

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») та Державною установою «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України» (ДУ «ІТПМ НАНУ»)

Журнал засновано у 2002 р.

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
Rožanov 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, 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

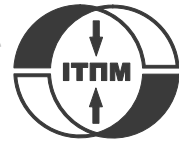
ISSN (online) 2309-3404

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

Підписано до друку 30.08.2017 р. Формат 60 x 90 ¼. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-04-2017. 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 39: Лауреаты Нобелевской премии по физике за 2011-2015 гг. 3
- Клепиков В.Б., Тверитникова О.Є.** Професор П.П. Копняев – вчений, громадський діяч, організатор вищої електротехнічної освіти (до 150-річчя зі дня народження)..... 10

Електричні машини та апарати

- Данько В.Г., Гончаров Є.В., Поляков І.В.** Аналіз особливостей роботи надпровідного індуктивного обмежувача струму з додатковим надпровідним екраном 16
- Маляр В.С., Мадай В.С., Кенс І.Р.** Резонансні процеси в пускових режимах синхронних двигунів з конденсаторами в колі обмотки збудження..... 21

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

- Volyanskaya Ya.B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A.** Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle..... 26
- Лобов В.И., Лобова К.В.** Влияние тиристорного перетворювача на пульсації електромагнітного моменту асинхронного двигуна при параметричному управлінні..... 34

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

- Баранов М.И., Рудаков С.В.** Приближенный расчет активного сопротивления и температуры канала импульсной электрической дуги в силовоточной разрядной цепи мощного высоковольтного емкостного накопителя энергии 42
- Бойко Н.И., Макогон А.В.** Генератор по схеме Аркадьева – Маркса с покаскадным обострением фронта импульсов для обеззараживающей обработки пищевых продуктов..... 49
- Золотарев В.М., Антоненц Ю.А., Антоненц С.Ю., Голик О.В., Щепенюк Л.А.** Он-лайн контроль дефектности изоляции в процессе изготовления эмальпроводов 55

Електричні станції, мережі і системи

- Сокол Е.И., Сиротин Ю.А., Иерусалимова Т.С., Гриб О.Г., Швец С.В., Гапон Д.А.** Развитие теории мгновенной мощности трехфазной сети в условиях сетецентризма 61
- Старков К.А., Федосенко Е.Н.** Совершенствование алгоритма расчета сложных неэквипотенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей 66

Інформація

- Міжнародний Симпозіум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA'2017)» 72

Ювілеї

- Пуйло Глеб Васильевич (к 85-летию со дня рождения)..... 73

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

- Baranov M.I.** An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 39: Nobel Prize Laureates in Physics for 2011-2015..... 3
- Klepikov V.B., Tverytnykova O.Ye.** Professor P.P. Kopniaiev – scientist, public person, establisher of higher electrical engineering education (to the 150th anniversary of his birth)..... 10

Electrical Machines and Apparatus

- Dan'ko V.G., Goncharov E.V., Poliakov I.V.** Analysis of the operation peculiarities of the superconducting inductive current limiter with additional superconducting screen..... 16
- Malyar V.S., Maday V.S., Kens I.R.** Resonant processes in starting modes of synchronous motors with capacitors in the excitation windings circuit..... 21

Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics

- Volyanskaya Ya.B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A.** Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle..... 26
- Lobov V.I., Lobova K.V.** The thyristor converter influence on the pulsations of the electromagnetic torque of the induction motor at parametrical control..... 34

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

- Baranov M.I., Rudakov S.V.** Approximate calculation of active resistance and temperature of the pulse electric arc channel in a high-current discharge circuit of a powerful high-voltage capacitor energy storage 42
- Boyko M.I., Makogon A.V.** Generator on Arcadyev-Marx scheme with peaking of the pulse front in its cascades for food disinfecting 49
- Zolotaryov V.M., Antonets Yu.P., Antonets S.Yu., Golik O.V., Shchebenjuk L.A.** Online technological monitoring of insulation defects in enameled wires 55

Power Stations, Grids and Systems

- Sokol Y.I., Sirotin Yu.A., Ierusalimova T.S., Gryb O.G., Shvets S.V., Gapon D.A.** The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism 61
- Starkov K.A., Fedoseenko E.N.** Improved algorithm for calculating complex non-equipotential grounding devices of electrical installations taking into account conductivity of natural groundings 66

Information

- International Symposium «Problems of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics (SIEMA'2017)» 72

Anniversaries

- Puilo G.V.** (on the 85th 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 Web of Science Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI), Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИНЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, GALE General Science Collection та Academic OneFile, DOAJ та ін.



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

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 39:
ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ ЗА 2011–2015 ГГ.**

Наведено короткий аналітичний огляд основних наукових досягнень вчених світу, які відмічені Нобелівською премією по фізиці за період 2011-2015 рр. До числа таких досягнень увійшли відкриття прискорення розширення Всесвіту, створення проривних технологій маніпулювання квантовими системами, теоретичне виявлення механізму походження маси субатомних частинок, винахід енергоефективних джерел світла – синіх світлодіодів і відкриття осциляцій нейтрино. Бібл. 17, рис. 14.

Ключові слова: сучасна фізика, досягнення, прискорене розширення Всесвіту, технології маніпулювання квантовими системами, механізм походження маси субатомних частинок, енергозберігаючі джерела світла, сині світлодіоди, осциляції нейтрино.

Приведен краткий аналитический обзор выдающихся научных достижений ученых мира, отмеченных Нобелевской премией по физике за период 2011-2015 гг. В число таких достижений вошли открытие ускорения расширения Вселенной, создание прорывных технологий манипулирования квантовыми системами, теоретическое обнаружение механизма происхождения массы субатомных частиц, изобретение энергоэффективных источников света – синих светодиодов и открытие нейтринных осцилляций. Библ. 17, рис. 14.

Ключевые слова: современная физика, достижения, ускоренное расширение Вселенной, технологии манипулирования квантовыми системами, механизм происхождения массы субатомных частиц, энергосберегающие источники света, синие светодиоды, нейтринные осцилляции.

Введение. Физика в завещании известного шведского инженера-изобретателя и бизнесмена Альфреда Нобеля (1833-1896 гг.) была упомянута первой из пяти областей научных знаний и общественных движений (физика, химия, медицина, литература и борьба за укрепление мира между народами), по которым следовало в ближайшем будущем учредить премии за выдающиеся научные исследования, революционные изобретения, крупный вклад в культуру и развитие человеческого общества [1]. Отметим, что первая Нобелевская премия по физике была присуждена немцу Вильгельму Рентгену (1845-1923 гг.) в 1901 г. «за открытие X-лучей (рентгеновских лучей)» [2]. С 1901 г. по 2011 г. Нобелевская премия по физике вручалась 190 ученым мира. При этом 58 раз премия присуждалась двум или трем исследователям одновременно (по существующему положению в авторском коллективе претендентов на нее должно находиться не более трех ученых) [1]. Американец Джон Бардин (1908-1991 гг.) пока оказался единственным ученым, удостоенным в составе подобной группы ученых Нобелевской премии по физике дважды – в 1956 г. («за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта») и в 1972 г. («за разработку теории сверхпроводимости») [2, 3]. Женщины-ученые становились лауреатами Нобелевской премии по физике всего лишь дважды – французенка польского происхождения Мария Склодовская-Кюри (1867-1934 гг.) в 1903 г. («за исследование явления радиоактивности») и американка Мария Гепперт-Майер (1906-1972 гг.) в 1963 г. («за создание оболочечной модели ядра») [2].

1. Открытие ускорения расширения Вселенной. Лауреатами Нобелевской премии по физике в 2011 г. стали американцы Сол Перлмуттер (рис. 1), Адам Рисс (рис. 2) и Брайан Шмидт (рис. 3) «за открытие ускорения расширения Вселенной путем наблюдения далеких сверхновых» [1]. Их фундаментальный вывод об ускоренном расширении Вселенной со временем был получен в ходе очень тонких и акку-

ратных наблюдений сверхновых звезд, проводимых С. Перлмуттером из Калифорнийского университета (г. Беркли, США), А. Риссом из Научного института космического телескопа (г. Балтимор, США) и Б. Шмидтом из известной обсерватории Маунт-Стролом при Австралийском национальном университете [1].



Рис. 1. Выдающийся американский физик-астроном Сол Перлмуттер (Saul Perlmutter, 1959 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2011 г.

Свои многолетние астрономические наблюдения С. Перлмуттер, А. Рисс и Б. Шмидт осуществляли с использованием исключительно сверхновых звезд типа Ia, расположенных в далеких галактиках нашей Вселенной. Для указанных наблюдений ими использовались несколько больших телескопов, в том числе 3,6-метровый телескоп типа NTT (New Technology Telescope) и 8,2-метровый телескоп типа VLT из всемирно известной южноамериканской обсерватории Ла Силья (ESO, Чили) [1]. На рис. 4 приведена серия фотографий сверхновой звезды 1995K, сделанных рассматриваемыми лауреатами 3 апреля 1995 г. при помощи 3,6-метрового телескопа NTT [1]. На основе анализа подобных снимков ими и было сделано научное открытие, удостоенное столь высокой наградой.

© М.И. Баранов



Рис. 2. Выдающийся американский физик-астроном Адам Г. Рисс (Adam G. Riess, 1969 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2011 г.



Рис. 3. Выдающийся австралийско-американский физик-астроном Брайан П. Шмидт (Brian P. Schmidt, 1967 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2011 г.

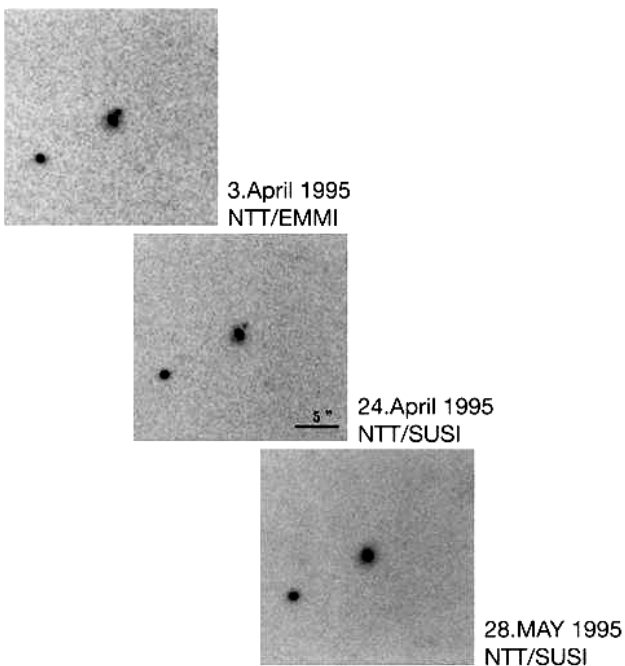


Рис. 4. Серия астрономических фотоизображений очень далекой сверхновой звезды в нашей Вселенной, имеющей международный регистрационный номер 1995K [1]

Считается, что ускоренное расширение Вселенной обусловлено наличием в ней «темной» энергии («черных дыр») [1, 4]. Происхождение этой энергии в космическом пространстве и ее природа для ученых остаются пока глубоко загадочными феноменами. В научном мире принято считать, что данное открытие, совершенное физиками-астрономами, одно из немногих в последнее время по-настоящему больших научных открытий в физике и астрономии [1]. Оно для человечества может иметь серьезное мировоззренческое значение. Здесь нам следует заметить, что ранее совершенное на основе астрономических наблюдений известным американским ученым-астрономом Эдвином Пауэллом Хабблом (1889-1953 гг.) фундаментальное открытие о расширении Вселенной осталось практически вне «поля зрения» Нобелевского комитета при Шведской Королевской академии наук [1]. Интересным фактом является то, Э.П. Хаббл в свое время возглавлял движение многочисленных ученых за установление Нобелевской премии по астрономии. Надо сказать, что особых успехов данное движение не имело, но оно, видимо, все-таки повлияло определенным образом на членов Нобелевского комитета, принявших все же решение о том, что астрономы мира могут получать Нобелевские премии по физике [1, 2].

Напомним, что за 111 лет вручения Нобелевских премий (за период 1901-2011 гг.) ученые-астрономы 11 раз были удостоены этой престижной награды [1].

2. Открытие способа измерения микрочастиц и квантовых систем без их разрушения. Лауреатами Нобелевской премии по физике за 2012 г. стали работающие в области квантовой физики француз Серж Арош (рис. 5) и американец Дэвид Вайнленд (рис. 6) «за передовые открытия экспериментальных методов, которые позволяют измерять индивидуальные квантовые системы» [5]. С. Арош и Д. Вайнленд заложили научную основу для нового поколения экспериментов в квантовой физике, которые позволяют «напрямую наблюдать индивидуальные квантовые частицы, не уничтожая их». С. Арош и Д. Вайнленд проводили свои квантовые эксперименты независимо друг от друга. Этим ученым удалось разработать оригинальные физико-технические решения для манипулирования отдельными квантовыми микрочастицами без разрушения их квантово-механической природы. Многие физики-экспериментаторы полагали, что подобные исследования просто невозможны. Американский физик использовал метод ионных «ловушек», манипулируя ионами с помощью квазичастиц-фотонов (квантов электромагнитного поля или света, не имеющих массу покоя [6]). Его французский коллега, напротив, измерял кванты света, направляя поток атомов вещества через фотонную «ловушку» [5].

Д. Вайнленд научил специалистов улавливать микрочастицы, которые несут электрический заряд (например, атомы и ионы), а также контролировать и измерять их состояние при помощи квантов света [5].



Рис. 5. Выдающийся французский физик-экспериментатор Серж Арош (Serge Haroche, 1944 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2012 г.

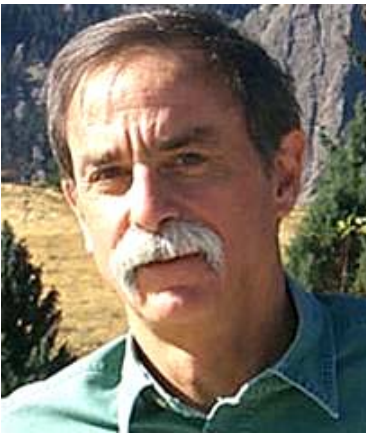


Рис. 6. Выдающийся американский физик-экспериментатор Дэвид Дж. Вайнлэнд (David J. Wineland, 1944 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2012 г.

С. Арош разработал противоположный научный подход, который позволяет разобраться в физических чудесах квантового мира. Он придумал способ контроля и измерения свойств «пойманных» фотонов при помощи засланных в «ловушку» атомов [5]. При этом С. Арош и его коллеги в своих опытах использовали «ридберговские» атомы, которые больше обычных атомов вещества примерно в тысячу раз [6]. Они отправляли их в фотонную «ловушку» со строго определенной скоростью, заставляя контактировать такие атомы с присутствующими там микроволновыми фотонами (квантами света). Из-за данного взаимодействия квантовое энергетическое состояние самих «ридберговских» атомов, названных в честь известного шведского физика Й.Р. Ридберга (1854-1919 гг.) [2, 7], при этом изменялось. Измерение состояния данных атомов происходило на выходе из указанной «ловушки». В итоге физики получали информацию о «пойманных» в «ловушку» фотонах, не разрушая их. Как все, на первый взгляд, просто! А за этой кажущейся простотой кроется многолетний кропотливый труд многих ученых-физиков, связанный с высокоточными измерениями на атомарном уровне. Описанный способ, как выяснилось, можно использовать и для подсчета количества фотонов, оказавшихся в «ловушке». Впоследствии физики-лауреаты, основываясь на этих

достижениях, научились отслеживать изменения квантового состояния отдельного фотона в реальном времени [5, 8]. Благодаря их исследованиям появилась возможность создания в будущем сверхвысокоточных часов и супербыстродействующих квантовых компьютеров. В случае создания в обозримом будущем квантового компьютера с большим объемом кубитов информации его вычислительная мощность ожидается поистине громадной, что приведет к настоящему информационно-технологическому прорыву в мире.

3. Теоретическое обнаружение механизма происхождения массы субатомных частиц. Нобелевская премия по физике за 2013 г. была присуждена двум физикам-теоретикам – бельгийцу Франсуа Энглеру (рис. 7) и британцу Питеру Хиггсу (рис. 8) [9].

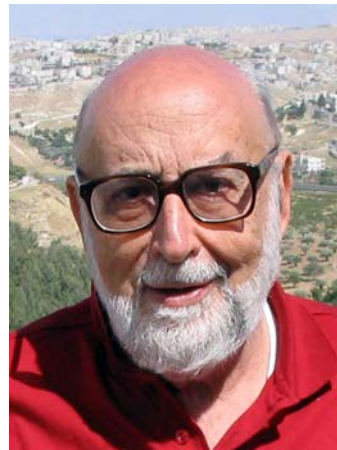


Рис. 7. Выдающийся бельгийский физик-теоретик Франсуа Энглер (Francois Englert, 1932 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2013 г.

Этой премии Ф. Энглер и П. Хиггс были удостоены «за теоретическое обнаружение механизма, который помогает понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах на детекторах ATLAS и CMS Большого адронного коллайдера в CERN» [9]. Важно подчеркнуть то, что указанные физики эту престижную и высокооплачиваемую (1,2 млн. долларов США на двоих [5]) премию получили не за предсказание «хиггсовского» бозона, экспериментально открытого в 2012 г. на самой крупной ускорительной электрофизической установке мира – Large Hadron Collider (LHC) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), расположенном под г. Женева (Швейцария) [3], а за сам «хиггсовский» механизм, «отголоском» которого «хиггсовский» бозон и является. История построения теорий слабых и сильных взаимодействий микрочастиц в области физики элементарных частиц и физики высоких энергий достаточно сложна, требует специального рассмотрения и для нас сейчас особо не интересна. Безусловно, она интересна в части научного приоритета для не одного десятка физиков-теоретиков, приложивших свою голову и руки к созданию подобных теорий и разработке «хиггсовского» механизма (например, для Р. Браута, Чж. Янга, Р. Миллса, Г. Гуральника, К. Хагена Т. Киббла и др.) [9].

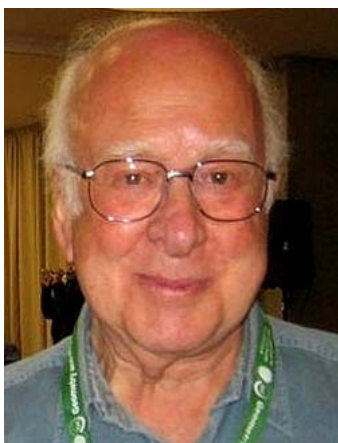


Рис. 8. Выдающийся английский физик-теоретик Питер Хиггс (Peter Higgs, 1929 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2013 г.

Роль бозона, впервые упомянутого в явном виде (в виде новой массивной бесспиновой частицы) в теоретической работе П. Хиггса (1964 г.), как удобного для экспериментального наблюдения «отголоска» рассматриваемого механизма взаимодействия в микромире была по-настоящему осознана физиками только в 1970-е годы [9]. Вот к нему (этому бозону), а также к самому механизму взаимодействия элементарных частиц навсегда и пристал удобный и краткий, но не вполне справедливый эпитет «хиггсовский». Именно после того, как была построена теория электрослабых взаимодействий, которая опиралась, среди прочего, на этот механизм, а также после того как было показано, что эта теория перенормируема (самоогласованна и годится для расчетов) и возник массовый интерес среди физиков к свойствам и к поиску бозона Хиггса [9].

Физики-теоретики принялись рассчитывать процессы рождения и распада этого бозона, а физики-экспериментаторы стали искать его в продуктах ядерных реакций на всех крупнейших коллайдерах мира (например, в Европе на электронно-позитронном ускорителе LEP с энергией до 104 ГэВ в ЦЕРН и в США на гигантском протонно-антипротонном ускорителе «Тэватрон» с энергией до 1 ТэВ в Национальной лаборатории ядерных исследований им. Э. Ферми [3]). Шли годы наблюдений, а требуемого бозона никто не находил. Подавляющее большинство ведущих физиков мира на основе накопленных научных данных к началу 21-го столетия убедили себя в том, что бозон Хиггса должен существовать. Им не хватало последнего штриха – прямого открытия «хиггсовского» бозона в эксперименте. И вот на сверхмощном протонном коллайдере LHC в ЦЕРН, реально запущенном в работу в 2009 г., бозон Хиггса в 2012 г. был экспериментально обнаружен. Произошло это важное научное событие практически спустя 50 лет после теоретического открытия этой элементарной частицы [9].

В чем же суть «хиггсовского» механизма и за что в микромире отвечает «хиггсовский» бозон? Согласно [9] в основе «хиггсовского» механизма для релятивистских теорий взаимодействия элементарных частиц лежит идея о том, что при «контакте» безмассовой скалярной частицы с безмассовым переносчиком взаимо-

действия рождается частица-переносчик с массой (некий неизвестный массивный бозон). Для приближения к исторической правде в вопросе рождения в физике элементарных частиц этой идеи, сформулированной П. Хиггсом лишь в 1964 г., заметим, что в 1963 г. известный американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1936 г. («за открытие в космических лучах позитрона» [2]) Карл Андерсон (1905-1991 г.), опубликовал подобную идею применительно к нерелятивистской теории взаимодействия микрочастиц [9]. Поэтому автором указанной выше научной идеи, которая легла в дальнейшем в базис «хиггсовского» механизма взаимодействия частиц, наверное, следовало бы считать физика из США К. Андерсона.

