность работы технологического процесса. Доказана целесообразность применения коэффициента автокорреляции первого порядка выборок электропотребления для проверки технологических процессов на стабильность работы. Библ. 10, табл. 3, рис. 5.*

*Ключевые слова:* электропотребление, равновесные и неравновесные критерии, энергоэффективность, коэффициент автокорреляции.

**Вступ.** В промисловості часто необхідно порівняти енергоефективність подібних за будовою та функціональним призначенням двох або більше виробничих об'єктів, наприклад, технологічних ліній, агрегатів, насосних, компресорних, вентиляторних або інших установок за декількома критеріями (параметрами), щоб обрати найкраще працюючий агрегат. Для цього користуються критеріями як рівної, так і нерівної ваги. Аналогічно в практичній діяльності треба вирішувати завдання визначення моменту часу на протязі зміни, доби, декади, місяця тощо, у якому виробничий об'єкт працював найефективніше (або навпаки). Необхідно забезпечувати в режимі реального часу енергоефективність виробничих об'єктів. Ці задачі пропонується вирішувати за допомогою відомих економіко-математичних методів та параметрів.

**Метою роботи** є обґрунтування вибору найбільш доцільних економіко-математичних методів для забезпечення енергоефективного режиму роботи виробничих об'єктів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Статистичний аналіз даних в електропостачальних системах (ЕПС) промислових підприємств впровадив М.А. Денисенко в роботі [1]. Такий підхід доцільно застосовувати для інших енергоресурсів [2].

Методи прийняття рішень за критеріями рівної та нерівної ваги розглянуті в роботі [3]. В цій роботі

запропоновано обирати оптимально працюючий технічний об'єкт за допомогою процедури побудови функції корисності. Для забезпечення та контролю над енергоефективністю режиму роботи технологічних процесів доцільно застосовувати контрольні карти Шухарта [4].

**Матеріал і результати досліджень.** Дослідження довели, що для забезпечення енергоефективного режиму роботи виробничих об'єктів необхідно проводити такі заходи:

1. *Моніторинг ефективності ведення технологічного процесу у разі, коли електричне навантаження залежить від двох параметрів.*

Серед усіх методів візуалізації та контролю за технологічним процесом у разі, коли електричне навантаження залежить від двох параметрів, найпростішим є метод використання трикутних координат [5]. На рис. 1 наведений приклад побудови трикутної системи координат для поршньового повітряного компресора, навантаження якого (відкладається по вісі  $p$ ) залежить прямо пропорційно від тиску (вісь  $m$ ) в системі і температури повітря в компресорі (вісь  $n$ ). В результаті перетину трьох довільних прямих побудований рівносторонній трикутник АВС. Він називається базисом трикутної системи координат. Осі координат, а отже і координати точок, позначаються буквами  $m$ ,  $n$  і  $p$ .

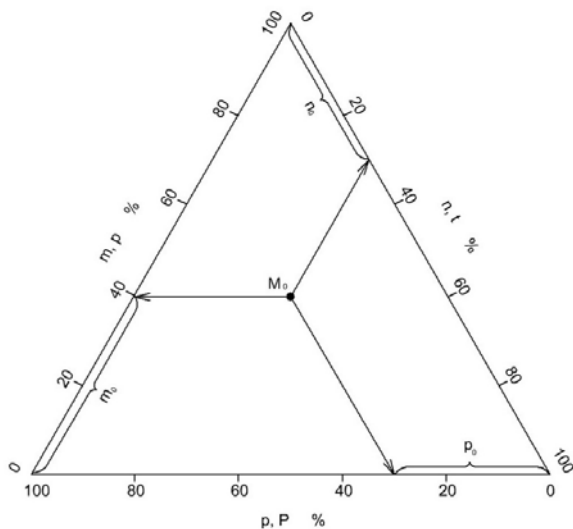


Рис. 1. Приклад побудови трикутних систем координат для поршневого повітряного компресора, навантаження якого залежить прямо пропорційно від тиску в системі і температури повітря в компресорі

Використовуючи трикутні координати, зручно здійснювати контроль за технологічним процесом, наприклад, за режимом роботи поршневого повітряного компресора (рис. 2). Електроспоживання його залежить від тиску в системі стислого повітря та температура стислого повітря в системі.

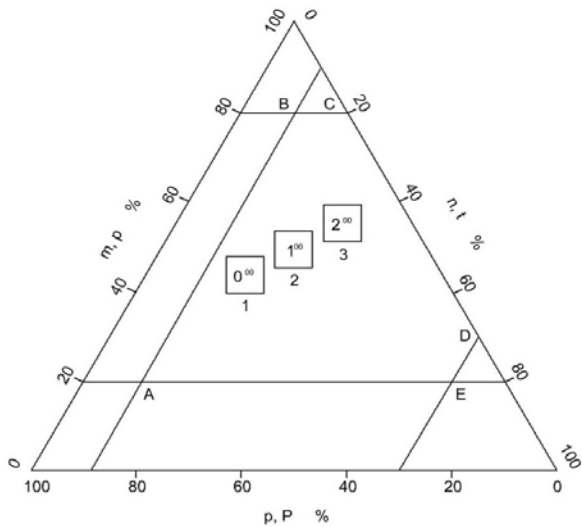


Рис. 2. Приклад ведення технологічного процесу за діаграмою в трикутних координатах

На вісі  $m$  відкладений тиск в системі стислого повітря у відсотках, по вісі  $n$  – температура стислого повітря в системі у відсотках, по вісі  $p$  – потужність компресора в різні моменти часу у відсотках. При роботі компресора існує ряд обмежень: граничний інтервал по тиску у відсотках 20-80 %, по температурі 0-70 %, по потужності 0-90 %. Діаграма технологічного процесу (рис. 2) показує, що процес повинен вестися в межах фігури ABCDEA. Чим ближче знаходиться до початку осі  $p$  (потужність у відсотках), тим ефективніше працює компресор [5].

2. Порівняння енергоефективності виробничих об'єктів, енергоспоживання яких залежить від великої кількості різних факторів рівної ваги.

Енергоспоживання виробничих об'єктів може залежати від великої кількості різних факторів рівної ваги. Для порівняння енергоефективності виробничих об'єктів за частковими (що характеризують тільки одну рису об'єкту) критеріями рівної ваги можливо застосовувати або адитивний, або мультиплікативний узагальнені критерії [3]. Під критерієм мають на увазі вихідний контрольований параметр, що характеризує ступінь досягнення поставленої мети. Часткові критерії  $F_i(X)$  тим або іншим способом повинні поєднуватися в узагальнений критерій  $f(X) = \Phi[F_1(X), F_2(X), \dots, F_m(X)]$ , який потім оптимізується.

Коли усі критерії мають рівне значення, то узагальнений адитивний критерій записується в виді суми часткових критеріїв у тому випадку, коли вони мають однакову вагу. Мультиплікативний критерій утворюється шляхом простого перемножування часткових критеріїв у тому випадку, коли вони мають однакову вагу. Для випадку, коли один об'єкт кращий за адитивним узагальненим критерієм, а інший – за мультиплікативним, необхідно застосувати для вибору оптимальної математичної моделі геометричний (морфологічний) підхід [6].

Морфологічний підхід може застосовуватися не тільки для порівняння роботи об'єкта за різні моменти часу, а й при роботі двох однакових агрегатів, технологічних ліній тощо. Для використання морфологічного підходу необхідна побудова радіаційної діаграми. Така діаграма будується в такий спосіб: із центру кола проводяться по числу факторів прямі лінії (радіуси), які нагадують промені, що розходяться при радіоактивному розпаді. На ці радіуси наносяться мітки градуїрування в долях від 100 % та відкладаються на них значення даних в відсотках. Точки, якими позначені відкладені значення, з'єднують відрізками прямої. Числові значення, що ставляться на променях, що відповідають кожному фактору, порівнюють із еталонним значенням (стандартом енергоспоживання) або з значеннями за минулий розрахунковий період. На кожному технологічному об'єкті необхідно визначити питому норму споживання електроенергії на одиницю продукції або розрахувати стандарт енергоспоживання за алгоритмом, вказаним в роботі [7].

На прикладі цеху аміаку побудована радіаційна діаграма, на якій порівнюється енергоефективність цеху за дві доби поспіль за рівноважними критеріями якості. Цими критеріями є споживання електроенергії, споживання теплової енергії, споживання оборотної води, витрати природного газу, споживання знесоленої води, виробіток аміаку. В табл. 1 наведені відношення споживання енергоресурсів на одиницю продукції до нормованого значення (стандарту енергоспоживання або питомої норми).

Приклад визначення найкраще працюючого об'єкта показаний на рис. 3.

Позначення на рис. 3: промінь 1 – відсоток від «стандарту енергоспоживання» по електроенергії (на ньому знаходяться точки  $A_1$  та  $A_2$ ), 2 – по тепловій енергії ( $B_1$  та  $B_2$ ), 3 – по оборотній воді ( $C_1$  та  $C_2$ ), 4 – по знесоленій воді ( $D_1$  та  $D_2$ ), 5 – по витраті природного газу ( $E_1$  та  $E_2$ ), 6 – відсоток від добової норми виробітку аміаку ( $F_1$  та  $F_2$ ).