Что касается возможной ответственности для неискушенного читателя «хиггсовского» бозона за массу всех частиц нашей Вселенной, то здесь сразу следует однозначно сказать то, что никому и ничему в природе массу этот бозон не дает [9]. Оказывается, что массу частицам дает «хиггсовское» поле. «Хиггсовский» бозон является лишь микроскопической «рябью» и своеобразным энергетическим возмущением этого «хиггсовского» поля [9]. Кроме того, «хиггсовское» поле дает массу только электронам, мюонам и некоторым другим тяжелым частицам [6, 9]. Массу протонов и нейтронов, входящих в состав ядер всех химических элементов из периодической системы элементов Д.И. Менделеева [3, 6] и определяющих их массовые числа A и соответственно до 99 % массу любого вещества, определяют совершенно иные физические механизмы [9]. В этой связи «хиггсовское» поле отвечает примерно за 1 % массы окружающего нас вещества [9]. «Черные дыры», присутствующие в космосе, а также неоткрытые пока людьми частицы «темной» материи [4] и, возможно, нейтрино получают свою массу тоже за счет иных физических источников [9]. На сегодня в физике элементарных частиц на общечеловеческом уровне общения между учеными принято считать, что «хиггсовский» бозон – ничто, а «хиггсовское» поле – все [9]. Получить и исследовать это поле без рассматриваемого нами бозона пока невозможно. Поэтому «хиггсовский» бозон должен помочь человечеству узнать свойства и происхождение «хиггсовского» поля. А для этого необходимы многочисленные эксперименты на Большом адронном коллайдере LHC, сопровождающиеся рождением и распадом бозона Хиггса. Статистическая обработка полученных при этих процессах результатов должна «пролить» свет на его природу и природу «хиггсовского» поля. В настоящее время физики считают, что «хиггсовское» поле не порождает гравитацию, связанную с полной энергией физического тела. «Хиггсовское» поле может переводить часть энергии физического тела в энергию покоя (в его массу). Однако, на гравитационное взаимодействие тел оно влияния не оказывает [9].

4. Изобретение синих светодиодов – энерго-сберегающих источников света. В 2014 г. Нобелевскую премию по физике «за создание нового энерго-эффективного и экологически чистого источника света – синих светодиодов» получили три японских физика-экспериментатора: Исаму Акасаки (рис. 9),

Хироси Аmano (рис. 10) и Сюджи Накамура (рис. 11) [10-13]. Заметим, что до 1990 г. мировые производители светодиодов могли выпускать лишь красные, желтые и зеленые диоды. Известно, что только комбинация синего, зеленого и красного цветов способна давать чистый белый цвет. Поэтому актуальной проблемой в физике и технике полупроводников для ведущих мировых производителей светодиодных изделий оставалась та, которая была связана с изобретением светодиодов, дающих яркий синий цвет [10].



Рис. 9. Выдающийся японский физик-экспериментатор Исаму Акасаки (Isamu Akasaki, 1929 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2014 г.



Рис. 10. Выдающийся японский физик-экспериментатор Хироси Аmano (Hiroshi Amano, 1960 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2014 г.



Рис. 11. Выдающийся японский физик-экспериментатор Сюджи Накамура (Shuji Nakamura, 1954 г. рождения), лауреат Нобелевской премии по физике за 2014 г.

Фундаментальные и прикладные физико-технические исследования И. Акасаки, Х. Аmano и С. Накамура показали, что одним из перспективных полупроводниковых соединений, на основе которого

возможно создание таких излучателей света, может быть нитрид галлия GaN [10-13]. Вначале 1990-х годов указанными японскими физиками на основе нитрида галлия GaN были созданы как двухслойные, так и многослойные гетероструктуры с *p-n*-переходами проводимости, обеспечивающие создание и промышленный выпуск светодиодов синего свечения [10-13]. Это научно-техническое событие явилось большим прорывом в области мировых световых технологий.

В 1993 г. корпорации Nichia Chemical Industries (NCI) (г. Токусима, Япония) первой в мире удалось начать индустриальный выпуск синих светодиодов [10]. Эти светодиоды сделали возможным изготовление новых энергосберегающих источников белого цвета. Изобретение И. Акасаки, Х. Аmano и С. Накамурой синих светодиодов, необходимых для получения в светодиодных устройствах всех оттенков световой гаммы, явилось настоящей технической революцией для наружных светодиодных видеоэкранов [10].

С. Накамура прославился не только изобретением синих светодиодов повышенной яркости, но и выиграл в 2005 г. у корпорации NCI судебный иск на выплату ему вознаграждения по результатам внедрения его патентов на сумму около 9 млн. долларов США (крупнейший для ученых японский бонус!) [13].

5. Открытие нейтринных осцилляций. Нобелевская премия по физике за 2015 г. была присуждена двум физикам-экспериментаторам: канадцу Артуру Брюсу Макдональду (рис. 12) и японцу Такааки Кадзита (рис. 13) «за открытие нейтринных осцилляций, показывающее, что нейтрино имеют массу» [14]. Данные ученые возглавляли две ведущие научные группы SNO (Sudbury Neutrino Observatory, Канада) и Super-Kamiokande (Япония), занимающиеся изучением самых легчайших, загадочных и трудноуловимых измерительными приборами-детекторами элементарных частиц – нейтрино [6, 7]. Эти частицы, чрезвычайно слабо взаимодействующие с веществом, относятся к лептонам [6]. Они возникают при бета-распадах атомных ядер и распадах элементарных частиц и характеризуются спином $S_v = \pm 1/2$ [6, 7]. Их измерения показали, что нейтрино бывают трех сортов: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ [6, 14].

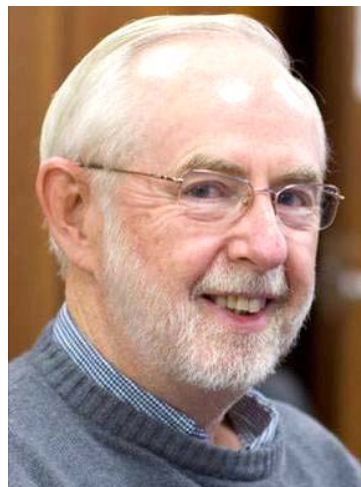


Рис. 12. Выдающийся канадский физик-экспериментатор Артур Брюс Макдональд (Arthur Bruce McDonald, 1943 г. рождения), лауреат Нобелевской премии за 2015 г.



Рис. 13. Выдающийся японский физик-экспериментатор Такааки Кадзита (Takaaki Kajita, 1959 г. рождения), лауреат Нобелевской премии за 2015 г.

Причем, эти три сорта нейтрино не обособлены друг от друга в микромире и соответственно в макромире. Они способны взаимно осциллировать – самопроизвольно превращаться «на лету» друг в друга. Именно за доказательство реальности этого физического эффекта (нейтринных осцилляций) и была вручена указанным ученым-физикам Нобелевская премия за минувший год. Экспериментальная демонстрация подобного факта в области физики элементарных частиц и измерение параметров нейтринных осцилляций с использованием космических лучей способствовали активному развитию нейтринной физики и прогрессу в этой научной области наших знаний. Взаимные превращения нейтрино в атмосфере Земли (рис. 14) из-за их очень маленьких масс на расстояниях в единицы (десятки) километров – чисто квантовый эффект [14, 15]. Заметим, что основными вехами в области нейтринной физики до рассматриваемых нами работ А.Б. Макдональда и Т. Кадзиты стали [2, 14]: достижения, удостоенные Нобелевских премий по физике за 1988 г. («за открытие мюонных нейтрино»), за 1995 г. («за открытие электронных нейтрино») и за 2002 г. («за открытие солнечных нейтрино»). Несмотря на это, до открытия А.Б. Макдональда и Т. Кадзиты ученым-физикам ни массы нейтрино, ни их осцилляционные параметры известны не были [2].

На рис. 14 в схематическом виде показаны процессы «рождения» при прохождении высокоэнергетических космических лучей (в основном, потока протонов p) сквозь земную атмосферу пи-мезонов (π), мюонов (μ), электронов (e), мюонных ν_μ и электронных ν_e нейтрино, измеряемых глубоко расположенными под землей в шахтах детекторами (detector) [14]. В ходе измерений было установлено, что после протекания ряда приведенных на рис. 14 распадов до Земли долетают нейтрино в соотношении $\nu_\mu/\nu_e \approx 1,2/1$.

Оценочные расчетные данные, выполненные физиками-теоретиками в 1991 г., говорили о том, что для приведенного соотношения мюонных ν_μ и электронных ν_e нейтрино должно численно выполняться равенство вида $\nu_\mu/\nu_e \approx 2/1$ [14-16].

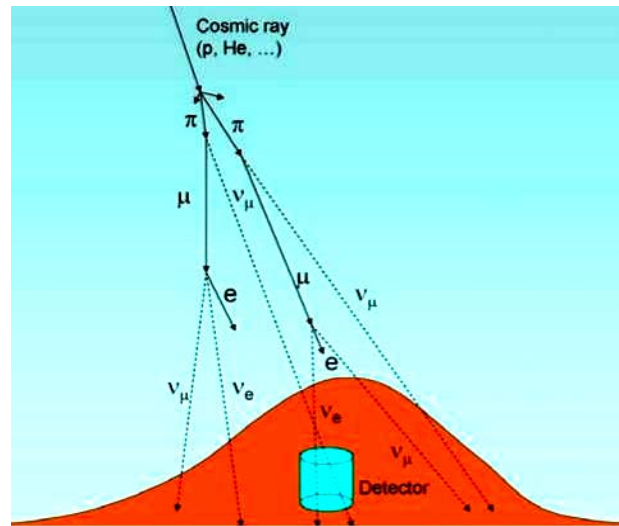


Рис. 14. Схематическое изображение процессов «рождения» мюонных и электронных нейтрино в атмосфере Земли [12]

Причина выявленных расхождений в соотношении ν_μ/ν_e для физиков была на тот момент неизвестной и непонятной. В 1998 г. на международной конференции по астрофизике Т. Кадзитой от имени коллаборации японских ученых Super-Kamiokande был сделан доклад, из результатов которого вытекало, что в подземные нейтринные детекторы сверху (от ближайшей земной поверхности) и снизу (от удаленной противоположной земной поверхности) Земли прилетают существенно различные количества мюонных нейтрино ν_μ . Нейтринный детектор Super-Kamiokande представлял собой большую подземную цистерну, расположенную в старой шахте внутри горы и заполненную сверхчистой обычной водой [16]. Внутренние стенки детектора сплошь были покрыты чувствительными фотоумножителями, которые регистрировали световые вспышки от ядерных событий, протекающих внутри его рабочего вещества-воды. Энергетическое космическое нейтрино (с энергией порядка 100 МэВ) электронного или мюонного сорта, сталкиваясь с атомным ядром воды, превращается в электрон e или мюон μ , который летит вперед с большой скоростью и излучает свет за счет эффекта Вавилова-Черенкова [6, 14-16]. Благодаря этому, нейтринный детектор Super-Kamiokande не только обнаруживал бомбардирующее его нейтрино, но и определял их сорт, энергию и направление прилета к Земле. Напомним, что вещество нашей планеты для нейтрино является практически полностью «прозрачным» [14]. Поэтому на основании полученных опытных данных японскими физиками был сделан важный вывод о том, что на своем тысячекилометровом пути сквозь твердую кору, полужидкую мантию и жидкое ядро Земли [17] существенная часть мюонных нейтрино ν_μ , пронизывающих нашу планету с противоположной месту размещения детекторов стороны, смогли превратиться в другие сорта нейтрино [14]. Причем, не в измеряемые детекторами электронные нейтрино ν_e , а в неизмеряемые ими – тау-нейтрино ν_τ . Аналогичные результаты в части нейтринных осцилляций (применительно к электронным ν_e , мюонным ν_μ и тау-нейтрино ν_τ , идущим от Солнца) в период 2001-2002 гг. были получены коллаборацией канадских ученых SNO с помощью подземных нейтринных детекторов элементарных частиц, емкости которых были

заполнены тяжелой водой, ядра которой (дейтроны) содержали слабо связанную систему из протона и нейтрона [14, 15]. При энергии воздействующих на детекторы нейтрино SNO в несколько МэВ дейтроны их тяжелой воды распались на протоны и нейтроны. По высвечиванию в нейтринных детекторах гамма-квантов, сопровождающих захват ядрами дейтерия образовавшихся нейтронов, физики судили о протекающих в них ядерных превращениях. Так физики из коллабораций Super-Kamiokande и SNO получили неопровержимые экспериментальные доказательства в пользу существования нейтринных осцилляций [14]. Эти опытные результаты подтверждали и справедливость разработанной физиками-теоретиками «солнечной модели», описывающей протекающие внутри нашего светила термоядерные реакции и «рождающиеся» при этом потоки солнечных нейтрино, пронизывающие космическое пространство и планету Земля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.biguniverse.ru/posts/nobelevskaya-premiya-po-fizike-2011>.
2. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 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. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 2. – Х.: НТМТ, 2013. – 333 с.
5. <http://news.21.by/other-news/2012/10/09/635932.html>.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
7. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
8. <http://www.newizv.ru/lenta/2012-10-09/171050-francuz-i-amerikanec-stali-laureatami-nobelevskoj-premii-po-fizike.html>.
9. <http://physiclib.ru/news/item/f00/s04/n0000439/index.shtml>.
10. <http://rian.com.ua/dossier/20141009/358062370.html>.
11. https://ru.wikipedia.org/wiki/Акасаки_Исаму.
12. https://ru.wikipedia.org/wiki/Аmano_Хироши.
13. https://ru.wikipedia.org/wiki/Накамура_Сюдзи.
14. http://www.nanometer.ru/2015/10/09/nobelevskaa_premia_465746.html.
15. https://ru.wikipedia.org/wiki/Макдональд,_Артур.
16. https://ru.wikipedia.org/wiki/Кадзита_Такааки.
17. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Изд-во «Точка», 2014. – 400 с.

REFERENCES

1. Available at: <http://www.biguniverse.ru/posts/nobelevskaya-premiya-po-fizike-2011> (accessed 12 June 2013). (Rus).
2. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
3. Baranov M.I. *Antologiya vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1*. [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
4. Baranov M.I. *Antologiya vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 2*. [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.2]. Kharkov, NTMT Publ., 2013. 333 p. (Rus).
5. Available at: <http://news.21.by/other-news/2012/10/09/635932.html> (accessed 11 May 2013). (Rus).
6. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
7. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).

8. Available at: <http://www.newizv.ru/lenta/2012-10-09/171050-francuz-i-amerikanec-stali-laureatami-nobelevskoj-premii-po-fizike.html> (accessed 22 May 2013). (Rus).

9. Available at: <http://physiclib.ru/news/item/f00/s04/n0000439/index.shtml> (accessed 12 September 2014). (Rus).

10. Available at: <http://rian.com.ua/dossier/20141009/358062370.html> (accessed 23 March 2013). (Rus).

11. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Isamu_Akasaki (accessed 10 May 2010).

12. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hiroshi_Amano (accessed 10 April 2012).

13. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Shuji_Nakamura (accessed 11 May 2010).

14. Available at: http://www.nanometer.ru/2015/10/09/nobelevskaa_premia_465746.html (accessed 03 October 2013). (Rus).

15. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_B._McDonald (accessed 12 January 2013).

16. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Takaaki_Kajita (accessed 21 July 2012).

17. 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).

Поступила (received) 11.02.2016

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., г.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 39: Nobel Prize Laureates in Physics for 2011-2015.

Purpose. Implementation of brief analytical review of the distinguished scientific achievements of the world scientists-physicists, awarded the Nobel Prize on physics for the period 2011-2015.

Methodology. Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information of world level in area of astrophysics, physics of elementary particles, physics of high energies, of modern theoretical and experimental physics. **Results.** The brief analytical review of the scientific openings and distinguished achievements of scientists-physicists is resulted in area of modern physical and technical problems which were marked the Nobel Prizes on physics for the period 2011-2015.

Originality. Systematization is executed with exposition in the short concentrated form of the known scientific and technical materials, devoted opening of acceleration of expansion of Universe, creation of breach technologies of manipulation the quantum systems, theoretical discovery of mechanism of origin of mass of under-atomic particles, invention of effective power sources of light – blue light-emitting diodes and opening of neutrino oscillations. **Practical value.** Popularization and deepening of scientific and technical knowledges for students, engineers and technical specialists and research workers in area of modern theoretical and experimental physics, extending their scientific range of interests and cooperation in further development of scientific and technical progress in human society. References 17, figures 14.

Key words: modern physics, distinguished achievements, speed-up expansion of Universe, technologies of manipulation of the quantum systems, mechanism of origin of the masses of under-atomic particles, energy saving sources of light, blue light-emitting diodes, neutrino oscillations.

В.Б. Клепиков, О.Є. Тверитникова

ПРОФЕСОР П.П. КОПНЯЄВ – ВЧЕНИЙ, ГРОМАДСЬКИЙ ДІЯЧ, ОРГАНІЗАТОР ВИЩОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ОСВІТИ (до 150-річчя зі дня народження)

Розкрито процес зародження системи вищої електротехнічної освіти в Україні наприкінці XIX ст. початку XX ст. Обґрунтовано внесок професора П.П. Копняєва у заснування наукової електротехнічної школи України. Розкрито організаційну діяльність вченого у створенні електротехнічного факультету Харківського політехнічного інституту та першого в Україні спеціалізованого вищого навчального закладу електротехнічного профілю. Доведено, що вісім основних електротехнічних напрямів наукових досліджень, започаткованих П.П. Копняєвим, набули розвитку і стали в подальші роки окремою науковою школою або науковим напрямом. Бібл. 16, рис. 4.

Ключові слова: електротехнічна наука, вища освіта, професор П.П. Копняєв, Харківський політехнічний інститут.

Раскрыто процесс зарождения системы высшего электротехнического образования в Украине в конце XIX в. начала XX в. Обоснованно вклад профессора П.П. Копняева в основание научной электротехнической школы Украины. Раскрыто организационную деятельность ученого в создании электротехнического факультета Харьковского политехнического института и первого в Украине специализированного высшего учебного заведения электротехнического профиля. Доказано, что восемь основных электротехнических направлений научных исследований, начатых П.П. Копняевым, получили развитие и стали в последующие годы отдельной научной школой или научным направлением. Библ. 16, рис. 4.

Ключевые слова: электротехническая наука, высшее образование, профессор П.П. Копняев, Харьковский политехнический институт.

Вступ. Як засвідчує досвід світової та вітчизняної науки і освіти, визначальну роль у їхньому поступі відігравали видатні особистості. Становлення електротехнічної науки та системи вищої електротехнічної освіти в Україні тісно пов'язано з діяльністю талановитого електротехніка, організатора науки та освіти, професора П.П. Копняєва. У різні роки вчений обіймав посади декана механічного відділення, електротехнічного факультету, ректора Харківського технологічного інституту (ХТІ), голови Всеукраїнської електротехнічної секції та Всеукраїнської асоціації інженерів. П.П. Копняєв є автором перших фундаментальних підручників та посібників. Він наполягав на широкому впровадженні власних розробок та результатів досліджень своїх учнів, що надавало можливість розвивати електротехнічну галузь в Україні. Якраз з його іменем безпосередньо пов'язано створення кафедр електротехніки, електротехнічного факультету та першого в Україні спеціалізованого вищого навчального закладу – Харківського електротехнічного інституту. Наукову та організаційну діяльність П.П. Копняєва фрагментарно висвітлено в публікаціях учнів вченого та виданні до ювілею електротехнічного факультету НТУ «ХПІ» [1, 2]. Особистості професора П.П. Копняєва присвячені дослідження [3, 4].

Мета статті – опираючись на наукову літературу та опрацювання джерел, насамперед архівних документів, доповнити відомості щодо науково-освітньої діяльності та біографії відомого українського електротехніка – П.П. Копняєва.

Зародження електротехнічних досліджень в Україні. Система вищої електротехнічної освіти почала формуватися у провідних вишах України наприкінці XIX початку XX ст. У Львівській політехніці початок електротехнічних досліджень пов'язаний з діяльністю професорів Ф. Стржелецького та К. Оларського. Зацікавленість до нової галузі виявив талановитий інженер і науковець Р. Гостковський. Його

наукові праці стосуються питань електричних двигунів, генераторів постійного струму, використання електричної енергії для залізничного транспорту тощо. Подальші дослідження в галузі електротехніки продовжував професор Ф. Добжинський. Він займався електричними вимірюваннями, електричними машинами, теорією електричних кіл тощо. Як окрему навчальну дисципліну електротехніку було запроваджено до навчального плану Львівської політехніки 1887 р. А 1890 р. було створено кафедру електротехніки, яку очолив професор Р. Дзесьльєвський, випускник Технічної академії Львова. Розширення електротехнічного напрямку Львівської політехніки пов'язано з професором С. Фризе та професором Г.З. Сокольніцьким – ініціатором впровадження електротехнічної освіти в Західній Україні.