Таблиця 1

Значення відношення споживання енергоресурсів на одиницю продукції до нормованого значення за дві доби поспіль

Параметр	Значення за першу добу та позначення точки на радіаційній діаграмі, %	Значення за другу добу та позначення точки на радіаційній діаграмі, %
Споживання електроенергії	100 (A <sub>1</sub> )	87 (A <sub>2</sub> )
Споживання теплової енергії	110 (B <sub>1</sub> )	90 (B <sub>2</sub> )
Споживання оборотної води	105 (C <sub>1</sub> )	91 (C <sub>2</sub> )
Споживання знесоленої води	108 (D <sub>1</sub> )	94 (D <sub>2</sub> )
Витрати природного газу	115 (E <sub>1</sub> )	95 (E <sub>2</sub> )
Виробіток аміаку	103 (F <sub>1</sub> )	96 (F <sub>2</sub> )

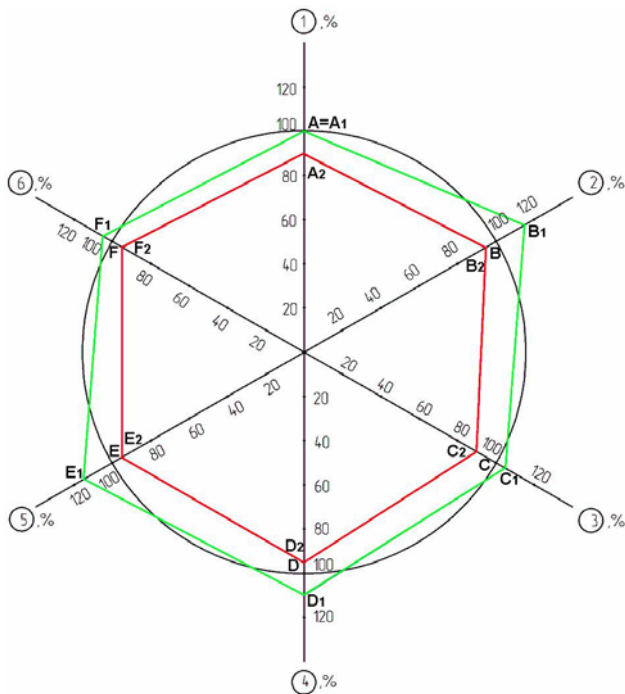


Рис. 3. Радіаційна діаграма порівняння енергоефективності роботи цеху з виробництва аміаку за дві доби поспіль за рівноважними критеріями якості

Багатокутник  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$  є оцінкою енергоефективності роботи цеху з виробництва аміаку за першу добу, а багатокутник  $A_2B_2C_2D_2E_2F_2$  – за другу добу. Окружність, що проходить через точки A, B, C, D, E, F є стандартом енергоспоживання, або відміткою, яка відповідає питомій нормі споживання певного енергоресурсу на одиницю випуску продукції. З рис. 3 можливо зробити висновок про те, що ефективніше персоналу цеху спрацював за другу добу, ніж за першу. Аналізуючи та контролюючи рівень енергоефективності за радіаційними діаграмами можливо оцінити стан енергоефективності на виробництві. Чим менше площа багатокутників (полігонів)  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$  та  $A_2B_2C_2D_2E_2F_2$ , тим краще працює виробничий об'єкт.

Аналогічним чином можливо оцінити енергоефективність технологічного агрегату, цеху, підприємства.

3. *Порівняння енергоефективності виробничих об'єктів, енергоспоживання яких залежить від великої кількості різних факторів нерівної ваги.*

В практичній діяльності необхідно виконувати порівняння ефективності декількох технологічних або енергетичних об'єктів за критеріями нерівної ваги. Проводити це порівняння шляхом побудови функції корисності не завжди доцільно. Метод потребує знань у особи, що приймає рішення, математичної статистики та методів прийняття рішень. Тому необхідно розробити або використовувати інші методи знаходження оптимально працюючих виробничих об'єктів з декількох подібних за декількома критеріями. Найбільш простим є метод апріорного ранжування [3].

На початковій стадії планування експерименту з урахуванням поставлених цілей експериментатор повинен відібрати незалежні змінні (фактори), які в подальшому будуть використовувати в експерименті. Як правило, фактори вибираються на основі аналізу апріорної інформації, що вимагає використання різних методів систематизації отриманих знань. Для вирішення завдань такого роду широко використовуються методи експертної оцінки. Ці методи засновані на отриманні та обробці даних, отриманих в результаті опитування фахівців. Стосовно оцінки та вибору найбільш значущих чинників широке поширення отримав метод апріорного ранжування, який може бути застосований для оцінювання енергоефективності виробничих об'єктів.

Так, в цеху аміаку методом апріорного ранжування розраховані коефіцієнти вагомості. Енергоспоживання цеху залежить від таких факторів: споживання теплової енергії, оборотної води, знесоленої води, витрат природного газу, виробітку аміаку. Коефіцієнти вагомості  $K_w$  за вимірюваними факторами, наявними в цеху аміаку наступні: для електроспоживання  $K_w = 0,24$ ; для споживання теплової енергії  $K_w = 0,21$ ; для споживання оборотної води  $K_w = 0,16$ ; для споживання знесоленої води  $K_w = 0,13$ ; для витрат природного газу споживання оборотної води  $K_w = 0,26$ . Необхідно перемножувати кожне значення розрахованого коефіцієнту вагомості на відсоткову (нормовану) величину критерію, вказану в табл. 1.

В табл. 2 наведені відношення споживання енергоресурсів на одиницю продукції до нормованого значення (стандарту енергоспоживання або питомої норми) з урахуванням коефіцієнтів вагомості.

На рис. 4 наведена радіаційна діаграма порівняння енергоефективності виробництва аміаку за критеріями нерівної ваги.

Розраховуються площі багатокутників  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$  та  $A_2B_2C_2D_2E_2F_2$ . З рис. 4 можливо зробити висновок, що за перший день цех аміаку спрацював гірше, ніж за другий.

4. *Перевірка технологічного процесу на стабільність.*

Стан технологічного процесу характеризується сумарною похибкою, що виникає внаслідок дії причин випадкового і систематичного характеру.

Таблиця 2

Значення відношення споживання енергоресурсів на одиницю продукції до нормованого значення з урахуванням коефіцієнту вагомості за дві доби поспіль

Параметр	Значення за першу добу та позначення точки на радіаційній діаграмі, %	Значення за другу добу та позначення точки на радіаційній діаграмі, %
Споживання електроенергії	100·0,24 = 24 (A <sub>1</sub> )	87·0,24 = 21 (A <sub>2</sub> )
Споживання теплової енергії	110·0,21 = 23 (B <sub>1</sub> )	90·0,21 = 19 (B <sub>2</sub> )
Споживання оборотної води	105·0,16 = 17 (C <sub>1</sub> )	91·0,16 = 15 (C <sub>2</sub> )
Споживання знесолоної води	108·0,13 = 14 (D <sub>1</sub> )	94·0,13 = 12 (D <sub>2</sub> )
Витрати природного газу	115·0,26 = 30 (E <sub>1</sub> )	95·0,26 = 25 (E <sub>2</sub> )
Виробіток аміаку	103·1,0 = 103 (F <sub>1</sub> )	96·1,0 = 96 (F <sub>2</sub> )

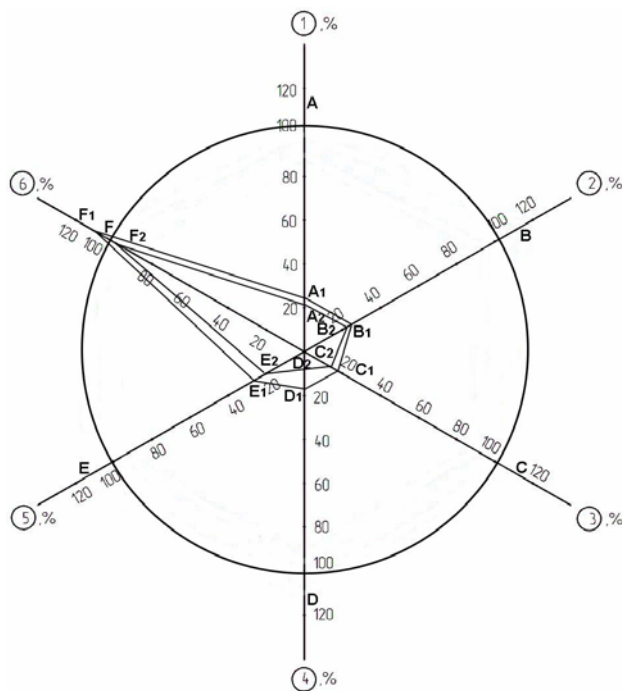


Рис. 4. Радіаційна діаграма порівняння енергоефективності виробництва аміаку за дві доби поспіль за нерівноважними критеріями якості

Оцінка стабільності технологічного процесу в загальному випадку відбувається таким чином. Спочатку здійснюється набір експериментальних даних шляхом вимірювання контрольованих параметрів вибірки одиниць продукції з одночасною реєстрацією результатів вимірювань. Далі складається таблиця частот; обчислюються статистичні характеристики; визначаються показники стану технологічного процесу; визначається стан процесу за рівнем дефектності; встановлюється закон розподілу і здійснюється статистична перевірка узгодження цього закону з нормальним законом. Але така процедура займає чимало часу, вона потребує знань математичної статистики у експлуатаційного персоналу. Тому пропонується використати

для перевірки технологічного процесу на стабільність більш прості методи.