Електротехніку в КПІ викладали відомі вчені: професори М.А. Артем'єв, А.В. Круковський, А.А. Скоморохов, С.М. Усатий, А.А. Соколов. За ініціативою А.В. Круковського була створена електротехнічна лабораторія. Професор М. А. Артем'єв мав багатий практичний досвід, що дозволило йому стати завідувачем створеної в КПІ 1900 р. кафедри електротехніки та розпочати викладання цієї дисципліни. 1918 р. з метою розширення підготовки інженерів нових спеціальностей у КПІ був створений електротехнічний факультет з відділеннями електричних станцій, електричної тяги та техніки зв'язку, але фактично нічого не змінилося. Як і раніше, випуск фахівців-електротехніків проводився за однією спеціалізацією на механічному відділенні. Кількість студентів, які виконували дипломні роботи з електротехнічного проектування, становила п'ять–шість на рік. З 1921 р. загальний курс електротехніки був розширений. Було запроваджено декілька нових дисциплін, зокрема, вступ до електротехніки, енциклопедію електротехніки, теоретичні основи електротехніки та основи теорії змінних струмів.

© В.Б. Клепиков, О.Є. Тверитникова

1921 р. до механіко-машинобудівного факультету Катеринославського гірничого училища було приєднано електротехнічне відділення реорганізованого Катеринославського політехнічного інституту. Його очолював професор електротехніки Г.Є. Єврейнов. Він розпочав наукові дослідження в галузі електрифікації гірничих підприємств, теоретичних основ електротехніки і став засновником електромеханічної спеціальності в інституті. В Одесі Вищі курси телеграфних механіків були відкриті в 1900 р. У подальші роки курси було розширено і в 1923 р. організовано Одеський електротехнікум сильних струмів. Навчальний заклад готував інженерів зв'язку, термін навчання становив чотири роки. У 1929 р. електротехнікум було реорганізовано в електротехнічний факультет Одеського політехнічного інституту [3, с. 36-40].

Поштовхом становлення електротехнічних досліджень у Харківському практичному технологічному інституті стала організація фізичного кабінету. 5 серпня 1885 р. за пропозицією В.Л. Кирпичова, Міністерством народної освіти на посаду ад'юнкта-професора фізики було призначено доцента Харківського університету О.К. Погорелка. Розширення викладання електротехніки в ХТІ належить талановитому вченому електротехніку та професору М.П. Клобукову [4, с. 12].

Діяльність П.П. Копняєва зі створення електротехнічного факультету та електротехнічного інституту. Після закінчення навчання в 1898 р. П.П. Копняєв (рис. 1) був запрошений до Харківського технологічного інституту. Все подальше життя вченого, за винятком вимушеного від'їзду до Петербургу в 1905-1907 рр., пов'язано з Харковом, з ХТІ, де відбулося його становлення як провідного науковця в галузі електротехніки та як фундатора електротехнічної освіти України.



Рис. 1. Павло Петрович Копняєв

Наукова і педагогічна діяльність П.П. Копняєва розпочалася в ХТІ того часу, коли ситуація з електротехнічним напрямом була невирішеною. Навчальна дисципліна «Загальна електротехніка» викладалася студентам механічного відділення в обсязі двох годин на тиждень, дипломні проекти з електротехнічної

спеціалізації не виконувалися. Не проводилися й наукові дослідження. Професор П.П. Копняєв відразу розпочав реорганізацію викладання дисциплін електротехнічного профілю. За його ініціативою було збільшено кількість лекційних годин. Вперше до навчальної програми були включені спецкурси, які охоплювали різні розділи електротехніки, і, головне, відводилося навантаження для дипломного проектування. Усе це створило сприятливі умови для першого випуску, що відбувся вже в 1900 р. і складався з п'яти фахівців, які спеціалізувалися в галузі електротехніки. Розширення викладання електротехнічних дисциплін, запровадження нових електротехнічних напрямів, використання нових методик, формування самостійних електротехнічних наукових дисциплін вимагало створення підручників, навчальних посібників, методичної літератури. Виданий у 1893-1894 рр. літографічним методом підручник із загальної електротехніки М.П. Клобукова був єдиним підручником в Україні, мав невеликий наклад і ряд недоліків. Узагальнюючи накопичений матеріал, протягом 1900-1902 рр. П.П. Копняєв підготував до видання підручник у двох частинах, який містить повний курс загальної електротехніки. Вони стали першими в Україні підручниками з основ електротехніки. Посібники П.П. Копняєва відзначалися послідовністю викладання, супроводжувались прикладами, що давало можливість застосовувати теоретичні засади для практичної діяльності в галузі електротехніки [5, арк. 1-2].

Створення кафедри електротехніки сприяло розширенню тематики дипломних проектів з електротехнічної спеціалізації і збільшенню кількості лекцій до трьох годин на першому курсі і двох – на другому. Наприклад у 1904/1905 навч. рр. було відпрацьовано двадцять п'ять тем. Стало обов'язковим відвідування лабораторних та практичних занять. Термін вивчення курсу з електротехніки завершувався складанням іспиту. П.П. Копняєв виступає ініціатором впровадження нових методів викладання. Він подав прохання до учбового комітету інституту дозволити студентам паралельно з прослухуванням лекцій виконувати лабораторні роботи і самостійні проекти. До цих нововведень студенти спочатку слухали курс лекцій, екзамінувались і лише потім приступали до практичної роботи. Після декількох засідань новатору-науковцю дозволили запровадження нової системи навчання [6, арк. 1].

Ще на початку своєї педагогічної діяльності в технологічному інституті П.П. Копняєв розробив проект організації самостійного електротехнічного факультету (ЕФ). У 1907 р., 1912 р., 1914 р. вчений здійснив нові спроби з його організації. 26.11.1920 р. на підставі рішення наради Народного комітету професійної освіти України було створено комісію під керівництвом П.П. Копняєва. До складу комісії входили: викладачі ХТІ В.О. Із'юров, секретар комісії В.М. Кияниця, відповідальний за будівництво лабораторій інженер В.А. Радциг і представник Ради студентів Ф.А. Ступель. Метою комісії була організація самостійного електротехнічного факультету, створення нових навчальних планів, поставка нового сучасного обладнання. Електротехнічний факультет відкрили

21.01.1921 р. Деканом призначили професора П.П. Копняєва [2].

Варто відзначити, що перший в Україні електротехнічний факультет було відкрито в КПІ 1918 р. Але фактично випуск фахівців-електротехніків проводився лише за однією спеціалізацією. Дипломні проекти з електротехніки виконували 5-6 студентів на рік.

Відкриття електротехнічного факультету в ХТІ мало велике значення для розвитку промисловості Півдня Росії. П.П. Копняєв при створенні факультету, прогнозуючи величезний попит на фахівців нових електротехнічних спеціалізацій, запропонував прискорені випуски – навчання за чотири роки за окремими навчальними програмами [57, с. 169].

До складу факультету входили чотири кафедри: «Електричні машини», «Електричне устаткування», «Загальна електротехніка», «Електрична тяга». На факультеті читалися курси з електроустаткування фабрик і заводів, електрифікації гірничої промисловості, електричних мереж і ліній, електричних станцій і міських трамваїв. Термін навчання становив п'ять років, виробнича практика стала обов'язковим елементом навчання, до викладання провідних дисциплін залучалися заводські інженери. Вивчення спеціальних курсів проводилося у вимірювальній та електромашинній лабораторіях. За пропозицією професора П.П. Копняєва розпочалось облаштування лабораторії високої напруги. За проектом ученого метою нової лабораторії був не тільки навчальний процес, а й наукова робота. У лабораторії планувалося проводити технічні випробування високовольтних ізоляторів та інших ізоляційних матеріалів, дослідження ліній високої напруги. Накопичений П.П. Копняєвим упродовж попередніх років досвід підготовки фахівців сприяв тому, що вже в перший рік існування факультету відбувся випуск висококваліфікованих спеціалістів. Дипломні проекти виконувалися за такими темами: міський електричний трамвай; електрозабезпечення міст, районні станції, електричні установки для копалин, обладнання електромеханічного заводу [7, арк. 2-4].

До професорсько-викладацького складу факультету входило чотири професори: О.О. Потєбня, В.М. Хрущов, С.О. Тейс та П.П. Копняєв і десять викладачів, серед яких О.Б. Брон, В.М. Кияниця, О.Я. Бергер, М.Ф. Перевозський. Узагальнення архівних матеріалів ДАХО дозволяє стверджувати, що основу колективу факультету становили випускники механічного факультету ХТІ, учні П.П. Копняєва [8, арк. 1-27; 9, арк. 1-2; 1].

Плідна діяльність вченого зі створення електротехнічного факультету надала підстави для організації в 1930 р. першої в Україні спеціалізованої технічної установи електротехнічного профілю – Харківського електротехнічного інституту. В інституті набула розвитку науково-технічна школа в галузі електротехніки де були представлені три основні функції – освітня, дослідницька та інноваційна. Фундаментальні та прикладні наукові дослідження проводилися, базуючись на потужній лабораторній базі, і відповідали високому науковому рівню. Відбувався тісний зв'язок з виробництвом, результати досліджень були впроваджені

і мали економічне, соціальне значення. У цей період були зроблені перші кроки до встановлення міжнародного співробітництва. Учені, які працювали над актуальними проблемами і реалізовували наукові розробки, отримали світове визнання.

Упродовж 1930-1934 рр. професорсько-викладацький склад інституту було посилено висококваліфікованими спеціалістами. За пропозицією П.П. Копняєва і В.М. Хрущова на посади викладачів кафедр було запрошено фахівців з виробництв, наукових співробітників науково-дослідних установ. Це сприяло поліпшенню викладання фундаментальних і практичних дисциплін, підвищенню якості викладання спеціалізованих курсів та дисциплін з технології процесів, зміцненню зв'язків між науково-дослідними кафедрами та виробництвом, розвитку нових наукових напрямів і початку реформування в інституті наукової електротехнічної школи, зміцненню професорсько-викладацького потенціалу (рис. 2) [10, арк. 1-3].



Рис. 2. Перший випуск інженерів-електриків Харківського електротехнічного інституту

Наявність потужного наукового потенціалу сприяла оптимізації структури інституту. Розвиток електротехніки у цей період відбувався досить стрімко, що вимагало створення нових факультетів з диференціальними спеціальностями для підготовки фахівців за вузькою спеціалізацією і навчальними програмами, які відрізнялися змістом. Завдяки базі, яку було сформовано в попередні роки на електротехнічному факультеті професором П.П. Копняєвим, підготовка спеціалістів в електротехнічному інституті відбувалась за напрямками: електричні машини, електроапаратобудування, електрична тяга, центральні електростанції, передавання і розподіл електричної енергії. Отже, професором П.П. Копняєвим було започатковано та підтримано його учнями такі напрями наукової діяльності, як фундаментальні та прикладні дослідження в галузях техніки високих напруг і передавання електричної енергії на відстань (В.М. Хрущов, С.М. Фертік); теорії та практики електричних машин (Г.І. Штурман, О.Я. Бергер); електроапаратобудування (Б.Ф. Вашура, О.Б. Брон); енергетики та електричних станцій (А.Л. Матвеев); електричного приводу (Т.П. Губенко, А.Л. Аронов); теоретичних основ електротехніки (О.П. Сукачов); електричних вимірювань (О.Х. Хінкулов); електричної тяги (О.О. Потєбня).

Науковий доробок П.П. Копняєва. Результати початкових наукових досліджень вченого були опубліковані в 1896 р. і одразу привернули до себе увагу науковців Європи. У роботі науковець теоретично обґрунтовував запропонований метод аналогії, підкреслив єдність законів, які є основними для тієї чи іншої групи явищ, і довів, що, в зв'язку з цим закони мають тотожне математичне формулювання. На жаль, запропонована модель не знайшла гідного застосування. Між тим робота П.П. Копняєва в умовах того часу мала велике значення. Він першим з вітчизняних учених, ще 1898 р. заклав наукові основи методу аналогії в електротехніці. Цей метод отримав широке розповсюдження в сучасних умовах, дав можливість для вирішення складних дослідних завдань [11].

Першою спеціалізацією, яка поступово почала виокремлюватися в навчальну дисципліну, став курс «Електричні машини». Машини постійного струму переважали в установках того часу. Становлення нового курсу потребувало навчальної літератури для студентів і для підготовки наукових кадрів. Проведений автором аналіз дозволяє стверджувати, що існуючі на той час наукові праці з теорії електричних машин російських і зарубіжних вчених не відповідали основним вимогам до змісту дисципліни. Базовою літературою для вивчення дисципліни на той час, були підручники вчених німецької наукової школи, які вважалися найбільш досвідченими фахівцями в галузі електричних машин. Але їхні роботи почали перекладатися лише після 1908 р.

У 1904 р. за матеріалами власних досліджень П.П. Копняєвим було видано працю, присвячену питанням теорії, проектування, дослідження електричних машин постійного струму [12]. У підручнику було систематизовано експериментальний матеріал, накопичений автором за роки роботи у ХТІ і під час стажування в закордонних електротехнічних вищих школах. Визначальним чинником цієї праці було те, що вчений розробив нові методологічні та методичні підходи до викладання матеріалу. Без перебільшення варто відзначити, що праця П.П. Копняєва стала основою для підготовки інженерів-електриків. Принципи викладання матеріалу у цьому розділі відрізнялися від інших авторів. Вчений розглянув властивості різних типів електродвигунів і склав повну класифікацію їхніх загальних властивостей.

Далі П.П. Копняєв розпочав систематизацію власних навчальних посібників для всебічної підготовки інженерів-електротехніків. Певна група наукових робіт була об'єднана автором за спільністю тематики і становила цикл з п'яти фундаментальних томів: основи електротехніки, електричні вимірювання, динамомашини постійного струму, машини змінного струму і трансформатори і електричні установки. Останній том охоплював матеріали дисциплін, які вчений викладав у ХТІ – електричні мережі й електричні станції. Автор подає класифікацію і методику розрахунку проводів з урахуванням економічних чинників, власний оригінальний метод розрахунку освітленості. Він запропонував декілька формул для розрахунків сили світла (освітленості) і необхідних компонент. Цей метод мав перевагу порівняно з роботами німецьких

учених, які отримували результат, спираючись на емпіричні дані чи пропонували досить громіздкі розрахунки. Пізніше німецький учений О. Блох створив методику, схожу на метод П.П. Копняєва. У другому розділі автор представив розробку питання про ймовірне зростання навантаження електростанцій для найближчого десятиліття. Це було ще не розроблене і дуже важливе питання експлуатації електростанцій. Як показав подальший розвиток енергетики, своїм доробком учений випередив час. В останньому розділі П.П. Копняєв наводить методи розрахунків складних електричних мереж. Узагальнюючи відомі на той час методики, детально аналізує кожну з них, підкреслив недоліки і переваги.

Вагомий внесок у розвиток напряму електричної тяги в Україні своїми працями з питань трамвайної тяги зробив професор П. П. Копняєв. 1911 р. він, користуючись власним досвідом роботи, розробив технічний проект міського електричного трамвая в Маріуполі. Базуючись на роботах з тягової механіки А.І. Липеця і Д.М. Лебедева, вчений запропонував графічний метод визначення витрат енергії залежно від профілю шляху і аналітичне рівняння руху трамвайного вагону. На відміну від попередників, графічний метод П.П. Копняєва, що базувався на основі математичного обґрунтування, визначав характеристики швидкості, струму, часу і споживання енергії (тобто будувалися відповідні графіки). Таким чином, з'являвся повний набір характеристик руху вагону, за допомогою якого визначались швидкість, час пробігу, величина сили струму і кількість електричної енергії, що витрачав вагон залежно від профілю шляху. Подальша робота була спрямована на удосконалення методики визначення розрахунків трамвайної тяги без графічних побудов. Результатом стала розробка аналітичного методу, який не залежав від графічного. Цю методику, запропоновану П.П. Копняєвим, потрібно було застосовувати власне в сукупності двох методів для отримання точних результатів обчислень. Технічна перевага методів розрахунків трамвайної тяги П.П. Копняєва одержала повне підтвердження при проведенні випробувань на діючих трамваях [13; 14].

Наукова спадщина вченого становить понад п'ятдесят праць і охоплює основні напрями розвитку електротехнічної галузі на початку ХХ ст. Науковий доробок ученого можна класифікувати за шістьма основними групами. Першу групу становлять праці із загальної електротехніки, які тривалий час були базовим матеріалом для підготовки фахівців. Другу групу складають фундаментальні роботи з теорії електричних машин постійного і змінного струму. Дослідження з питань метрології і електричних вимірювань охоплюють третю групу наукових праць. До четвертої групи можна віднести праці вченого з проблем електричної тяги. Роботи з розрахунків електричних мереж варто виокремити в п'яту групу. І останню групу складають праці з питань електричних установок.

Громадська діяльність. Разом з викладацькою і науковою роботою П.П. Копняєв вміло поєднував громадську діяльність. Упродовж 1907-1908 рр. його обрано керівником комісії з організації в Харкові першої Південноросійської електротехнічної виставки.

Метою виставки була популяризація досягнень електротехніки і впровадження електротехнічних здобутків у промисловість, зокрема гірничодобувну і сільськогосподарську. Він, постійний учасник Всеросійських електротехнічних з'їздів (рис. 3), протягом двадцяти років працював у керівництві Південноросійського товариства технологів і редагував «Відомості», які видавались товариством; виконував обов'язки голови електротехнічної секції Всеукраїнської асоціації інженерів у Харкові; був членом Міжнародної електротехнічної комісії. Діяльність ученого в цьому напрямку мала велике значення для становлення системи підготовки інженерних кадрів і наукових робітників в Україні, розвитку електричного господарства м. Харкова. У 1916 р. його обрали деканом механічного факультету. Протягом 1919-1920 рр. він виконував обов'язки ректора ХТІ [15, арк. 22; 16, арк. 1-3].



Рис. 3. Президія І-го Всеукраїнського енергетичного з'їзду, м. Харків, 1929 р.

Висновки. Безумовно, професор П.П. Копняєв був фундатором вищої електротехнічної освіти та наукової школи в галузі електротехніки в Україні. У постаті вченого органічно поєдналися талант науковця, професіоналізм освітянина та природні організаційні здібності. Визначальною рисою його науково-педагогічної діяльності стало новаторство. Аналіз наукової спадщини і висвітлення досягнень професора П.П. Копняєва дозволяє вважати, що йому притаманні риси наукового лідера. Вже, у 1920-ті рр. в Харківському технологічному інституті П. П. Копняєвим було створено підґрунтя для розвитку науково-технічної школи електротехніки в подальші роки.

Традиції фундатора електротехнічної освіти та науки зберігаються в НТУ «ХПІ». Від чотирьох кафедр електротехнічного факультету, створеного П.П. Копняєвим у 1921 р., ведуть свій родовід науково-педагогічні колективи близько 20-ти кафедр чотирьох факультетів НТУ «ХПІ».

21 січня 2011 р. в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» відбулося урочисте засідання Вченої ради, присвячене 90-річчю створення електротехнічного факультету, й відкриття пам'ятника засновнику факультету професору П.П. Копняєву.

У засіданні брав участь онук П.П. Копняєва – професор МДУ ім. М.В. Ломоносова, завідувач секто-

ром Інституту прикладної математики ім. М. Келдиша, доктор фізико-математичних наук професор О.Д. Брюно, а також професор, доктор фізико-математичних наук професор Г.С. Рофе-Бекетов. Його дід, академік архітектури О.М. Бекетов, разом з П.П. Копняєвим свого часу очолювали комісію з будівництва електротехнічного корпусу для нового факультету (рис. 4).



Рис. 4. О.Д. Брюно та Г.С. Рофе-Бекетов (21.01.2011 р.)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Белькинд Л.Д. и др. Сборник, посвященный памяти заслуженного профессора Павла Петровича Копняева. – Харьков, 1955. – 135 с.
2. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ТВЕРИТНИКОВА О.С. Електротехнічний факультет Харківського технологічного інституту. Витоки розвитку // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2011. – №4(86). – С. 66-74.
3. ТВЕРИТНИКОВА О.С. Зародження і розвиток науково-технічної школи професора П.П. Копняєва. Монографія. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – 212 с.
4. Каменева В.А. Павел Петрович Копняев. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 96 с.
5. Інститут архівознавства Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського НАН України. Фонд Інституту електродинаміки НАН України 263. Оп. 2. Спр. 171, 94 арк.
6. Інститут архівознавства Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського НАН України. Фонд ІЕД НАН України 263. Оп. 2. Спр. 172, 114 арк.
7. Державний архів Харківської області (ДАХО). Фонд Р-1682 Харківського політехнічного інституту. Оп. 1. Спр. 83, 14 арк.
8. ДАХО. Фонд Р-1682 ХПІ. Оп. 1. Спр. 295, 27 арк.
9. Архів національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Ф. Р-1682. Спр. 11, 10 арк.
10. ДАХО. Фонд 5404 Харківського електротехнічного інституту. Оп. 2. Спр. 59. 15 арк.
11. Копняєв П.П. Аналогія между явлениями электричества и гидравлики // Электричество. – 1898. – №11-12. – С. 159-166.
12. Копняєв П.П. Динамо-машины постоянного тока. Их теория, испытание, конструкция и расчёт (с отдельным атласом чертежей). – Харьков: Типография Адольфа Дарре, – 1904. – 290 с.