У 1957 р Чарльз Хольт розробив метод експоненціального згладжування, що отримав назву двопараметричного методу Хольта [8]. У цьому методі враховується локальний лінійний тренд, присутній у часових рядах. Якщо у часових рядах є тенденція до зростання, то крім оцінки поточного рівня необхідна і оцінка нахилу. У методі Хольта значення рівня і нахилу згладжуються безпосередньо, при цьому для них використовуються різні сталі згладжування, які дозволяють оцінити поточний рівень і нахил, уточнюючи їх щоразу, коли з'являються нові спостереження. Одна з переваг методики Хольта – її гнучкість, що дозволяє вибирати співвідношення, в якому відстежується рівень і нахил.

Основу метода Хольта складають три рівняння:

$$Y_t^{Pr} = \alpha \cdot (Y_{t-1}^{Pr} + T_{t-1}) + (1 - \alpha) \cdot Y_t, \quad (1)$$

$$T_t = (1 - \beta) \cdot (Y_t^{Pr} - Y_{t-1}^{Pr}) + \beta \cdot T_{t-1}, \quad (2)$$

$$Y_{t+p}^{Pr} = Y_{t+1}^{Pr} + p \cdot T_t, \quad (3)$$

де  $Y_t^{Pr}$  і  $Y_{t-1}^{Pr}$  – прогнозовані (згладжені) значення показника в наступний і попередній моменти часу;  $Y_t$  – табличне значення показника в момент часу  $t$ ;  $T_{t-1}$  – значення тренда на момент часу  $t-1$ , що визначається з рівняння (2); де  $\alpha$  і  $\beta$  – сталі згладжування, необхідні для згладжування оцінки тренда.

Дослідження, проведені в роботі [8] довели, що значення сталих  $\alpha$  і  $\beta$  визначають стабільність технологічного процесу – властивість, що обумовлює сталість розподілів ймовірності його параметрів протягом деякого інтервалу часу без втручання ззовні. Процес вважається стабільним, якщо контрольовані параметри не перевищують контрольних меж і не спостерігається тренд до їх виходу за ці межі. Коефіцієнт варіації даних електроспоживання за розрахунковий період повинен бути мінімальним. Для великотоннажних хімічних виробництв з випуску аміаку, слабоазотної кислоти, потужної насосної станції подачі води першого підйому встановлено, що для різних процесів оптимальне значення сталої згладжування  $\alpha$  дорівнює 0,1, а сталої згладжування  $\beta$  має дорівнювати 0,9 (для стабільного технологічного процесу).

Знання значень сталих згладжування дозволяє в режимі реального часу порівнювати поточне значення енергоспоживання з розрахованим методом Хольта прогнозованим значенням. Якщо при значеннях сталих згладжування  $\alpha = 0,1$  і  $\beta = 0,9$  [8] дійсне значення електроспоживання співпадає з прогнозованим, то технологічний процес при цьому стабільний.

Зменшення або збільшення останнього значення вибірки часових значень електроспоживання не дає можливості зробити належний висновок про правильне ведення технологічного процесу. Для перевірки технологічного процесу на стабільність пропонується використовувати коефіцієнт автокореляції (КА) [9] першого, другого і далі порядків для перевірки стабільності та ефективності ведення процесу енергоспоживання.



Проведено ряд досліджень з ефективності використання КА для оцінювання технологічного процесу на декількох об'єктах хімічної промисловості. Зібрано дані про середньогодинне споживання електроенергії  $P$  крупнотонажного цеху аміаку хімічного підприємства за декілька діб 201.. року. Вибірка даних енергоспоживання наведена в табл. 3.

Таблиця 3  
Значення щогодинного електроспоживання крупнотонажного цеху аміаку за одну з діб 2016 року

№ інтервалу	1	2	3	4	5	6	7	8
$P$ , МВт·год	37,264	37,275	37,290	37,189	37,058	37,088	37,131	37,124
№ інтервалу	9	10	11	12	13	14	15	16
$P$ , МВт·год	37,112	37,074	37,171	37,201	37,239	37,259	37,189	37,162
№ інтервалу	17	18	19	20	21	22	23	24
$P$ , МВт·год	37,450	37,465	37,527	37,510	37,472	37,267	37,074	37,133

\*Коефіцієнт варіації даної вибірки 0,24 %.

Останнє (24-те) значення вибірки змінюється в діапазоні від 0 до 100 % з дискретністю 25 % в інтервалі від 0 до 75 % та 5 % в інтервалі від 75 % до 100 % ( $P'_{24} = K \cdot P_{24}$ ), де  $K$  – відношення зміненого останнього значення вибірки до його повного значення. Коефіцієнт  $K = 0-1,0$ ; він приймає значення 0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0. Розраховані КА першого, другого, третього порядку для кожної з вибірок при змінюванні останнього значення вибірки.