13. Копняев П.П. Аналитический расчёт трамвайной тяги // Электричество. – 1915. – № 2.
 14. Копняев П.П. Графический расчёт трамвайной тяги // Электричество. – 1914. – № 2.
 15. ДАХО. Фонд 770 Харківського технологічного інституту. Оп. 1. Спр. 630, арк. 61
 16. ДАХО. Фонд Р-1682 XIII. Оп. 1. Спр. 35, арк. 11

REFERENCES

1. Belkind L.D. *Sbornik, posvyashchennyu pamyati zaslužennogo professora Pavla Petrovicha Kopnyaeva* [Collection dedicated to the memory of the Honored Professor Pavel Petrovich Kopnyaev]. Kharkov, 1955. 135 p. (Rus).
 2. Tovazhnyansky L.L., Tverytnykova O.Ye. Electrotechnical faculty of Kharkiv Technology Institute. Origins of development. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2011, no.4(86), pp. 66-74. (Ukr).
 3. Tverytnykova O.Ye. *Zarozhennia i rozvytok naukovotekhnichnoi shkoly Profesora P.P. Kopniaieva. Monohrafiia* [The origin and development of the scientific and technical school of Professor P.P. Kopniaiev. Monograph]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2010. 212 p. (Ukr).
 4. Kameneva V.A. *Pavel Petrovich Kopnyaev* [P.P. Kopniaiev]. M. – L, Gosenergoizdat Publ., 1959. 96 p. (Rus).
 5. *Instytut arkhivoznavstva Natsionalnoi biblioteky Ukrainy im. V.I. Vernadskoho NAN Ukrainy. Fond Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy 263* [Institute of Archival Studies of the National Library of Ukraine named after V.I. Vernadskyi National Academy of Sciences of Ukraine. Fund of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine 263]. Desc. 2. iss. 171, 94 p. (Ukr).
 6. *Instytut arkhivoznavstva Natsionalnoi biblioteky Ukrainy im. V.I. Vernadskoho NAN Ukrainy. Fond IED NAN Ukrainy 263* [Institute of Archival Studies of the National Library of Ukraine named after V.I. Vernadskyi National Academy of Sciences of Ukraine. Fund of IER Foundation of the NAS of Ukraine 263]. Desc. 2. iss. 172, 114 p. (Ukr).
 7. *Derzhavnyi arkhiv Kharkivskoi oblasti (DAKhO). Fond R-1682 Kharkivskoho politekhnichnoho instytutu* [State Archives of Kharkiv Region. Fund R-1682 of Kharkiv Polytechnic Institute]. Desc. 1. iss. 83, 14 p. (Ukr).
 8. *Derzhavnyi arkhiv Kharkivskoi oblasti (DAKhO). Fond R-1682 Kharkivskoho politekhnichnoho instytutu* [State Archives of Kharkiv Region. Fund R-1682 of Kharkiv Polytechnic Institute]. Desc. 1. iss. 295, 27 p. (Ukr).
 9. *Arkhiv natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»* [Archive of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»]. F.R, 1682. iss. 11, 10 p. (Ukr).
 10. *Derzhavnyi arkhiv Kharkivskoi oblasti (DAKhO). Fond 5404 Kharkivskoho elektrotekhnichnoho instytutu* [State Archives of Kharkiv Region. Fund 5404 of Kharkiv Electrotechnical Institute]. Desc. 2. iss. 59, 15 p. (Ukr).
 11. Kopnyaev P.P. The analogy between the phenomena of electricity and hydraulics. *Electricity*, 1898, no.11-12, pp. 159-166. (Rus).
 12. Kopnyaev P.P. *Dinamo-mashiny postoyannogo toka. Ih teoriya, ispytanie, konstruktziya i raschet (s otdelnym atlasom chertezhey)* [Dynamo machines of direct current. Their theory, test, design and calculation (with a separate atlas of drawings)]. Kharkov, Adolf Darre Publ., 1904. 290 p. (Rus).

13. Kopnyaev P.P. Analytical calculation of tram traction. *Electricity*, 1915, no 2. (Rus).
 14. Kopnyaev P.P. Graphic calculation of tram traction. *Electricity*, 1914, no.2. . (Rus).
 15. *Derzhavnyi arkhiv Kharkivskoi oblasti (DAKhO). Fond 770 Kharkivskoho tekhnolohichnoho instytutu* [State Archives of Kharkiv Region. Fund 770 of Kharkov Technology Institute]. Desc. 1. iss. 630, 61 p. (Ukr).
 16. *Derzhavnyi arkhiv Kharkivskoi oblasti (DAKhO). Fond R-1682 Kharkivskoho politekhnichnoho instytutu* [State Archives of Kharkiv Region. Fund R-1682 of Kharkiv Polytechnic Institute]. Desc. 1. iss. 35, 11 p. (Ukr).

Надійшло (received) 29.06.2017

Клепиков Владимир Борисович¹, д.т.н., проф.,
 Тверитникова Елена Евгеньевна¹, к.і.н., доц.,

¹ Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
 тел/phone +38 057 7076226,
 e-mail: klepikov@kpi.kharkov.ua, tveekhpi@ukr.net

V.B. Klepikov¹, O.Ye. Tverytnykova¹

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

**Professor P.P. Kopniaiev - scientist, public person,
 establisher of higher electrical engineering education
 (to the 150th anniversary of his birth).**

Purpose. To carry out complete historical and scientific analysis of Professor P.P. Kopniaiev's activities and establish his role and place of achievements in the formation of the basic concepts and directions of the theory of electrical engineering and its practical application in the development of higher education in Ukraine. **Methodology.** We have applied general scientific methods of logic and classification, analysis and synthesis and special historical methods – historical-comparative, problem-chronological, synchronic and diachronic. **Results.** On the basis of generalization of a wide range of sources of central, regional and personal archives, the principles and content of scientific-pedagogical, organizational and public activities of P.P. Kopniaiev were revealed and the classification of the scientific work according to the main directions of his research was conducted. **Originality.** Complex analysis of P.P. Kopniaiev's scientific-pedagogical, organizational and public activities were carried out in the field of higher electrical engineering education and industrial development in Ukraine, and his scientific achievements were classified according to the main directions. **Practical value.** Factual information, generalizations and conclusions can be applied in the teaching of humanitarian and engineering disciplines in higher education, in particular in the development of the lecture courses and textbooks used in educational activities, as well as in the preparation of general and scientific works on the history of science and technology. References 16, figures 4.

Key words: electrical engineering science, higher education, Professor P.P. Kopniaiev, Kharkiv Polytechnic Institute.

В.Г. Данько, Є.В. Гончаров, І.В. Поляков

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ НАДПРОВІДНОГО ІНДУКТИВНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ З ДОДАТКОВИМ НАДПРОВІДНИМ ЕКРАНОМ

Проведено аналіз режимів роботи та конструктивної схеми надпровідного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу з додатковим надпровідним екраном. Проведено математичне моделювання магнітної системи обмежувача струму методом скінченних елементів у програмному середовищі FEMM. Проведено розрахунок розподілу магнітних полів у різних режимах спрацювання обмежувача струму короткого замикання на ділянці між основним і додатковим екранами, що дозволяє визначити параметри обмежувача струму. Бібл. 15, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: обмежувач струму, високотемпературний надпровідник, надпровідний екран, індуктивність, магнітне поле, магнітопровід.

Проведен анализ режимов работы и конструктивной схемы сверхпроводящего ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа с дополнительным сверхпроводящим экраном. Проведено математическое моделирование магнитной системы ограничителя тока методом конечных элементов в программной среде FEMM. Проведен расчет распределения магнитных полей в различных режимах срабатывания ограничителя тока короткого замыкания на участке между основным и дополнительным экранами, что позволяет определить параметры ограничителя тока. Библ. 15, табл. 3, рис. 6.

Ключевые слова: ограничитель тока, высокотемпературный сверхпроводник, сверхпроводящий экран, индуктивность, магнитное поле, магнитопровод.

Вступ. Розвиток галузі електроенергетики характеризується зростанням генерації електроенергії, освоєнням збільшених потужностей, створенням електроенергетичних систем великої потужності. Таким чином, виникли передумови для розвитку електроенергетики на новій технологічній основі високотемпературної надпровідності.

Надпровідний високотемпературний обмежувач струму короткого замикання є альтернативою використанню традиційних струмообмежувальних реакторів. За конструктивними особливостями можна виділити дві основні концепції надпровідного обмежувача струму: резистивну та індуктивну, на них базуються інші схемні рішення [1, 2].

Резистивна конструкція надпровідного обмежувача струму, заснована на нелінійності опору надпровідника і може використовувати масивні елементи або котушки [3]. У разі використання надпровідних котушок у якості надпровідних елементів, вони включаються таким чином, щоб повна індуктивність обмежувача була мінімальною [4]. Основним недоліком резистивного надпровідного обмежувача струму є значні тепловиділення і перегрів при короткому замиканні.

У індуктивній конструкції, що розглянута у роботі Yonsei University, магнітний зв'язок між надпровідним елементом і обмоткою здійснюється через тристрижневий магнітопровід [5]. Також, наприклад, у роботі компанії ABB розроблено конструкцію трифазного обмежувача струму (1,2 МВА) з циліндричним екраном з 16 кілець надпровідної кераміки Bi-2212, який пройшов випробування та експлуатувався протягом року [6]. Робота індуктивного обмежувача струму пов'язана з наявністю магнітних полів розсіяння, що може негативно впливати на використання металевого кріостату і збільшувати втрати потужності.

Зменшення впливу магнітних полів розсіяння можна забезпечити за рахунок використання додаткового надпровідного екрана.

Але особливості роботи індуктивного обмежувача струму, що використовує додатковий надпровідний екран, не досліджені.

Мета та задача дослідження. Метою статті є дослідження особливостей роботи обмежувача струму короткого замикання з додатковим надпровідним екраном. Задача роботи – аналіз режимів спрацювання з визначенням розподілу магнітних полів у обмежувачі струму.

Загальний вигляд конструктивної схеми обмежувача струму з додатковим надпровідним екраном і схема увімкнення у фазу електромережі з навантаженням подана на рис. 1 [7].

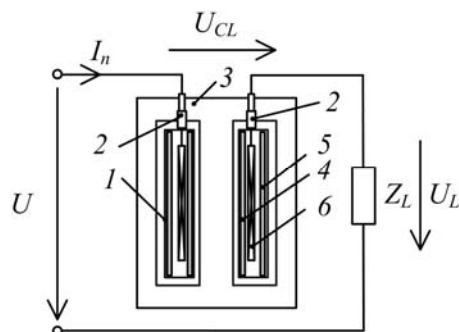


Рис. 1. Конструктивна схема обмежувача струму

Обмежувач струму короткого замикання знаходиться у кріостаті 1 з струмоводами 2 на середньому стержні феромагнітного осердя магнітопроводу 3. Від внутрішньої стінки кріостата до зовнішньої аксіально розташовані основний надпровідний екран 4, ззовні додатковий надпровідний екран 5, усередині між ними надпровідна обмотка 6. Кріостат заповнюється рідким азотом, для охолодження обмотки та екранів до надпровідного стану (77 K) [8].

Обмотка 6 послідовно з'єднана з навантаженням і у номінальному режимі крізь неї проходить струм навантаження I_n . Надпровідним екраном 4 екранується

середній стержень магнітопроводу від магнітного поля, яке створює обмотка b .

Індуктивність надпровідної обмотки обмежувача струму при номінальному режимі [9]:

$$L_{sc} = \frac{\Psi}{I_n} = \mu_a w^2 \frac{2\pi r_{mid} b}{3h_{coil}},$$

де Ψ – потокозчеплення обмотки; I_n – номінальний струм; r_{mid} – середній радіус обмотки; b – ширина обмотки; h_{coil} – висота обмотки; w – кількість витків обмотки; μ_a – абсолютна магнітна проникність [10].

Розглянемо, як впливає падіння напруги U_{CL} на обмежувачі струму на зменшення напруги навантаження U_L по відношенню до напруги електричної мережі U . Використання високотемпературних надпровідників для обмоток обмежувача струму зводить їх опір практично до чисто індуктивного ($R \rightarrow 0$). Тобто напруга на обмежувачі струму U_{CL} випереджає струм I_n на $\sim 90^\circ$ (рис. 2).

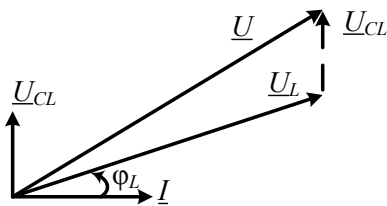


Рис. 2. Векторна діаграма електричного кола з надпровідним обмежувачем струму

Відповідно до векторної діаграми $\underline{U} = \underline{U}_L + \underline{U}_{CL} = \underline{U}_L + k_{CL} \underline{U}_L$, де k_{CL} – коефіцієнт співвідношення U_{CL} з напругою навантаження U_L .

З векторної діаграми напруга навантаження

$$U_L = \frac{U}{\sqrt{\left(k_{CL} + \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_L}\right) + \cos^2 \varphi_L}},$$

де φ_L – кут зсуву фази характеру навантаження.

В промислових регіонах України $\cos \varphi$ знаходиться в межах 0,9-0,95, тому напругу на обмежувачі струму варто обмежувати до $0,05 U_L$, закладаючи відповідні конструктивні параметри обмежувача струму [11]. При $\cos \varphi \approx 0,97$ можна прийняти $k_{CL} = (0,1-0,15)$. Результати розрахунків співвідношення між напругою навантаження U_L та напругою електричної мережі U в залежності від k_{CL} і $\cos \varphi_L$ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

k_{CL}	U_L як частка від U			
	$\cos \varphi_L$			
	0,85	0,9	0,95	1,0
0,05	0,973 U	0,977 U	0,983 U	0,999 U
0,1	0,947 U	0,954 U	0,965 U	0,995 U
0,15	0,92 U	0,931 U	0,946 U	0,99 U

З табл. 1 видно, що при активному навантаженні електричної мережі надпровідний обмежувач струму, навіть при значному падінні напруги на ньому, практично не впливає на зменшення напруги на навантаженні.

Розрахунок розподілу магнітного поля. Проведено розрахунок розподілу магнітного поля у номінальному режимі роботи обмежувача струму з використанням методу скінчених елементів у математичному пакеті FEMM [12].

Для розрахунку магнітного поля була побудована розрахункова геометрична модель магнітної системи обмежувача струму з параметрами, що подані у табл. 2 [13].

Таблиця 2

Параметри обмежувача струму	
Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	6
Номінальний струм, А	400
Радіус перерізу осердя r_c , м	0,105
Ширина магнітопроводу A , м	0,471
Висота вікна магнітопроводу h , м	0,84
Висота надпровідних екранів h_{scr} , м	0,82
Висота обмотки h_{coil} , м	0,81
Кількість витків обмотки w	367
Зазор між основним екраном та обмоткою δ_{scr} , мм	1-5

Розподіл магнітного поля у вікні магнітопроводу обмежувача струму при номінальному режимі, який розраховано у пакеті FEMM, подано на рис. 3.

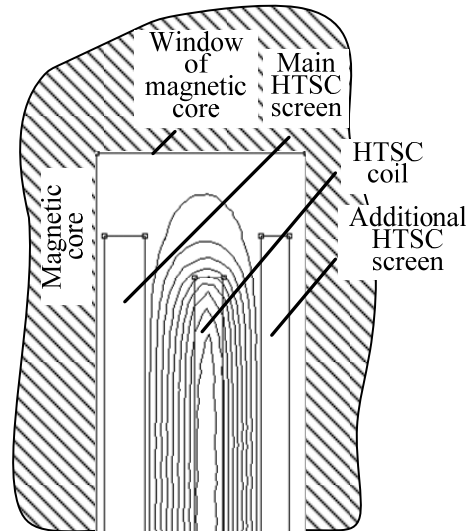


Рис. 3. Розподіл магнітного поля у вікні магнітопроводу обмежувача струму

Геометрична модель магнітопроводу обмежувача побудована у FEMM для проведення розрахунків індуктивності з допущенням, що переріз обмежувача струму прямокутний, а розподіл магнітного потоку не змінюється радіально [14].

Розрахунок індуктивного опору еквівалентної моделі обмежувача струму у номінальному режимі виконано на базі розрахунку магнітного поля та наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Індуктивний опір X_L при $\mu_r = 1$		
δ_{scr}/h_{coil} , %	X_L , Ом	k_{CL}
0,1	0,0917	$6,11 \cdot 10^{-03}$
0,2	0,129	$8,61 \cdot 10^{-03}$
0,3	0,165	$1,10 \cdot 10^{-02}$
0,4	0,199	$1,32 \cdot 10^{-02}$
0,5	0,239	$1,59 \cdot 10^{-02}$

Індуктивність обмотки, що обумовлена магнітними потоками розсіяння, з урахуванням екранування, незначна. Повний опір такого обмежувача струму при номінальному режимі роботи електромережі досить малий, що не призводить до значного зменшення напруги на навантаженні $U_{CL} < 3\%$ від U , а сам характер падіння напруги індуктивний.

При номінальному режимі роботи додатковий надпровідний екран забезпечує проходження магнітного потоку ззовні обмотки. Магнітні поля розсіяння зовні обмотки екрануються додатковим надпровідним екраном. Магнітний потік не проникає у крайні стержні магнітопроводу, тому втрати у магнітопроводі при номінальному режимі відсутні. Перехідний процес при спрацюванні екранованого надпровідного обмежувача струму може відбуватися у декілька етапів.

Можливі два варіанти спрацювання обмежувача струму з додатковим екраном. При втраті надпровідності додатковим надпровідним екраном при критичній напруженості магнітного поля H_{cr} , коли струм в обмотці досягає значення $I_{cr1} = 3I_n$, індуктивність обмотки складає $L = 0,3$ мГн. Магнітний потік проходить зовні поверхні основного надпровідного екрана та проникає у крайні стержні магнітопроводу. Розрахунок розподілу магнітного поля обмотки з $\mu_r = 1$ подано на рис. 4.

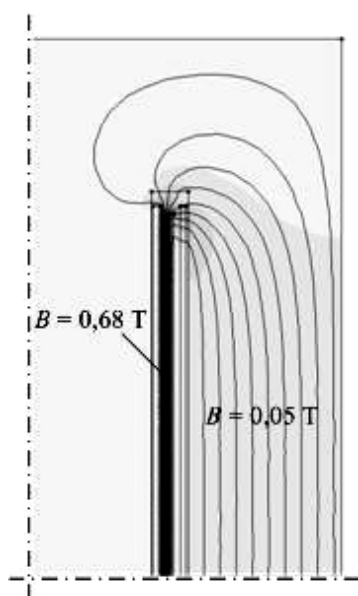


Рис. 4. Розподіл магнітного поля при втраті надпровідності додатковим екраном

При втраті надпровідності додатковим екраном магнітний потік проходить вздовж ділянки, що належить вікну секції магнітопроводу і утворює потокозчеплення, але це недостатнє для забезпечення обмеження струму короткого замикання. З наступною втратою надпровідності основним екраном після втрати надпровідності додатковим буде налічувати інерційна складова та поля розсіяння. Розподіл магнітної індукції B вздовж ділянки від зовнішньої стінки основного надпровідного екрана до внутрішньої стінки додаткового екрана, що втратив надпровідні властивості, подано на графіку рис. 5.

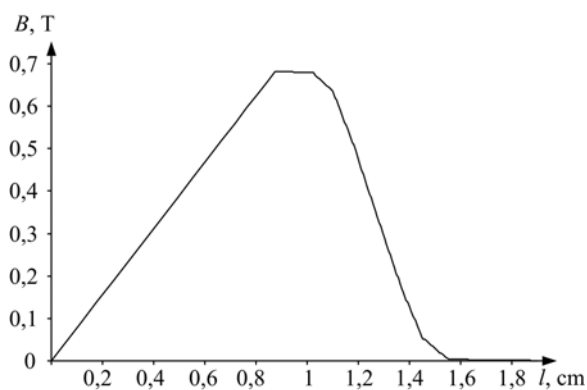


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції між екранами

При цьому магнітна індукція набуває найбільшого значення у середній частині секції надпровідної обмотки.

Так у випадку втрати надпровідності основним екраном за умови $I_{cr2} = 3I_n$, тобто критичні параметри основного екрана мають бути нижчі чим для додаткового екрана $H_{cr1}(I_{cr1}) < H_{cr2}(I_{cr2})$. Магнітний потік розсіяння розпорозується у вікні магнітопроводу, але проникає тільки у середній стержень осердя магнітопроводу, окрім крайніх (віссиметрія). Розрахунок розподілу магнітного поля подано на рис. 6, індуктивність обмотки у цьому випадку складає $L = 0,24$ мГн.