Дослідження довели, що існують три типи залежності КА від величини зміненого останнього значення вибірки (рис. 5).

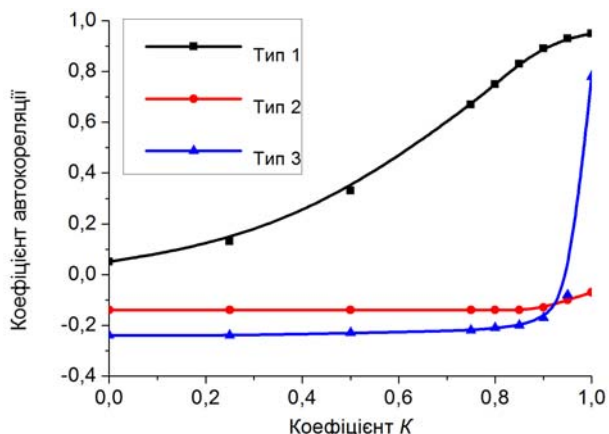


Рис. 5. Залежність КА першого порядку від змінювання останнього значення вибірки

Для першого та третього типу залежності КА першого порядку пропорційно залежить від змінювання величини останнього значення вибірки. Тому коли спостерігається така залежність, то КА доцільно використовувати для контролю над режимом електроспоживання. Результати розрахунків довели, що розмах КА першого порядку для першого та третього типу залежності на 30-40 % більше, ніж другого або третього порядку. Тому саме його краще використовувати для контролю режиму електроспоживання.

Для першого типу характерна сильна чутливість на різку зміну величини останнього значення вибірки та на нульове значення електроспоживання. Так, при зміні останнього значення вибірки на 25 % КА першого порядку зменшується в 2,5 рази. КА характеризує тісноту тільки лінійного зв'язку поточного і попереднього рівнів ряду. Тому за коефіцієнтом автокореляції можна судити про наявність лінійної (або близькою до лінійної) тенденції [9].

Для третього типу спостерігається сильна залежність КА першого порядку від зміни величини останнього значення вибірки. КА другого та третього порядку для третього типу нагадують за формою КА першого порядку для цього типу.

Для деяких часових рядів, що мають сильну нелінійну тенденцію (наприклад, мають форми парабол другого порядку або експоненти), коефіцієнт автокореляції рівнів вихідного ряду може наближатися до нуля. Коли для вибірки залежність КА від зміни величини останнього значення вибірки нагадує другий тип (рис. 5), то тоді КА не придатний для контролю енергоспоживання.

Розраховувати КА другого та третього порядків для усіх типів залежності його від величини зміненого останнього значення вибірки необхідно також для того, щоби користуватися тестом Льюїнга-Бокса на наявність автокореляції [9].

Усі вищевказані економіко-математичні методи можуть допомогти експлуатаційному персоналу швидко оцінювати ситуацію на виробництві, краще проводити моніторинг енергоефективності виробничих об'єктів та в стислий термін приймати заходи з забезпечення стабільності технологічного процесу, що відповідає концепції Smart Grid [10].

#### Висновки.

1. Доведена доцільність застосування ряду економіко-математичних методів для моніторингу енергоефективності виробничих об'єктів та перевірки технологічного процесу на стабільність.
2. Найпростішим способом контролю за енергоефективністю технологічних процесів у випадку, коли електричне навантаження залежить тільки від двох параметрів, є спосіб використання трикутних координат, які доцільно застосовувати для візуалізації та контролю за технологічним процесом.
3. Використані метод апріорного ранжування та морфологічний для порівняння енергоефективності роботи декількох подібних виробничих об'єктів хімічної промисловості, у яких енергоспоживання залежить від багатьох факторів. Ці методи рекомендовано для використання для оцінювання енергоефективності на інших виробничих об'єктах.
4. Ознакою стабільності технологічного процесу є тотожність поточного значення енергоспоживання з розрахованим методом Хольта прогнозованим значенням при визначених заздалегідь оптимальних сталих згладжування.
5. Вперше застосовано коефіцієнт автокореляції для оцінювання стабільності технологічних процесів. Доведено, що при змінюванні в невеликому діапазоні одного значення вибірки електроспоживання з ймовірністю 66 % відбувається значна зміна коефіцієнту автокореляції першого або другого порядку.