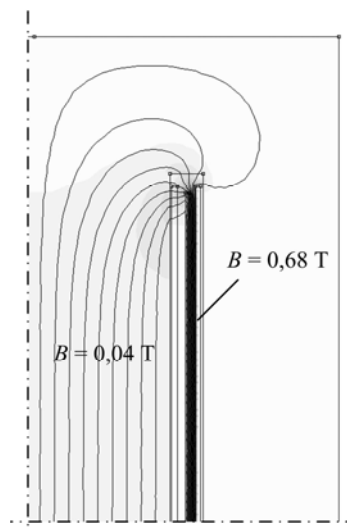


Рис. 6. Розподіл магнітного поля при втраті надпровідності основним екраном

Розподіл магнітної індукції у ділянці між екранами буде аналогічним, з тією різницею, що магнітний потік розсіяння оминає обмотку зовні по крайньому стержню.

При досяганні струмом у обмотці критичного значення відповідного для основного та додаткового екранів $I_{cr1} = I_{cr2} = 3I_n$, відбудеться одночасно втрата їх надпровідності. Магнітний потік відразу проникає у середній стержень осердя магнітопроводу, збільшується індуктивність, що забезпечує обмеження струму та збільшує постійну часу наростання струму, що в цілому сприятиме спрацюванню вимикача. Перехідний процес буде відбуватися у два етапи. У такому випадку математична модель перехідного процесу визначається рівняннями [15]:

$$\left\{ \begin{aligned} i_{cr1}(t) &= \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{CL1}) + \\ &+ \left[I_{nm} \sin(\psi_u - \varphi_L) - \frac{U_{nm}}{Z_{CL1}} \sin(\psi_u - \varphi_{CL1}) \right] e^{-\frac{R_{CL1}}{L_{CL1}} t}; \\ i_{cr2}(t) &= \frac{U_{nm}}{Z_{CL2}} \sin[\omega(t + t_{cr1}) + \psi_u - \varphi_{CL2}] + \\ &+ \left[k_{i1} I_{nm} - \frac{U_{nm}}{Z_{CL2}} \sin(\omega t_{cr1} + \psi_u - \varphi_{CL2}) \right] e^{-\frac{R_{CL2}}{L_{CL2}} t}; \end{aligned} \right.$$

де $R_{CL1} = R_{CL2} = P_0 / I_n^2$ – резистивний опір обмотки; P_0 – втрати потужності обмотки;

$L_{CL1} = \mu_0 n^2 w \frac{b_w}{a_w} \pi r_c$, $L_{CL2} = \frac{w B_c \pi r_c^2}{k_{i1} I_{nm}}$ – індуктивність

обмежувача струму першого і другого етапу; w – число витків обмотки; a_w – ширина плівкового проводу; b_w – товщина плівкового проводу; r_c – радіус перерізу осердя магнітопроводу; B_c – індукція магнітного потоку осердя; t_{cr1} – час закінчення першого етапу перехідного процесу;

$Z_{CL1} = \sqrt{R_{CL1}^2 + (\omega L_{CL1})^2}$, $Z_{CL2} = \sqrt{R_{CL2}^2 + (\omega L_{CL2})^2}$ – повний опір обмежувача

струму першого і другого етапу; $\varphi_{CL1} = \arctg \frac{\omega L_{CL1}}{R_{CL1}}$,

$\varphi_{CL2} = \arctg \frac{\omega L_{CL2}}{R_{CL2}}$ – фазовий кут обмежувача струму першого і другого етапу; $k_{i1} = 2,5-3$ – коефіцієнт перевищення струму.

Висновки. Використання додаткового надпровідного екрана у індуктивному обмежувачі струму забезпечує екранування магнітних полів розсіяння, завдяки чому зменшуються припливи тепла та потужність втрат в номінальному режимі, хоча використання додаткового надпровідного екрана незначно збільшує масу осердя магнітопроводу.

Аналіз розподілу магнітного поля показує, що варіант спрацювання обмежувача струму в момент короткого замикання більш прийнятний при першочерговій втраті надпровідності основним екраном, для чого доцільно для нього використовувати матеріал з нижчими критичними параметрами, наприклад, вісмутову кераміку, а для додаткового екрану використовувати ітрієву кераміку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Leung E.M. Superconducting fault current limiters // *IEEE Power Engineering Review*. – 2000. – vol.20. – no.8. – pp. 15-18. doi: 10.1109/39.857449.
2. Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Braun D., Lanz W. Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications // *Physica C: Superconductivity*. – 2001. – vol.354. – no.1-4. – pp. 27-33. doi: 10.1016/S0921-4534(01)00018-1.
3. Bock J., Breuer F., Walter H., Elschner S., Kleimaier M., Kreutz R., Noe M. CURL 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-

BSSCO 2212 // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2005. – vol.15. – no.2. – pp. 1955-1960. doi: 10.1109/tasc.2005.849344.

4. Elschner S., Breuer F., Noe M., Rettelbach T., Walter H., Bock J. Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2003. – vol.13. – no.2. – pp. 1980-1983. doi: 10.1109/tasc.2003.812954.

5. Joo M. Reduction of fault current peak in an inductive high-Tc superconducting fault current limiter // *Cryogenics*. – 2005. – vol.45. – no.5. – pp. 343-347. doi: 10.1016/j.cryogenics.2004.11.007.

6. Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Widenhorn L., Guérig A. Test of 1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter // *Superconductor Science and Technology*. – 1997. – vol.10. – no.12. – pp. 914-918. doi: 10.1007/978-4-431-66879-4_292.

7. Пат. 112671 Україна, МПК H02H 9/00. Струмообмежуючий реактор з надпровідним комбінованим екраном / Гончаров Є.В. – № u 201606722; заявл. 21.06.16; опубл. 26.12.16, Бюл. № 24. – 4 с.: 1 іл.

8. Гончаров Є.В. Удосконалення екранування надпровідного індуктивно-резистивного струмообмежувача // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природо-користування: Матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 14-18 листопада. – Київ: НУБіП – 2016. – С. 107-108.

9. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Аналіз роботи високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2007. – №6/5(30). – С. 45-48.

10. Гончаров Є.В. Еквівалентна магнітна проникність надпровідникової обмотки // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – №1. – С. 11-13. doi: 10.20998/2074-272X.2010.1.03.

11. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Calculating the parameters of an inductive short-circuit current limiter with a superconducting shield // *Russian Electrical Engineering*. – 2013. – vol.84. – no.9. – pp. 478-481. doi: 10.3103/s1068371213090046.

12. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. Режим доступа: www.femm.info/wiki/OldVersions.

13. Dan'ko V.G., Goncharov E.V., Polyakov I.V. Analysis of energy efficiency of a superconducting short circuit current limiter // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – vol.6. – no.5(84). – pp. 4-12. doi: 10.15587/1729-4061.2016.84169.

14. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2016. – №32(1204). – С. 3-7.

15. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Особливості роботи надпровідного обмежувача струму при раптовому КЗ // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №6. – С. 30-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.6.04.

REFERENCES

1. Leung E.M. Superconducting fault current limiters. *IEEE Power Engineering Review*, 2000, vol.20, no.8, pp. 15-18. doi: 10.1109/39.857449.
2. Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Braun D., Lanz W. Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications. *Physica C: Superconductivity*, 2001, vol.354, no.1-4, pp. 27-33. doi: 10.1016/S0921-4534(01)00018-1.
3. Bock J., Breuer F., Walter H., Elschner S., Kleimaier M., Kreutz R., Noe M. CURL 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSSCO 2212. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, vol.15, no.2, pp. 1955-1960. doi: 10.1109/tasc.2005.849344.
4. Elschner S., Breuer F., Noe M., Rettelbach T., Walter H., Bock J. Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for

- a 10 MVA fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, vol.13, no.2, pp. 1980-1983. doi: **10.1109/tasc.2003.812954**.
5. Joo M. Reduction of fault current peak in an inductive high-T_c superconducting fault current limiter. *Cryogenics*, 2005, vol.45, no.5, pp. 343-347. doi: **10.1016/j.cryogenics.2004.11.007**.
6. Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Widenhorn L., Guérig A. Test of 1.2 MVA high-T_c superconducting fault current limiter. *Superconductor Science and Technology*, 1997, vol.10, no.12, pp. 914-918. doi: **10.1007/978-4-431-66879-4_292**.
7. Goncharov E.V. *Strumoobmezhuyuchy reaktor z nadprovidnym kombinovanim ekranom* [Superconducting current-limiting reactor combined screen]. Patent UA, no. 112671, 2016. (Ukr).
8. Goncharov E.V. Improving shielding of superconducting inductively resistive short-circuit current limiter. *Materialy nauk.-tekhn. konf «Problemy suchasnoi enerhetyky i avtomatyky v systemi pryrodokorystuvannia»*. [Abstracts of Sci.-Techn. Conf. «Problems of modern energy and automation system of nature»]. Kyiv, 14-18 November 2016, pp. 107-108. (Ukr).
9. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Analysis of high-temperature superconducting short-circuit current limiter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2007, vol.6/5(30), pp. 45-48. (Ukr).
10. Goncharov E.V. Equivalent magnetic permeability of superconducting winding. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.1, pp. 11-13. (Ukr). doi: **10.20998/2074-272X.2010.1.03**.
11. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Calculating the parameters of an inductive short-circuit current limiter with a superconducting shield. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol.84, no.9, pp. 478-481. doi: **10.3103/s1068371213090046**.
12. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable*. Available at: www.femm.info/wiki/OldVersions (accessed 10 March 2014).
13. Dan'ko V.G., Goncharov E.V., Polyakov I.V. Analysis of energy efficiency of a superconducting short circuit current limiter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol.6, no.5(84), pp. 4-12. doi: **10.15587/1729-4061.2016.84169**.
14. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2016, no.32(1204), pp. 3-7.
15. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Features of operation of a superconducting current limiter at the sudden short circuit. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.6, pp. 30-33. (Ukr). doi: **10.20998/2074-272X.2014.6.04**.

Надійшло (received) 02.06.2017

Данько Володимир Григорович¹, д.т.н., проф.,
Гончаров Євген Вікторович¹, к.т.н.,
Поляков Ігор Володимирович¹, к.т.н., доц.,
¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
тел/phone +38 057 7076427,
e-mail: e.goncharov.v@gmail.com

V.G. Dan'ko¹, E.V. Goncharov¹, I.V. Poliakov¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
Analysis of the operation peculiarities of the superconducting inductive current limiter with additional superconducting screen.

Purpose. The inductances of magnetic system of a current limiter for the nominal operating mode were determined. The aspects of functioning and a design of a superconducting short-circuit current limiter of inductive type with a superconductive main and additional screens, and superconductive winding, which are placed in a general cryostat on a ferromagnetic core, which ensures an improvement of magnetic field dissipation and in energy efficiency are observed. **Methodology.** The analysis of distribution of magnetic field of the short-circuit current limiter of inductive type with superconducting high-temperature coil and superconducting main and additional screens, using mathematical modeling by the finite element method in math software package FEMM for different modes of operation is carried out. **Results.** The calculations of magnetic field dissipation in operational modes are carried out. **Originality.** The investigations aimed to analyze the influence of distribution of the magnetic field in inductive short-circuit current limiter with superconducting additional screen on its operation modes. First calculation of the distribution of magnetic fields in different modes of operation for the short-circuit current limiter in the area between high-temperature superconducting screens. **Practical value.** The advantage of additional screen of superconducting short-circuit current limiter is to improve screening from dissipation of the magnetic fields of the magnetic system and reducing the power losses at nominal mode. Using the proposed methodology will identify options acceptable to the current limiter mode of operation. References 15, tables 3, figures 6.

Key words: current limiter, high-temperature superconductor, superconducting screen, inductance, magnetic field, ferromagnetic core.

РЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОНДЕНСАТОРАМИ В КОЛІ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

Розглядається проблема появи резонансу під час асинхронного пуску явнополюсних синхронних двигунів, в яких для підвищення електромагнітного моменту в коло обмотки збудження увімкнено конденсатори. Для розрахунку пускових статичних характеристик та дослідження впливу величини ємності конденсаторів на перебіг пуску двигуна, зокрема появу резонансу, використовується математична модель синхронного двигуна явнополюсної конструкції високою рівня адекватності, в якій враховується насичення магнітопроводу. Асинхронний режим описується системою диференціальних рівнянь електричної рівноваги, записаної в ортогональних координатних осях з урахуванням наявності конденсаторів в обмотці збудження. Електромагнітні параметри контурів визначаються на основі розрахунку розгалуженої заступної схеми магнітного кола двигуна. В основу розробленого алгоритму покладено заснований на апроксимації кубічними сплайнами проєкційний метод розв'язування крайових задач розрахунку ustalених періодичних режимів і диференціальний метод розрахунку статичних характеристик. Бібл. 8, рис. 2.

Ключові слова: явнополюсний синхронний двигун, конденсатори, обмотка збудження, резонанс, статичні характеристики.

Рассматривается проблема возникновения резонанса во время асинхронного пуска явнополюсных синхронных двигателей, в которых для повышения электромагнитного момента в цепь обмотки возбуждения включены конденсаторы. Для расчета пусковых статических характеристик и исследования влияния величины емкости конденсаторов на протекание пуска двигателя, в частности появления резонанса, используется математическая модель синхронного двигателя явнополюсной конструкции высокого уровня адекватности, в которой учитывается насыщение магнитопровода. Асинхронный режим описывается системой дифференциальных уравнений электрического равновесия, составленной в ортогональных координатных осях с учетом наличия конденсаторов в обмотке возбуждения. Электромагнитные параметры контуров определяются путем расчета разветвленной схемы замещения магнитной цепи двигателя. В основу разработанного алгоритма положен основанный на аппроксимации кубическими сплайнами проекционный метод решения краевых задач расчета установившихся периодических режимов и дифференциальный метод расчета статических характеристик. Библ. 8, рис. 2.

Ключевые слова: явнополюсний синхронний двигател, конденсаторы, обмотка возбуждения, резонанс, статические характеристики.

Вступ. Незважаючи на вищу від асинхронних двигунів вартість і складність у виготовленні, синхронні двигуни застосовуються в електроприводах великої потужності, особливо там, де потрібні невисокі швидкості обертання. Проблема пуску синхронних двигунів, які працюють в потужних електроприводах, є однією з основних. Суть її полягає в забезпеченні необхідного пускового моменту, який зумовлений умовами роботи приводу. Вони виготовляються здебільшого з явновираженими полюсами, на яких розміщена обмотка збудження. Для виходу на синхронний режим ротор двигуна необхідно розігнати до близької до синхронної швидкості обертання, після чого подати в обмотку збудження постійний струм, ротор стане електромагнітом і увійде в синхронізм.

Серед відомих способів пуску найчастіше використовується асинхронний пуск, як простий і надійний, який здійснюється шляхом безпосереднього вмикання в мережу з номінальною напругою. Для асинхронного пуску в кожний полюс явнополюсного синхронного двигуна (ЯСД) вставляють мідні або латунні стержні, які з торців з'єднують короткозамикаючими кільцями. В результаті отримуємо пускову обмотку, яка є аналогом короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна, і дає змогу здійснити розгін двигуна до підсинхронної швидкості. Ця обмотка одночасно виконує роль демпфера і гасить випадкові коливання. Оскільки в міжполюсному проміжку стержні відсутні, то вона несиметрична, внаслідок чого розподіл магнітної індукції у повітряному про-

міжку відрізняється від синусоїдного, а електромагнітний момент в ustalеному асинхронному режимі має постійну та змінну складові. Крім того, на процеси в ЯСД впливає насичення магнітопроводу.

Під час асинхронного пуску обмотку збудження зазвичай закорочують на резистивний опір значенням 5-10 Ом, і вона практично не бере участі у створенні електромагнітного моменту. Поза тим, у разі пуску ЯСД під навантаженням електромагнітний момент, який створює пускова обмотка ротора в асинхронному режимі, недостатній для успішного запуску, тому використовують різні засоби, спрямовані на його підвищення. Одним із шляхів вирішення проблеми є використання обмотки збудження. Проте вона має значну індуктивність, а тому змінний струм, який в ній протікає в пусковому режимі, має індуктивний характер і не може створити суттєвого додаткового моменту. Компенсувати індуктивний опір обмотки збудження можна вмиканням послідовно конденсаторів [6, 7], однак пуск ЯСД з конденсаторами в обмотці збудження потребує всебічного дослідження, оскільки невдалий вибір значення їх ємності може призвести до зниження пускового електромагнітного моменту [2, 5]. Крім того, наявність конденсаторів в обмотці збудження може призвести до виникнення явища резонансу напруг, що є небезпечним як для обмотки збудження, так і для двигуна в цілому з причини зумовлених резонансом недопустимо великих струмів та електромагнітного моменту. Отже проблема

дослідження процесів, які виникають в синхронних електроприводах у разі вмикання в обмотку збудження конденсаторів, має важливе практичне значення.

Спосіб підвищення пускового електромагнітного моменту шляхом вмикання в обмотку збудження ЯСД конденсаторів відомий в літературі давно, однак проблема математичного моделювання процесів, якими супроводжується їх асинхронний пуск, залишається не вирішеною до цих пір. В основному це зумовлено тим, що дослідження процесів, які протікають при такому способі пуску, проводились на спрощених математичних моделях, в основу яких покладено класичні заступні схеми двигуна [6, 7], що апіорі потребує експериментальної перевірки. Проте, експерименти на ЯСД великої потужності надто коштовні, а деякі з них з технічних причин неможливо здійснити. Уточнення розрахунків на основі використання ланцюгових багатоконтурних заступних схем [1] не є універсальним, оскільки прив'язаний до конкретного електроприводу, а тому не вирішує проблеми адекватності результатів розрахунку. Отже методи аналізу, які мають в своїй основі як класичні, так і удосконалені заступні схеми АД не забезпечують достовірності визначення параметрів в динамічних режимах, а похибки у параметрах можуть призвести до неправильних результатів.

Як відомо, умова резонансу визначається параметрами електричного кола, зокрема обмотки збудження, яка працює не ізольовано, а в системі складних електромагнітних зв'язків з іншими контурами двигуна, які здійснюють взаємні переміщення. Тому проблема вибору ємності пускових конденсаторів для вмикання в обмотку збудження потребує розрахунку цих параметрів з високою достовірністю, що можна здійснити лише з використанням розвинутих математичних моделей ЯСД, які забезпечують високу достовірність результатів математичного експерименту, незалежно від типу двигуна, його габаритів та параметрів.

Метою роботи є розроблення математичної моделі, яка дає можливість виявляти і досліджувати резонансні режими під час пуску ЯСД з конденсаторами в контурі обмотки збудження.

Алгоритм розв'язування задачі. Розглянемо ЯСД, обмотка статора якого живиться від трифазної мережі, на роторі розміщена пускова обмотка та обмотка збудження, яка на час асинхронного пуску закорочена на конденсатори. Процеси розглядаються в координатних осях d, q , причому реальна обмотка ротора еквівалентується двома контурами за загальноприйнятою методикою. В результаті електрична схема ЯСД має три контури (d, f, D) по поздовжній осі і два (q, Q) – по поперечній, між якими внаслідок насичення магнітопроводу існують взаємоіндуктивні зв'язки.

Електромагнітні процеси в ЯСД у разі замикання однофазної обмотки збудження на конденсатори ємністю C описуються нелінійною системою диференціальних рівнянь (ДР) електромагнітної рівноваги контурів, яка описує асинхронний режим в осях d, q

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= -\omega_0(1-s)\psi_d - r_i i_d + u_d; \\ \frac{d\psi_D}{dt} &= -r_D i_D; \\ \frac{d\psi_Q}{dt} &= -r_Q i_Q; \\ \frac{d\psi_f}{dt} &= -r_f i_f + u_k; \\ \frac{du_k}{dt} &= \frac{i_f}{C}, \end{aligned} \quad (1)$$

де індексами D та Q позначено величини, що стосуються еквівалентних контурів пускової обмотки; $\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q, \psi_f, i_d, i_q, i_D, i_Q, i_f$ – потокозчеплення та струми еквівалентних контурів; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$; ω_0, ω – частота напруги живлення обмотки статора та кутова частота (c^{-1}) обертання ротора; $u_d = U_m \sin \theta$, $u_q = U_m \cos \theta$, θ – кут вибігу ротора, U_m – амплітудне значення фазної напруги статора, u_k – напруга на конденсаторі в колі обмотки збудження.

Внаслідок періодичної зміни кута θ в усталеному асинхронному режимі ЯСД з ковзанням ротора $s = s_0$ потокозчеплення, струми, напруга на конденсаторах обмотки збудження змінюються за періодичним законом з періодом

$$T_a = 2\pi / (s\omega_0).$$

Отже задача розрахунку стаціонарного режиму при постійному ковзанні полягає у визначенні цих періодичних залежностей. Як відомо [3, 8], її можна розв'язати з мінімальним обсягом обчислень шляхом розв'язування крайової задачі з періодичними крайовими умовами.

З метою скорочення викладення алгоритму розрахунку періодичних залежностей координат режиму на періоді T_a запишемо систему ДР (1), одним векторним рівнянням

$$\frac{d\vec{y}}{dx} = \vec{z}(\vec{x}, \vec{y}, \vec{u}), \quad (2)$$

де відповідні вектори мають такий зміст:

$$\vec{y} = \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_D \\ \psi_Q \\ \psi_f \\ u_k \end{pmatrix}; \quad \vec{x} = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_D \\ i_Q \\ i_f \\ u_k \end{pmatrix}; \quad \vec{u} = \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} u_d + \omega_0(1-s)\psi_q - r_i i_d \\ u_q - \omega_0(1-s)\psi_d - r_i i_q \\ -r_D i_D \\ -r_Q i_Q \\ u_k - r_f i_f \\ i_f / C \end{pmatrix}.$$

Здійснивши апроксимацію координат рівняння (2), яким описується усталений асинхронний режим ЯСД, на сітці $n+1$ вузлів періоду T_a сплайнами третього порядку у відповідності з викладеним в [3]

з кроком $h = T_a/n = 2\pi/(s\omega_0 n)$, отримаємо алгебричний аналог ДР (2) $m = 6$ -го порядку у вигляді нелінійного алгебричного рівняння nm -го порядку

$$H\vec{Y} - D\vec{Z} = 0, \quad (3)$$

де $\vec{Y} = (y_1, \dots, y_n)^*$; $\vec{Z} = (z_1, \dots, z_n)^*$; H, D – матриці переходу від неперервної зміни координат до їх дискретних (вузлових) значень, елементи яких визначаються апроксимацією періодичних залежностей координат кубічними сплайнами [3].

Алгебричне рівняння (3) є дискретним аналогом нелінійної системи ДР (2). Її розв'язком є значення вектора

$$\vec{X} = (x_1, \dots, x_n)^*,$$

$$\vec{x} = (i_{dj}, i_{qj}, i_{Dj}, i_{Qj}, i_{fj}, u_{kj})^* \quad j = 1, \dots, n.$$

До системи (3) входять значення координат, які відповідають фіксованим значенням часової координати t у вузлах періоду, залежності між якими в кожний момент часу нелінійні. Для розв'язування нелінійної алгебричної системи (3) застосовується метод продовження по параметру в поєднанні з ітераційним методом Ньютона. Вимушуючою силою (збудженням) в рівнянні (3) є вектор $\vec{U} = (u_1, \dots, u_n)^*$ дискретних значень прикладених напруг, де

$$\vec{u}_j = (\sqrt{2}U \sin \theta_j, \sqrt{2}U \cos \theta_j, 0, 0, 0, 0)^*,$$

нарощуючи який від нуля до заданого значення, отримуємо значення векторів \vec{Y} та \vec{X} , які відповідають заданому значенню ковзання $s = s_0$.

Дослідження впливу величини C ємності конденсаторів на усталений асинхронний режим здійснюється диференціальним методом. Для цього систему (3) диференціюємо по C . У результаті отримаємо ДР аргументу C вигляду

$$W \frac{\partial \vec{X}}{\partial C} = D\vec{U}, \quad (4)$$

де W – матриця Якобі системи (3).

Для отримання багатовимірної статичної характеристики як залежності вузлових значень координат

режиму роботи ЯСД від C необхідно систему ДР (4) проінтегрувати числовим методом [3, 8]. На кожному крокові інтегрування вектор похідних $\frac{\partial \vec{X}}{\partial C}$ визначається шляхом розв'язування рівняння (4), що дає змогу звести її числовим методом до форми Коші. Елементами блоків матриці Якобі є диференціальні індуктивні опори контурів двигуна, які визначаються шляхом розрахунку магнітного кола ЯСД згідно з прийнятою моделлю [8]. Основою їх розрахунку є визначення кривої магнітного поля в повітряному проміжку двигуна методами теорії кіл, що дає змогу визначити потокозчеплення контурів, які входять до вектора нев'язок і залежать від сукупності струмів усіх контурів двигуна.

Приклади виконаних за викладеним вище алгоритмом результатів розрахунку періодичних процесів в усталеному асинхронному режимі та пускових статичних характеристик за умови закорочення обмотки збудження на конденсатори для двигуна СДНЗ-2-19-49-24 ($P = 1600$ кВт, $U_l = 600$ В, $I = 180$ А; $I_z = 230$ А; $2p=24$) наведені на рис. 1, *a, b* та 2, *a-f*.

Із зображених на рис. 1 залежностей електромагнітного моменту та діючого значення струму статора від величини ємності конденсатора в обмотці збудження ЯСД при ковзанні $s = 1$ видно, що при $C = 50$ мкФ виникає резонансний режим, в результаті чого момент стає від'ємним, струм набуває недопустимо великого значення і пуск двигуна стає неможливим. Поза тим, ЯСД має задовільні пускові властивості при значенні ємності конденсаторів $C = 45$ мкФ. Кратність рушійного електромагнітного моменту стосовно номінального значення за такої ємності складає $M^* = 3,48$. На рис. 2 наведені періодичні залежності електромагнітного моменту, напруги на конденсаторі та струму збудження при двох значеннях ємності конденсаторів: $C = 45$ мкФ і $C = 50$ мкФ, з яких видно, що у разі резонансу ($C = 50$ мкФ) напруга на конденсаторі та струм збудження багатократно перевищують номінальні значення. Крім того, струм обмотки збудження за відсутності резонансу має різко виражену третю гармоніку, яка відсутня в резонансному режимі.

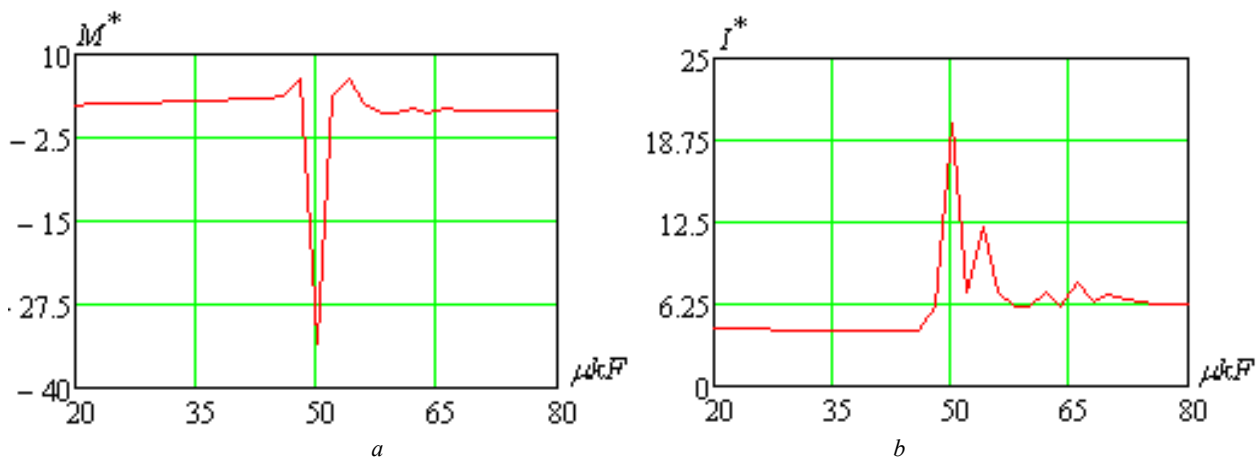


Рис. 1. Залежності рушійного ($s=1$) електромагнітного моменту (*a*) та діючого значення струму якоря (*b*) від величини ємності конденсатора в обмотці збудження двигуна: *a*) $C = 50$ мкФ, *b*) $C = 45$ мкФ

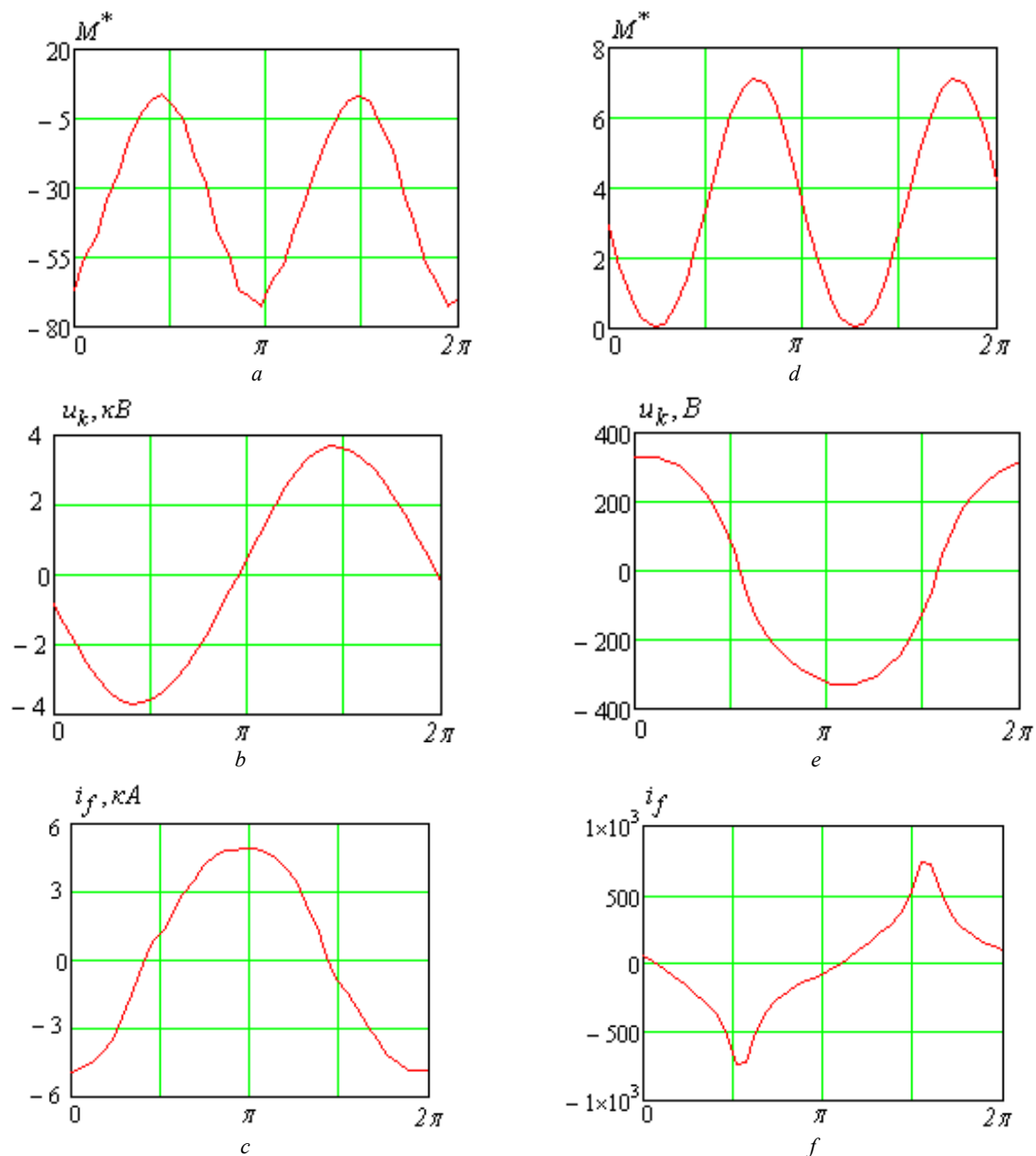


Рис. 2. Періодичні залежності електромагнітного моменту, напруги на конденсаторі та струму збудження при ковзанні $s = 1$ і двох значеннях ємності конденсатора в обмотці збудження $C = 50$ мкФ (a-c) та $C = 45$ мкФ (d-f)

Висновки.

1. За допомогою вмикання конденсаторів в обмотку збудження можна значно підвищити рушійний електромагнітний момент ЯСД. Однак вибір необхідного для покращення пускових властивостей ЯСД значення ємності конденсаторів потребує перевірки поведінки двигуна в пускових режимах, оскільки при цьому може викати резонанс в обмотці збудження, який призводить до непомірного зростання струмів усіх контурів і від'ємного значення пускового моменту, який за абсолютним значенням набагато перевищує номінальне значення, і пуск двигуна стає неможливим.

2. Дослідити роботу ЯСД з конденсаторами в обмотці збудження в асинхронному режимі з високою адекватністю можна лише на основі повної системи ДР, яка описує динамічний режим роботи. Це дає можливість здійснити багатоваріантний аналіз роботи

електроприводу в пускових режимах методами математичного моделювання.

3. Запропонований алгоритм і складена на його основі програма розрахунку усталених режимів і статичних асинхронних характеристик ЯСД в пусковому режимі, дають змогу досліджувати динаміку процесів пуску двигуна з різними значеннями ємності конденсаторів і виявляти можливість виникнення явища резонансу з метою їх запобігання. В основу алгоритму розрахунку покладена математична модель двигуна високого рівня адекватності, в якій враховується нелінійність електромагнітних зв'язків між контурами ЯСД, розподілений уздовж розтки статора характер магнітної індукції в повітряному проміжку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бородай В.А. Рациональні параметри і пускові властивості синхронних двигунів з важкими умовами пуску: авто-

реф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – Львів, 2009. – 19 с.

2. Мальяр В.С., Мадай В.С., Добушовська І.А. Залежність пускового моменту синхронного двигуна від типу та величини опору в обмотці збудження // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 99-101.
3. Мальяр В.С., Мальяр А.В. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств // Электронное моделирование. – 2005. – Т.27. – №3. – С. 39-53.
4. Мальяр В.С., Мальяр А.В., Добушовська І.А. Моделювання асинхронних режимів синхронного двигуна з конденсаторами в колі обмотки збудження // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – С. 31-33. doi: 10.20998/2074-272X.2012.5.06.
5. Мальяр В.С., Мальяр А.В., Добушовська І.А. Статичні характеристики синхронного двигуна з конденсаторами в колі збудження // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1. – С. 57-62.
6. Пивняк Г.Г., Кириченко В.И., Бородай В.А. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных электродвигателей // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2002. – Ч.2. – С. 62-65.
7. Пивняк Г.Г., Кириченко В.И., Бородай В.А., Петров А.Г. Выбор и компоновка внешних конденсаторов синхронных двигателей с обмоткой возбуждения специальной конструкции // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», (Харьков, 2002). – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – С. 171-173.
8. Фильц Р.В., Лябук Н.Н. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин. – Львов: Світ, 1991, – 176 с.

REFERENCES

1. Boroday V.A. *Racional'ni parametry i puskovi vlastyivosti synhronnykh dyvguniv z vazhkyu umovamy pusk.* Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Rational parameters and starting properties of synchronous motors with heavy start conditions. Abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Lviv, 2009. 19 p. (Ukr).
2. Malyar V.S., Mada V.S., Dobushovska I.A. The dependence of a synchronous motor starting torque on the type and value of the resistance in its excitation winding. *Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.3(19), pp. 99-101. (Ukr).
3. Malyar V.S., Malyar A.V. Mathematical modeling of periodic modes of operation of electrical devices. *Electronic Modeling*, 2005, vol.27, no.3, pp. 39-53. (Rus).
4. Malyar V.S., Malyar A.V., Dobushovska I.A. Simulation of asynchronous modes of synchronous motors with capacitors in the excitation circuit. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.5, pp. 31-33. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2012.5.06.
5. Malyar V.S., Malyar A.V., Dobushovska I.A. Static characteristics of synchronous motor with capacitors in excitation circuit. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2012, no.1, pp. 57-62. (Ukr).
6. Pivnyak G.G., Kirichenko V.I., Borodaj V.A. About new direction in improvement large synchronous electric motors. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*. 2002, chapter 2, pp. 62-65. (Rus).
7. Pivnyak G.G., Kyrychenko V.Y., Borodaj V.A., Petrov A.G. Selection and arrangement of external capacitors of synchronous motors with excitation winding of special design. *Materialy mezhd. nauchn.-tekhn. konf. «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika»* [Proceedings of the Int. Sci.-Techn. Conf. «Problems of automated electric drive. Theory and practice»]. Kharkov, 2002, pp. 171-173. (Rus).
8. Filc R.V., Ljabuk N.N. *Matematicheskoe modelirovanie iavnopoliusnykh sinkhronnykh mashin* [Mathematical simulation

of explicitly polarized synchronous machines]. Lvov, Svit Publ., 1991. 176 p. (Rus).

Надійшла (received) 25.05.2017

Мальяр Василь Сафронович¹, д.т.н., проф.,
 Мадай Володимир Степанович¹, к.т.н., доц.,
 Кенс Ігор Романович², к.т.н., доц.,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
 тел/phone +380 32 2582119,
 e-mail: mvs@polynet.lviv.ua, volodymyr.s.madai@lpnu.ua
² Національний лісотехнічний університет України,
 79057, Львів, вул. ген. Чупринки, 103,
 e-mail: ikens@mail.ru

V.S. Malyar¹, V.S. Mada V¹, I.R. Kens²

¹ Lviv Polytechnic National University,

12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

² Ukrainian National Forestry University,

103, Gen. Tchuprynky Str., Lviv, 79057, Ukraine.

Resonant processes in starting modes of synchronous motors with capacitors in the excitation windings circuit.

Purpose. Development of a mathematical model that enables to detect resonance modes during asynchronous startup of salient-pole synchronous motors, in which capacitors are switched on to increase the electromagnetic moment in the circuit of the excitation winding. **Methodology.** The asynchronous mode is described by a system of differential equations of the electric equilibrium of motor circuits written in orthogonal coordinate axes. The basis of the developed algorithm is the mathematical model of the high-level adequacy motor and the projection method for solving the boundary value problem for the equations of the electric equilibrium of the circuits written in orthogonal coordinate axes, taking into account the presence of capacitors in the excitation winding. The coefficients of differential equations are the differential inductances of the motor circuits, which are determined on the basis of the calculation of its magnetic circuit. As a result of the asymmetry of the rotor windings in the asynchronous mode, the current coupling and currents change according to the periodic law. The problem of its definition is solved as a boundary one. **Results.** A mathematical model for studying the asynchronous characteristics of synchronous motors with capacitors in an excitation winding is developed, by means of which it is possible to investigate the influence of the size of the capacity on the motor's starting properties and the resonance processes which may arise in this case. **Scientific novelty.** The developed method of mathematical modeling is based on a fundamentally new mathematical basis for the calculation of stationary dynamic modes of nonlinear electromagnetic circuits, which enables to obtain periodic coordinate dependencies, without resorting to the calculation of the transients. The basis of the developed algorithm is based on the approximation of state variables by cubic splines, the projection method of decomposition for the boundary value problems of the calculation of the established periodic modes and the differential method of calculating static characteristics. **Practical value.** Using the developed algorithm of calculation it is possible to determine the required capacitances of the capacitors in the excitation winding to start the synchronous motor and to investigate the possibility of occurrence of the resonance at startup with the selected capacitance value of the capacitors by calculating the static characteristics as a sequence of asynchronous modes. References 8, figures 2.

Key words: salient-pole synchronous motor, capacitors, excitation winding, resonance, static characteristics.

Ya.B. Volyanskaya, S.M. Volyanskiy, O.A. Onischenko

BRUSHLESS VALVE ELECTRIC DRIVE WITH MINIMUM EQUIPMENT EXCESS FOR AUTONOMOUS FLOATING VEHICLE

Purpose. Development of a brushless valve electric drive with a minimum apparatus excess for an autonomous floating vehicle. Methodology. The construction of models of an automated electric drive with a contactless DC motor and the subsequent technical implementation of such automated electric drive under various control methods are possible using coordinate transformations of differential equations describing the electric motor under the assumed assumptions. Results. The analysis of the current state of an automated electric drive with a brushless DC motor in a special technique is carried out, possible directions for the improvement of automated electric drives are determined. A simple technical solution of an automated electric drive with a brushless DC motor was proposed and its mathematical model for an electric drive of an automatic floating vehicle with improved technical and economic parameters was developed. Model of an automated electric drive with a brushless DC motor are carried out. Originality. A simple technical solution for the construction of an automated electric drive with a brushless DC motor is proposed, which excludes the use of intermediate computation of coordinates and an expensive encoder. Practical value. Model of the proposed scheme of an automated electric drive with a minimum hardware redundancy, which confirmed the operability of the proposed solution, were carried out. Analysis of the dynamic and static characteristics of the proposed scheme of an automated asynchronous electric drive with a brushless DC motor with a simplified rotor position sensor has made it possible to determine the maximum speed control range with an allowable level of its pulsations. References 20, tables 2, figures 7.

Key words: automated electric drive, autonomous floating vehicle, DC brushless motor, Hall sensor, coordinate transformations, encoder.

Предложено простое схмотехническое решение построения автоматизированного электропривода (АЭП) с бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ), отличающееся исключением промежуточных программно-аппаратных преобразований координат, широтно-импульсного модулятора, двух регуляторов тока и высокоразрядного энкодера. Проведено компьютерное моделирование предложенной модификации АЭП с БДПТ и показана его работоспособность в заданных диапазонах регулирования скорости. На основании результатов моделирования АЭП с БДПТ обоснована возможность его применения в автономных плавательных аппаратах. Библ. 20, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, автономный плавательный аппарат, бесконтактный двигатель постоянного тока, датчик Холла, координатные преобразования, энкодер.

Introduction. Currently, in most electromechanical systems of small-sized autonomous floating vehicle (AFV) for various purposes, brush DC electric motors (DCM) are used. Such motors have a significant starting torque, excellent adjusting and dynamic characteristics [1-3], as well as well-developed control systems. Because brush DCM have irreparable defects (frequent maintenance, high mechanical wear, acoustic noise, sparking), more and more utilization in foreign samples of the AFV have contactless DC motors (BLDCM), in other words – *Brushless DC (BLDC) motors* [4-6]. Such electric motors, due to the use of high-coercivity magnets in the excitation system, have the best energy characteristics in comparison with classical DC electric motors and induction electric motors [9, 10]. The adjusting, dynamic and static characteristics of modern automated electric drives (AED) with vector control methods of BLDCM are close to properties of AED based on high-frequency pulse-width modulation (PWM) with a brush DCM of independent excitation.