6. Розглянуті в публікації економіко-математичні методи можуть бути використані для підтримки дій та рішень експлуатаційного персоналу з проведення контролю за енергоефективністю та стабільністю виробничих об'єктів, для візуалізації поточної інформації, для підтримки дій та обґрунтованості рішень людини-оператора, що буде сприяти впровадженню концепції Smart Grid на промислових підприємствах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання: навч. посіб. Ч.1.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 288 с.
2. Замулко А.І., Бедерак Я.С. Комплексний статистичний аналіз даних споживання активної електроенергії, витрат енергоресурсів та обсягів виробництва продукції // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2014. – №2. – С. 79-83.
3. Горбунов В.М. Теория принятия решений: Учебное пособие ГОУВПО. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. – 67 с.
4. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 419 с.
5. Бедерак Я.С. Візуалізація звітів і шаблонів, що формуються в системах контролю електроспоживання та енергоменеджменту // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2012. – №130 – С. 3-5.
6. Волошко А.В., Бедерак Я.С., Лутчин Т.М. Проблеми вибору оптимальної математичної моделі енергоспоживання на промислових підприємствах // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2013. – №5/8(65). – С. 19-23. doi: 10.15587/1729-4061.2013.18122.
7. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Контроль та аналіз виконання встановлених «стандартів» в системах статистичного контролю ефективності використання електричної енергії // *Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро*. – 2011. – №2. – С. 16-23.
8. Стеценко І.В., Бедерак Я.С. Восстановление и оперативное прогнозирование методом Хольта электропотребления предприятий с непрерывным циклом работы // *Электронное моделирование*. – 2015. – №4. – С. 119-126.
9. Лук'яненко І.Г., Краснікова Л.І. Економетрика: Підручник. – К.: Товариство «Знання», 1998. – 494 с.
10. Кобець Б.Б., Волкова І.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
4. Uiler D., Chambers D. *Statisticheskoe upravlenie protsesami. Optimizatsiia biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta* [Statistical control of process. Optimization of business using Shewhart control charts]. Moscow, Alpina Business Books Publ., 2008. 419 p. (Rus).
5. Bederak Ya.S. Visualization of reports and templates, which are formed in the monitoring systems of power consumption and energy management. *Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2012, no.130, pp. 3-5. (Ukr).
6. Voloshko A.V., Bederak Ya.S., Lutchyn T.M. The problems of selection of optimal mathematical model of energy consumption at industrial enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, no.5/8(65), pp. 19-23. (Ukr). doi: 10.15587/1729-4061.2013.18122.
7. Nakhodov V.F., Borychenko O.V. Monitoring and analysis of implementation of established «standards» in the statistical control systems of effective use of electric energy. *Informational collected papers «Promyslova elektroenergetyka ta elektrotekhnika» Promelektro*, 2011, no.2, pp. 16-23. (Ukr).
8. Stetsenko Y.V., Bederak Ya.S. Recovery and operational forecasting by Holt's method of electricity consumption at enterprises with a continuous work cycle. *Electronic modeling*, 2015, no.4, pp. 119-126. (Rus).
9. Luk'yanenko I.G., Krasnikova L.I. *Ekonometryka* [Econometrics]. Kyiv, Tovarisstvo «Znannya» KOO Publ., 1998. 494 p. (Ukr).
10. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovative development of the electric power on the basis of Smart Grid concept]. Moscow, IAC Energiya Publ., 2010, 208 p. (Rus).

Надійшло (received) 11.10.2016

Бедерак Ярослав Семенович, інженер,  
Публічне акціонерне товариство «АЗОТ»,  
18014, Черкаси, вул. Першотравнева, 72,  
тел/phone +380 47 2392979, e-mail: ei@uch.net

Ya.S. Bederak  
PJSC «AZOT»,  
72, Pervomayskaya Str., Cherkassy, 18014, Ukraine.

#### On substantiation of selection of economic and mathematical methods for the assessment of energy efficiency of production facilities.

Research purpose is generalization and further development of economic- mathematical methods for ensuring energy-efficient operation mode of production facilities. The above methods can be used for selection of the most energy-efficient production lines, mechanisms; pumping, compression, ventilation installations or other electric receivers among several similar ones by using equal and unequal weight criteria. An example of comparing the efficiency of the production facilities of the chemical industry is showed by a priori ranking and morphological (geometric) methods. The method of control the correctness of the production facilities in the case when the electric load depends on two parameters in triangular coordinates in the presence of boundary restrictions is described. The identity of the current energy values calculated by Holt predicted value at a predetermined optimal smoothing constant determines the stability of the process. Expedience of application the autocorrelation coefficient for testing processes on the stability is proved. References 10, tables 3, figures 5.

Key words: power consumption, criteria of equal and unequal weights, the autocorrelation coefficient, energy efficiency.

## БРЖЕЗИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(до 75-річчя з дня народження)

16 лютого 2017 р. виповнилося 75 років з дня народження відомого вченого в галузі техніки і електрофізики високих напруг, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри техніки та електрофізики високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Володимира Олександровича Бржезицького.

Після закінчення середньої школи у 1958 р. Володимир Олександрович вступив до електротехнічного факультету Київського політехнічного інституту, який успішно закінчив у 1963 р., отримавши кваліфікацію інженера-електромеханіка за спеціальністю «Електричні машини і апарати».