AED with BLDCM foreign production (Japan, USA, Western Europe) are widely used in domestic aviation, medicine, various industries. It should be noted that the majority of mass-produced foreign AED based on BLDCM are oriented to complex applications. These are, for example, high-precision tracking devices, numerical control machines, electromechanical systems where a very high speed control range, precise positioning or

tracking modes are required. That is why such AEDs have very high selling prices. Thus, the AED of the *Mitsubishi Electric Company MR-C10A-UE*, 100W, 3000 rpm with the speed control range $D = 1000$ in the middle of 2016 was released in Ukraine at a price of almost USD 600 (approximately USD 400 – a system unit, USD 200 – BLDCM with a built-in high-speed encoder). Such solutions of the leading manufacturers of electrical equipment (*Mitsubishi, Danfoss, ABB* and others) have very high functional and technological properties, developed self-diagnostics and protection systems, management capabilities over the local network and have many other additional service functions. Despite the relatively high cost of the BLDCM, such parameters as reliability, a high value of the design coefficient C_m , speed and low-speed reception allow us to consider very promising application of AED with BLDCM in special marine technology [7, 8] of domestic production, for example, in experimental samples of the AFV type «Hydrograph», Nikolaev (Table 1). If you analyze the basic requirements for AED for devices of a similar type, you can see that to provide the basic functions of the AFV, it is enough to have a range of speed control $D = 3 \dots 15$ with the accuracy of maintaining it at the lower control ranges of up to 10 %. At the same time, there is no need for most internal protections, interfaces, a high-resolution encoder is not needed.

© Ya.B. Volyanskaya, S.M. Volyanskiy, O.A. Onischenko

In Ukraine, automated electric drives with BLDCM are only beginning to be manufactured (LLC «Electrical Engineering – New Technologies», Odessa), and their circuitry base has not been fully worked out yet. Since specialized AFVs, as dual-purpose devices, are in high demand, and since there are no mass production of such devices in Ukraine, the creation of an AFV with simple and functional electromechanical systems based on the BLDCM based on the domestic industrial base is an important and urgent scientific and technical task.

Table 1

Some characteristics
of the experimental AFV «Hydrograph» (Nikolaev)

No.	Indicator	Value
1	Mass of the device	65 kg
2	Propulsion motors power, design	2×250 W, baro-unloaded
3	Working speed range of the device	0.25...2 m/s
4	Hydropropulsion complex	Direct transmission
5	Diameter of screws in the nozzle	250 mm
6	Performance with a step change in the set speed	3 s
7	The accuracy of maintaining the speed of horizontal rectilinear displacement on the lower characteristic of the range	0.05 m/s
8	Maximum speed overshoot	20 %

The goal of the paper is development of a contactless valve electric drive with a minimum hardware excess for an autonomous floating device.

Main material. It is generally known that the BLDCM is a synchronous AC motor whose stator windings are powered by a frequency converter that switches the phase currents as a function of the angular position of the rotor with an envelope frequency equal to the number of poles of the rotor multiplied by the angular rotational speed of the rotor. For operation of the AED based on the BLDCM in a wide range of speed control a high-quality (1000 or more pulses per revolution) rotor position sensors (RPS, encoders) are needed and therefore expensive ones are used [11, 12].

Simpler AED with BLDCM use scalar control methods and, often, experimental BLDCM samples are produced on the basis of serial induction motors, replacing the short-circuited rotor with a rotor with permanent high-coercivity magnets, using the simplest rotor position sensors – based on Hall effects, photoelectric or induction effects [13].

Traditionally, the development and research of the majority of modern AED are carried out with the help of coordinate transformations (KT). It is known that KT of variables are valid if the basic assumptions for the generalized electric machine are fulfilled: the sinusoidal distribution of the MMF of the stator winding with sinusoidal feeding of the symmetrically distributed stator and rotor windings. Therefore, to apply KT for investigations of AED with BLDCM and scalar control,

there are no formal conditions: relatively simple BLDCMs are created with lumped windings and, since the stator windings are powered from a rectangular-shaped voltage source, their MMF is close to rectangular.

In order to increase the competitiveness of the built-in electromechanical control systems of the AFV created on the domestic element base, the authors carried out investigations [14-16], which, as a result, allowed to abandon the vector control method of the BLDCM [17, 18]. Naturally, the use of RPS with a low number of pulses per revolution [13] leads to a significant reduction in the range of speed control and an increase in the pulsations of the electromagnetic torque. Taking into account the inertial nature of the load of the propulsion complex [19, 20] of the AFV and its «fan» nature, and also the not very high requirements for the range and accuracy of maintaining the speed, according to modern hardware capabilities, it can be assumed that there are reserves for simplifying the circuit design basis for constructing the AED with BLDCM for AFV.

Since in BLDCM, applied in experimental AFV samples, the windings are symmetrically located on the stator, then under the rectangular form of the supply voltage, it is possible to determine the main voltage harmonics and MMF. Since the assumptions adopted in the model of a generalized electric machine are satisfied for the first harmonics, then subsequently further coordinate transformations are also valid, and the main properties and characteristics of the BLDCM with scalar control can be identified on the basis of two-phase models.

The indicated approach is often used, for example, in the analysis of the operation of induction electric motors (IM) powered by frequency converters (FC). Note that if the symmetry conditions for an electrical machine are made constructively and its power is supplied from a non-sinusoidal source, then the application of coordinate transformations of variables will be adequate to real physical processes only for quasi-steady dynamic modes. In such modes, the speed and the electromagnetic torque oscillate about the mean values, while the amplitude, frequency, and shape of the oscillations of the variables will be different for the two- and three-phase descriptions of the AED.

Thus, the construction of models of AED with BLDCM and the subsequent technical realization of such AED under different control methods are possible using coordinate transformations of differential equations describing the electric motor under the assumed assumptions. It is clear that the technical implementation of the AED should be justified by comparing the operation modes of the BLDCM with various control methods to the characteristic reactive static load, which for the AFVPA is a fan type.

In the rotating coordinate system $d-q$, the coordinate transformations for the equivalent voltages of the symmetrical winding of the BLDCM stator are related to the phase voltages by the two systems of equations – (1) and (2). When changing from a three-phase to a two-phase coordinate system $\{3/2\}$, the following is valid:

$$\left. \begin{aligned} u_d(\tau) &= \frac{2}{3} [U_a(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau) + U_b(\tau) \times \\ &\times \sin(\omega_c \cdot \tau - \frac{2\pi}{3}) + U_c(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau + \frac{2\pi}{3})]; \\ u_q(\tau) &= \frac{2}{3} [U_a(\tau) \cdot \cos(\omega_c \cdot \tau) + U_b(\tau) \times \\ &\times \cos(\omega_c \cdot \tau - \frac{2\pi}{3}) + U_c(\tau) \cdot \cos(\omega_c \cdot \tau + \frac{2\pi}{3})]; \\ u_0(\tau) &= \frac{1}{3} [U_a(\tau) + U_b(\tau) + U_c(\tau)], \end{aligned} \right\} (1)$$

and when changing from a two-phase to a three-phase coordinate system $\{2/3\}$:

$$\left. \begin{aligned} U_a(\tau) &= u_d(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau) + u_q(\tau) \times \\ &\times \cos(\omega_c \cdot \tau) + u_0(\tau); \\ U_b(\tau) &= u_d(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau - \frac{2\pi}{3}) + \\ &+ u_q(\tau) \cdot \cos(\omega_c \cdot \tau - \frac{2\pi}{3}) + u_0(\tau); \\ U_c(\tau) &= u_d(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau + \frac{2\pi}{3}) + \\ &+ u_q(\tau) \cdot \cos(\omega_c \cdot \tau + \frac{2\pi}{3}) + u_0(\tau), \end{aligned} \right\} (2)$$

where $U_a(\tau)$, $U_b(\tau)$ and $U_c(\tau)$ are the phase voltages of the three-phase system; $u_d(\tau)$ and $u_q(\tau)$ are the projections of the phase voltages on the axes of the rotating with frequency ω_c coordinate system $d-q$; $u_0(\tau)$ is the vector of the zero sequence equal to zero at zero initial conditions and the stator winding symmetry; $\Theta = \omega_c \cdot \tau$ is the angular position of the vector in the coordinate system $d-q$. We emphasize that for other variables of the BLDCM (currents, MMF), the coordinate transformations $\{3/2\}$ and $\{2/3\}$ are valid.

In the case of vector single-zone control of the BLDCM, in the most general case, the projections of the phase voltages $u_d(\tau)$ and $u_q(\tau)$ are formed by the signals of the high-order RPS in the function of given from the external source along the corresponding coordinate axes voltages. This formation is carried out, for example, by means of a sinusoidal-cosine rotating transformer (SCRT)

having a small proper delay time τ_n , with the geometric angle of the RPS setting is oriented along the d axis. Then:

$$\left. \begin{aligned} u'_d(\tau) &= u_d(\tau) \cdot \cos(\omega_c \cdot \tau_n) - u_q(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau_n); \\ u'_q(\tau) &= u_q(\tau) \cdot \cos(\omega_c \cdot \tau_n) + u_d(\tau) \cdot \sin(\omega_c \cdot \tau_n). \end{aligned} \right\} (3)$$

We write the equations of the BLDCM in the coordinate system $d-q$, tied to the rotational angular frequency of the rotor.

Equations of electrical equilibrium in the operator form:

$$\left. \begin{aligned} u_d(s) &= R_s \cdot i_d(s) + L_d \cdot s \cdot i_d(s) - \omega_c(s) \times \\ &\times L_q \cdot i_q(s); \\ u_q(s) &= R_s \cdot i_q(s) + L_q \cdot s \cdot i_q(s) + \omega_c(s) \times \\ &\times L_d \cdot i_d(s) + \omega_c(s) \cdot \psi_e(s), \end{aligned} \right\} (4)$$

where R_s is the stator phase resistance; $i_d(s)$, $i_q(s)$ и L_d , L_q are the currents and inductances by coordinate axes $d-q$, respectively; $\psi_e(s) = \psi_e = \text{const}$ is the flux linkage determined by the coercive force of the rotor magnets.

We preliminary analyze the properties of a vector single-band AED with a BLDCM for a single-mass constant reactive load and a RPS functioning on the basis of a sinusoidal-cosine rotating transformer (SCRT), i.e. «ideal» position sensor. In this case, $L_d = L_q$, the equations of motion of the AED and the electromagnetic torque will be as follows:

$$M(s) - M_c(s) = J \cdot s \cdot \omega(s); \quad (5)$$

$$M(s) = \frac{m \cdot p_n}{2} \cdot i_d(s) \cdot \psi_e, \quad (6)$$

where p_n and m are the number of pole pairs and number of phases of BLDCM; $\omega(s) = \omega_c(s) \cdot p_n$ is the angular frequency of the rotation of the BLDCM rotor; J is the moment of inertia of the BLDCM rotor.

A simplified functional scheme of AED with BLDCM functioning on the basis of PWM and using high-rate RPS when powered from an industrial network is shown in Fig. 1. Note that it is on the basis of such a scheme that most foreign-made AEDs are created.

In Fig. 1 setting signals are indicated by «*», the current stabilization circuit in coordinate d and the control circuit for the clamp circuit (VT , R_T) are not shown, the angular position of the rotor is defined as $\Theta(s) = s \cdot \omega(s)$.

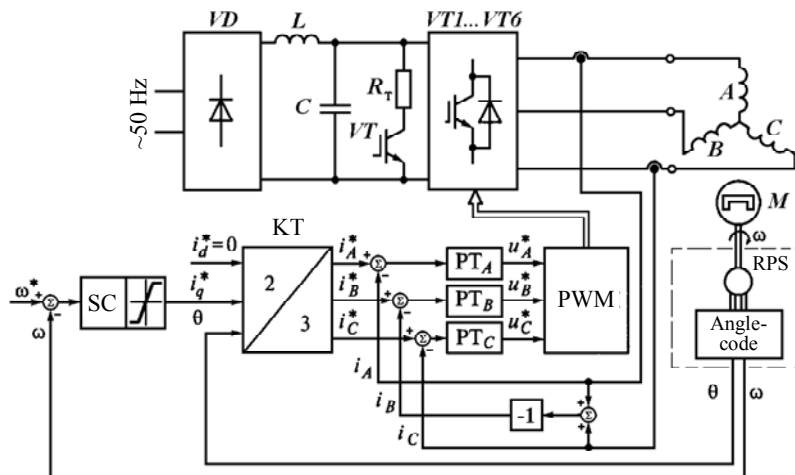


Fig. 1. Simplified functional scheme of a single-zone vector AED for AFV based on BLDCM and high-rate RPS

The authors offer a simpler technical solution, which, although it limits the functional and technological capabilities of the electric drive, but allows the implementation of its technical characteristics in accordance with Table 1. Simplification is associated with the exclusion of high-rate RPS and the installation of a simpler RPS [13], as well as the exclusion of PWM and the KT unit from the control system.

Let's consider an example of construction of a contactless valve electric drive with a minimum hardware Excess for an autonomous floating device with total weight of 20 kg. For further analysis, let us consider the operation of the system constructed on the basis of the scheme shown in Fig. 1 using the experimental sample of BLDCM with high-coercivity samarium-cobalt magnets produced by LLC «Electrical Engineering – New Technologies» (Odessa). The main technical parameters of the BLDCM are given in Table 2.

Table 2

Main parameters of the BLDCM	
Number of poles	8
Number of phases	3
Rated feed voltage, V	24
Rated rotated speed, rad/s	418.9
Rated torque, N·m	0.041
Maximal torque, N·m	0.17
Rated power, W	17
Phase resistance at 60 °C, Ω	1.2
Maximal permitted current, A	6.4
Phase inductance, mH	1.0
Rotor moment of inertia, kg·m ²	1·10 ⁻⁴

In Fig. 2,*a* a diagram of the power part of the inverter is presented, and in Fig. 2,*b* – a functional PWM circuit with distributor of control pulses of inverter keys is shown. The operation of the speed controller SC and current controllers CC corresponds to known schemes. The coordinate converter KC is described by system (1), BLDCM and RPS – by equations (2)-(6).

The results of simulation of the starting process with $M_r=0.04$ N·m and the subsequent load shedding at time $\tau = 0.35$ s to the value $M_r=0.015$ N·m for the AED corresponding to the scheme shown in Fig. 1 at generator frequency G of PWM 8 kHz and $\tau_n=0.25 \cdot 10^{-3}$ s are shown in Fig. 3. The system was simulated in the *Matlab / Simulink* environment.

With the help of coordinate transformations, it is possible to simulate AED with BLDCM in natural axes (for a three-phase model) and, if necessary, take into account the features introduced by higher harmonics of MMF and voltages. In the course of the investigations, it was found that when the PWM frequency is increased by more than 20 kHz, the time τ_n reduced by an order of magnitude and reducing the hysteresis loop of the *DA1-DA3* elements, a high speed control range (if necessary, 500 and more) can be obtained with practically zero torque pulsations. The application of a rather complex software and hardware base of AED with BLDCM according to the scheme shown in Fig. 1 (high-rate RPS

and microprocessor with programmable PWM, two galvanically separated current sensors, three current controllers) dramatically increases the cost of such AED with excess for AFV range of speed regulation of the motor shaft of the propulsion complex [19, 20] of AFV.

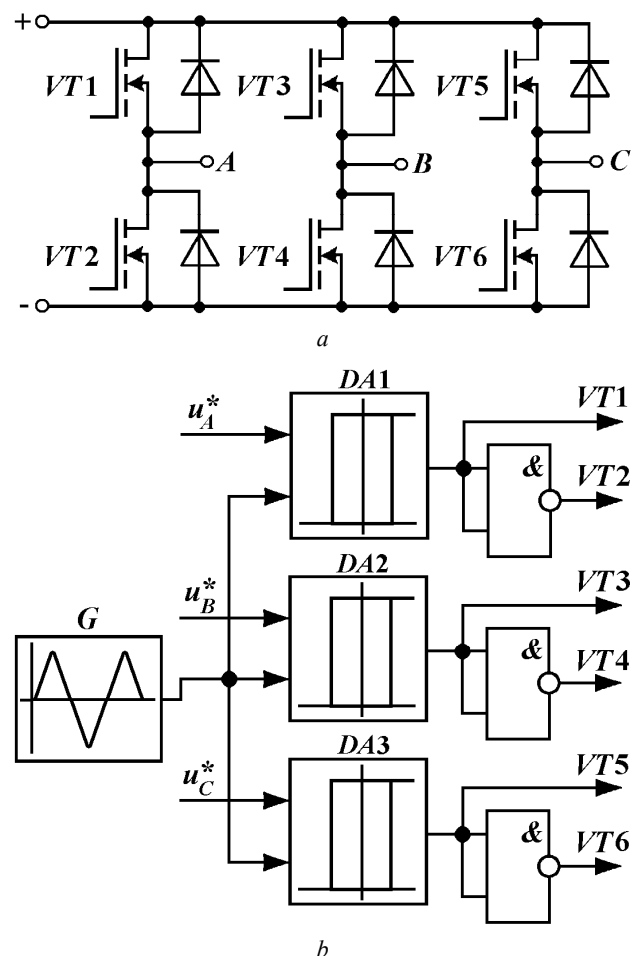


Fig. 2. The circuit of the transistor inverter (*a*) and PWM (generator *G*, comparators *DA*) with a distributor of pulses on the elements «2AND-NO» (*b*)

A simpler technical solution of AED with a BLDCM is proposed, which excludes the use of intermediate computation of coordinates and an expensive encoder (Fig. 4).

This AED uses as RPS three geometrically offset Hall sensors [13] and a specialized inexpensive control microcontroller *MC33035*. The main function of the microcontroller is to generate the pulse distribution (PD) signals to the *VT1, ... , VT6* keys of the inverter by the RPS commands. Another feature of the proposed solution is the feature of realizing negative current feedback. This feedback is realized with the help of only one current sensor installed in the power supply circuit, which made it possible to apply the current controller common for the three phases, although slightly reducing the accuracy of its stabilization. The speed feedback signal is formed from the impulse signals of an extremely simple RPS (6 pulses per revolution of the shaft, [13]) using an active analog filter AF with dominant time constant of 0.015 s, which significantly affects the dynamics of the AED.

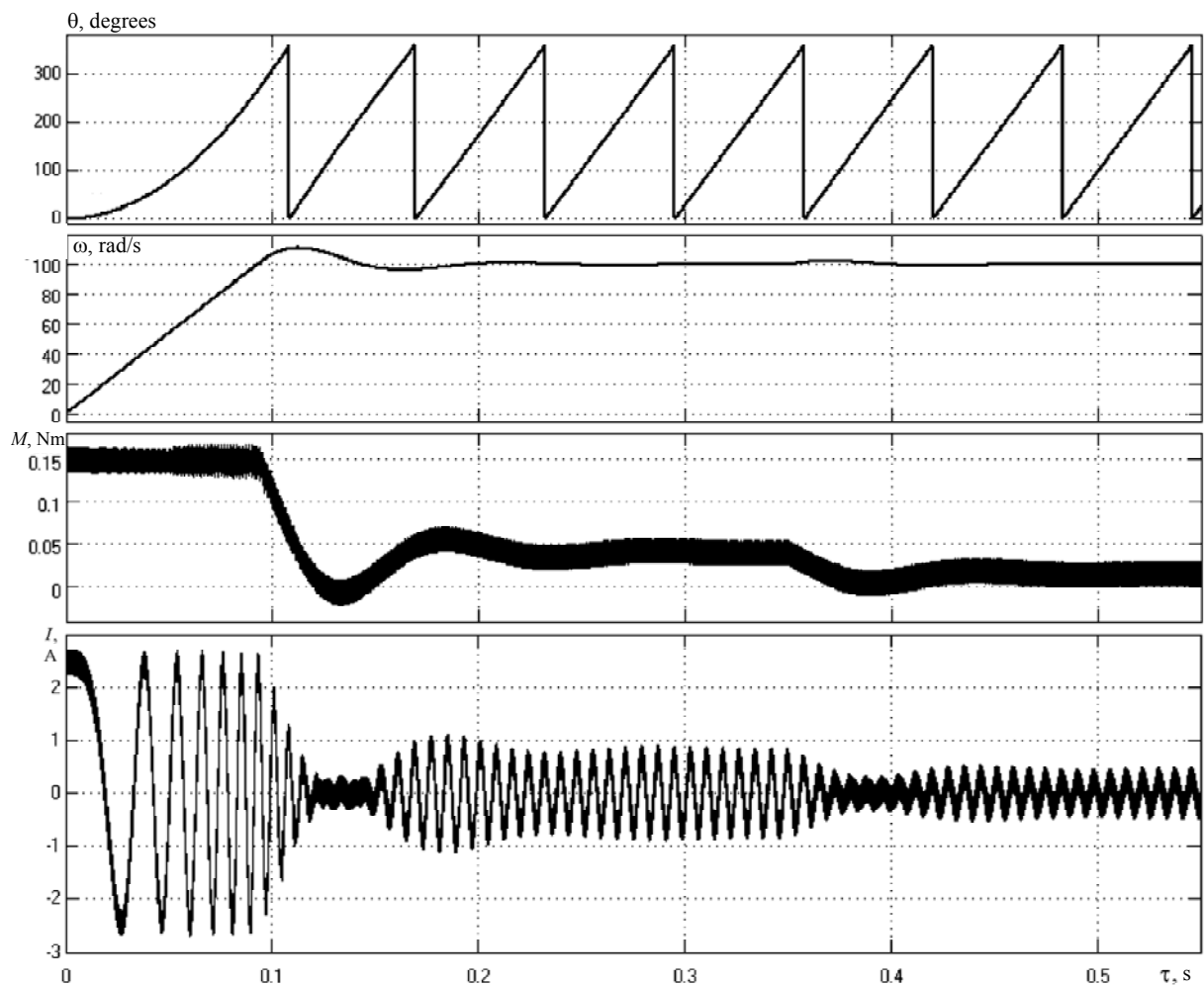


Fig. 3. Start of AED with BLDCM (according the scheme presented in Fig. 1) at rated M_r , with a subsequent load shedding to 0.015 N·m

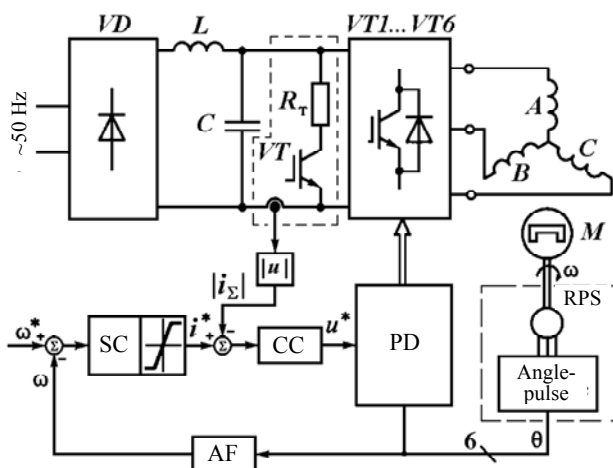


Fig. 4. Simplified functional diagram of single-zone AED for AFV based on BLDCM with Hall RPS

Let us compare the solutions represented by the schemes in Fig. 1 and Fig. 4.