Восени того ж року розпочав навчання в аспірантурі Інституту електродинаміки АН УРСР по спеціальності «Преобразование видов энергии». Перебуваючи в аспірантурі, пройшов стажування з фізики газового розряду в Інституті фізики при Ленінградському державному університеті. Після закінчення аспірантури та захисту кандидатської дисертації працював молодшим науковим співробітником відділу магнітної гідродинаміки та електромеханічних систем.

У 1973 р. зарахований на посаду старшого наукового співробітника Українського республіканського центру метрології і стандартизації Держстандарту СРСР, а вже у 1974 р. він був призначений начальником науково-дослідної лабораторії вимірювання високих напруг промислової частоти. З 1979 р. В. О. Бржезицький обіймає посаду начальника науково-дослідного сектора метрологічного забезпечення вимірювання високих напруг промислової частоти, а з 1980 року він виконує обов'язки начальника науково-дослідного відділу метрологічного забезпечення вимірів високих напруг.

З 1981 р. Бржезицький В. О. зарахований на посаду доцента кафедри ТВН КПІ (за конкурсом), де продовжує свою плідну працю.

У 1988 році кафедру техніки високих напруг перейменовано в кафедру техніки та електрофізики високих напруг, а В.О. Бржезицького призначено заступником завідувача кафедри ТЕВН.

У 1992 році він захистив докторську дисертацію, а з 1993 року обіймає посаду завідувача кафедри ТЕВН.

На кафедрі техніки та електрофізики високих напруг В. О. Бржезицьким виконувалась значна науково-організаційна робота, підготовлені та проведені всесоюзні семінари «Электромагнитное влияние грозовых разрядов на электрические цепи и устройства микроэлектроники» (Київ, 1985), «Электрофизические и прикладные вопросы высоковольтных измерений» (Запоріжжя, 1991).

В науковому доробку ювіляра понад 300 наукових доповідей та публікацій, 15 винаходів, відкриття ново-

го фізичного явища «Вогневий стример». Виданий спільно зі співробітниками НТУ «Харківський політехнічний інститут» навчальний посібник «Техніка і електрофізика високих напруг» (найбільшим за обсягом з даної тематики). Разом з колегами з Вінницького національного технічного університету виданий підручник «Електричні апарати». Ним підготовлено 7 кандидатів технічних наук.

Серед наукових напрацювань ювіляра слід відмітити такі:

- розроблений наближений метод кінетичного розрахунку електропровідності низькотемпературної плазми у магнітному полі та дослідження її загальних особливостей.

- розроблений комплекс методів

для експериментального визначення масштабних коефіцієнтів вимірювальних систем заземлених та незаземлених масштабних перетворювачів високих напруг різноманітних типів при їх робочих напругах, що характеризуються найбільш високою точністю.

- розкритий механізм впливу вищих гармонічних складових напруги на коефіцієнт трансформації високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги та розроблені заходи щодо мінімізації цього впливу.

- розроблений метод розрахунку та одержані аналітичні вирази індуктивності та взаємної індуктивності розсіювання для обмоток та шин, розташованих поблизу феромагнітної площини (з урахуванням її магнітної проникності), який є розвитком методу середніх геометричних відстаней.

- для проведення розрахунків потенціалів електричного поля запропонований наближений аналітичний вираз еліптичного інтегралу I-го роду з максимальною похибкою не більше  $\pm 0,1\%$ .

- розроблені нові аналітичні вирази для діагональних коефіцієнтів в інтегральних рівняннях I-го роду, що дозволяє значно підвищити точність їх рішень.

- для підвищення точності розв'язання інтегральних рівнянь II-го роду уведений в практику розрахунків високовольтної ізоляції безпосередній зв'язок «електричні заряди – складові напруженості електричного поля».

Наукова школа ювіляра приділяє значну увагу впровадженню наукових розробок в рамках діяльності Наукового парку «Київська політехніка». В. О. Бржезицький є членом спеціалізованих рад при НТУУ «Київський політехнічний інститут» та НТУ «Харківський політехнічний інститут».

Друзі, колеги, учні Володимира Олександровича щиро вітають його з ювілеєм, бажають йому доброго здоров'я та подальших успіхів у науковій та методичній роботі.

Редакційна колегія журналу «Електротехніка і Електромеханіка» приєднується до цих побажань, висловлюючи надію на подальшу довготривалу та плідну співпрацю з ювіляром.



**Матеріали приймаються за адресою:**

**Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПИ", вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна**

**Електронні варіанти матеріалів по e-mail: [a.m.grechko@gmail.com](mailto:a.m.grechko@gmail.com)**

**Довідки за телефонами: +38 050 653 49 82 Клименко Борис Володимирович**

**+38 067 359 46 96 Гречко Олександр Михайлович**