1. Preliminary analysis of design solutions, based on a comparison of the hardware of the AED, constructed according to the schemes depicted in Fig. 1 and Fig. 4, points to certain advantages of AED with BLDCM, constructed according to the scheme shown in Fig. 4:

a) the expected reduction in the cost of the structure in small-scale production by 18 ... 25 %;

b) decrease in the weight and dimensions of the control board by 5 ... 7 %;

c) improving the reliability of the structure by using a smaller number of components, by 7 ... 14 %.

It is obvious that with such a technical solution, the torque pulsations on the motor shaft will increase, but the cost of the technical realization of the electric drive will be significantly less.

2. Graphs of the formation at the output of the PD of logical signals for controlling the keys of the inverter $VT1, \dots, VT6$ (according to Fig. 2,a) in the function of the RPS signals V_{H1}, V_{H2} and V_{H3} in the mode of 50 % duty cycle at the steady rotor speed are shown in Fig. 5. The graphs of the change in the electric and mechanical angular position of the BLDCM eight-pole rotor are also shown here.

Fig. 6 presents the results of simulating the start-up processes of AED with BLDCM, according to the scheme shown in Fig. 4: start in the «linear» mode at speed of 20 rad/s (graphs 1) and start in the current limiting mode (graphs 2). It is determined that the maximum value of the speed control range in this case can reach $D \approx 30$, which is quite enough for performing any technological tasks of the AFV. In Fig. 7 the graphs of the currents change in the phases of the BLDCM at start-up for speed of 100 rad/s are additionally presented confirming the efficiency of the current control circuit with one common current sensor.

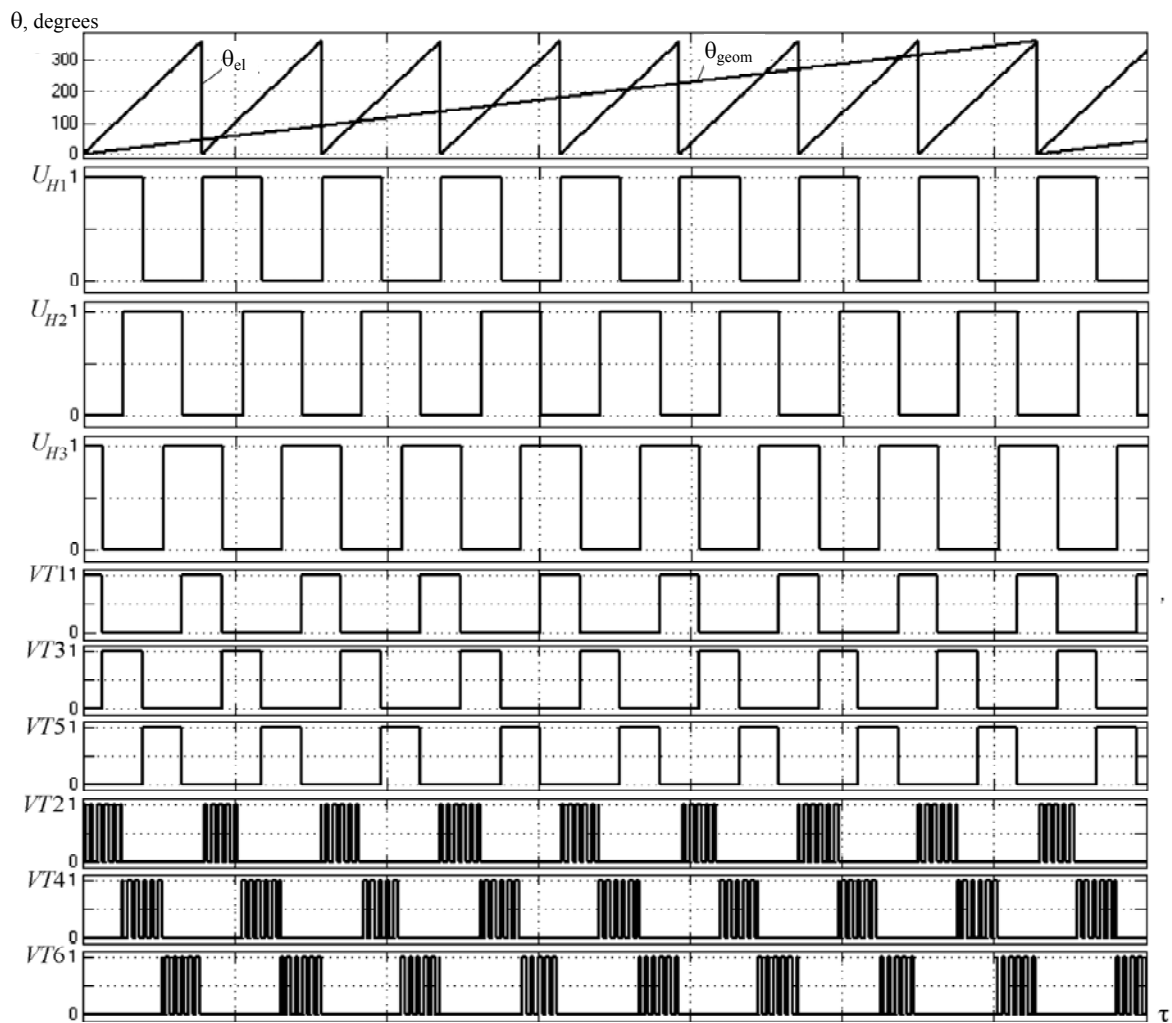


Fig. 5. Formation of key control pulses of the inverter $VT1, \dots, VT6$ at the output of the PD as a function of the RPS signals (V_{H1}, V_{H2}, V_{H3}) and change in the angular position θ of the BLDCM eight-pole rotor

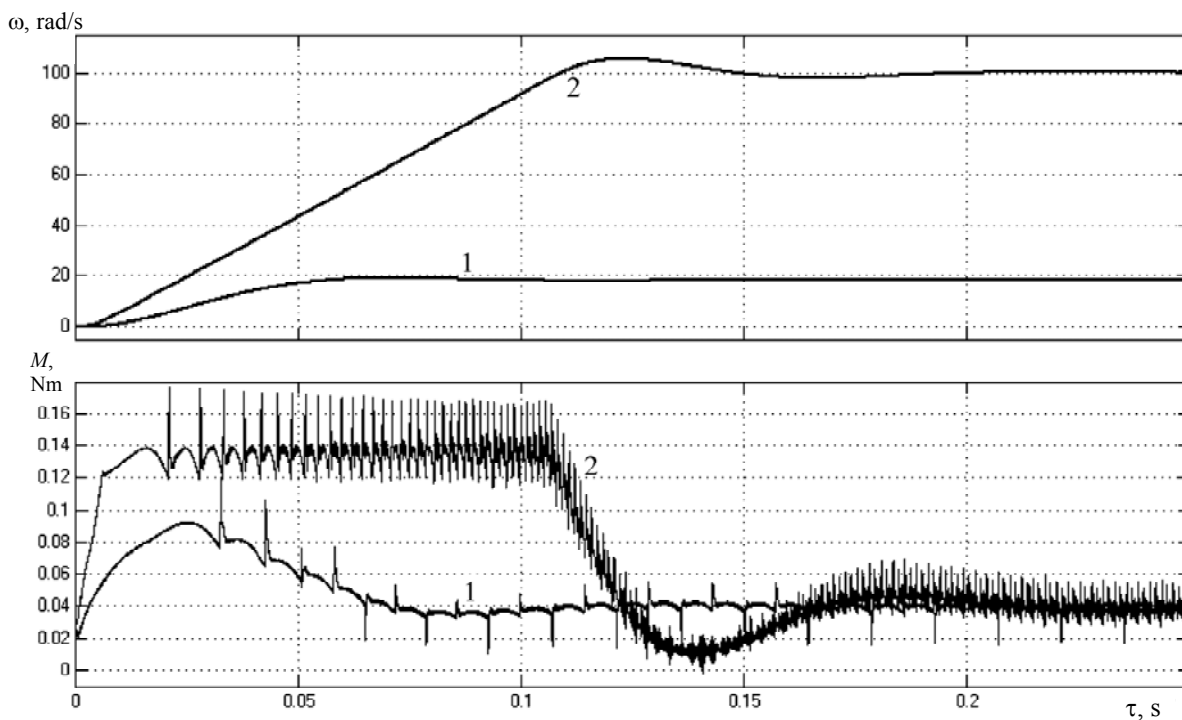


Fig. 6. Start of AED with BLDCM at $M_r=0.04$ N·m (according the circuit presented in Fig. 5): 1 – for small rotation speed (till current limiting); 2 – for high rotation speed (at current limiting)

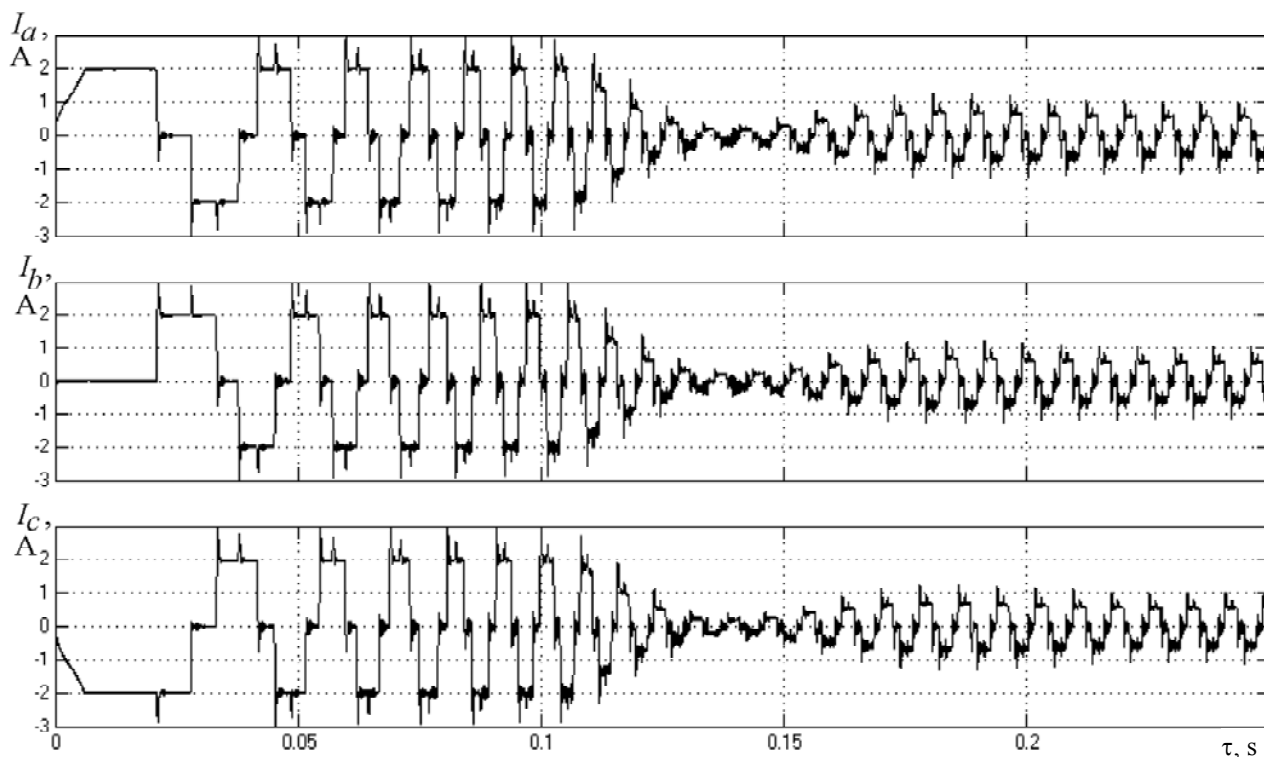


Fig. 7. BLDCM phase currents at start in the current limiting mode

The graphs shown in Fig. 6 and Fig. 7 were obtained by installing the RPS with an «advance» angle θ_{aa} of 45 electrical degrees, which was determined after a number of model investigations of the proposed AED with minimal hardware excess. The rate of increase in speed was limited by the active filter (AF) of the second order and the torque pulsations allowed for the BDPT.

Thus, if we compare the start-up graphs (Fig. 3 and Fig. 7) to the frequency of 100 rad/s of two AEDs functioning on the basis of the solutions shown in Fig. 1 and Fig. 4, then one can be convinced only of the insignificant differences in the processes of speed variation.

Conclusions.

1. Based on the analysis of the specified technical characteristics of the electric drive of an autonomous floating vehicle with a brushless DC motor («fan» load character, speed control range 1-10 with allowable overshoot of 20 %), the possibility of implementing an electric drive with minimum hardware excess due to justified rejection of PWM modulation and vector control with a high-resolution encoder is shown.

2. Model investigations of the proposed circuit of the electric drive in the *Matlab / Simulink* software environment have been carried out, which confirmed the operability of the proposed technical solutions and the possibility of realizing the required static and dynamic characteristics of the electric drive with maximum speed control range of 1-30 at acceptable level of its pulsations up to 10 % under inertia conditions of the load comparable with the moment of inertia of the applied motor.

3. The expected reduction in the cost of the structure of the electric drive with BLDCM performed according to

the proposed circuit with minimal hardware excess, in the small-scale production will be 18 ... 25 %, while reducing the weight and size of the control card will be 5 ... 7 %.

REFERENCES

1. Mokhtar A.S.N., Raez M.B.I., Marufuzzaman M., Ali M.A.M. Hardware implementation of a high speed inverse park transformation using CORDIC and PLL for FOC brushless servo drive. *Electronics and Electrical Engineering*, 2013, vol.19, no.3, pp. 23-26. doi: 10.5755/j01.eee.19.3.1267.
2. Srinivasan K., Vijayan S., Paramasivam S., Sundaramoorthi K. Power Quality Analysis of Vienna Rectifier for BLDC Motor Drive Application. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2016, vol.7, no.1, pp. 7-16.
3. Archa V.S., Rajan C. Sojy. A comparison on the performance of BLDC motor drive with DBR, Luo and BL-Luo. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 2016, vol.2, no.9, pp. 1038-1042.
4. Topaloglu I., Korkmaz F., Mamur H., Gurbuz R. Closed-loop speed control of PM-BLDC motor fed by six Step inverter and effects of inertia changes for desktop CNC machine. *Electronics and Electrical Engineering*, 2013, vol.19, no.1, pp. 7-10. doi: 10.5755/j01.eee.19.1.3244.
5. Noyal Doss M.A., Vijayakumar S., Mohideen A.J., Kannan K.S., Sairam N.D.B., Karthik K. Reduction in cogging torque and flux per pole in BLDC motor by adapting U-clamped magnetic poles. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2017, vol.8, no.1, pp. 297-304. doi: 10.11591/ijpeds.v8.i1.pp297-304.
6. S. Masroor, Peng C., Anwar Ali Z., Aamir M. Leader following consensus of BLDC motor speed with sampling intervals. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2016, vol.6, no.2, pp. 119-123. doi: 10.7763/IJMO.2016.V6.515.
7. Jaber A.S. A novel tuning method of PID controller for a BLDC motor based on segmentation of firefly algorithm. *Indian Journal of Science and Technology*, 2017, vol.10, no.6, pp. 1-5. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i6/111209.

8. Kim I.-G., Hong H.-S., Go S.-C., Oh Y.-J., Joo K.-J., Lee J. A study on the stable sensorless control of BLDC motor inside auxiliary air compressor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, vol.12, no.1, pp. 466-471. doi: **10.5370/JEET.2017.12.1.466**.
9. Mullick J.A. Fuzzy controller for speed control of BLDC motor using MATLAB. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, vol.4, no.2, pp. 1270-1274.
10. Bhadani A., Koladiya D., Devani J., Tahiliani A. Modeling and controlling of BLDC motor. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2016, vol.3, no.3, pp. 139-144.
11. Singh S.Kr., Katal N., Modani S.G. Optimization of PID controller for brushless DC motor by using Bio-inspired algorithms. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, vol.7, no.7, pp. 1302-1308. doi: **10.19026/rjaset.7.395**.
12. Kamil O., Kaan C., Abdullah B., Adnan D. Real-time speed control of BLDC motor vased on fractional sliding mode controller. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, 2016, vol.4, pp. 314-318.
13. Karpovich O.Ya., Onishchenko O.A. Features of the implementation of the feedback sensor for speed and position in the valve-inductor electric drive. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2003, no.11, pp. 65-70. (Rus).
14. Karpovich O.Ya., Porajko A.S., Onishchenko O.A. Experimental-debugging control scheme of the valve-inductor electric motor. *Scientific papers of Donetsk National Technical University*, 2003, no.67, pp. 152-155. (Rus).
15. Karpovich O.Ya., Onishchenko O.A. Development of models with simplified current loops for a valve-inductor microelectro drive. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2004, no.43, pp. 91-94. (Rus).
16. Volyanskaya Ya. B., Volyanskiy S.M. Features of construction of automatic control systems by motion of objects of marine robotics. *Electrotechnic and computer systems*, 2016, no.23(99), pp. 39-44. (Ukr).
17. Mutanov G.K., Shadrin N.V., Arinova A.N. Comparative analysis of methods of developing automatic control systems. *Vestnik of D. Serikbaev East Kazakhstan state technical university*, 2010, no.2, pp. 110-117. (Rus).
18. Karpovich O. YA., Onishchenko O. A., Radimov I. N. Two-quadrant valve-inductor electric drive. *Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University*, 2003, no.5(22), pp. 56-60. (Rus).
19. Budashko V.V., Yushkov E.A., Onishchenko O.A. Improvement of the control system of the propulsion device of the combined propulsion complex. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 45-51. (Ukr).
20. Budashko V.V., Onishchenko O.A., Yushkov E.A. Physical modeling of multi-propulsion complex. *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*, 2014, no.2, pp. 88-92. (Rus).

Received 01.06.2017

Ya.B. Volyanskaya¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor,
 S.M. Volyanskiy¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor,
 O.A. Onishchenko², Doctor of Technical Science, Professor,
¹ Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
 9, Heroiv Ukrainy Ave., Mykolayiv, 54000, Ukraine,
 phone +380 67 7981870, e-mail: yanavolyanskaya@gmail.com
² Odessa National Maritime Academy,
 8, Didrikhson Str., Odessa, 65029,
 phone +380 48 7775774, e-mail: oleganaton@gmail.com

В.Й. Лобов, К.В. Лобова

ВПЛИВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ПУЛЬСАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ПАРАМЕТРИЧНОМУ УПРАВЛІННІ

Представлені розрахунки та фізичне моделювання коливальних складових електромагнітного моменту при зміні параметрів асинхронного електродвигуна, елементів силових схем перетворювачів, побудованих на резисторно-тиристорних модулях. Установлено, що величина пульсацій електромагнітного моменту у квазісталих режимах залежить від вибраної силової схеми статорного і роторного комутаторів перетворювача, складу елементів, що входять до них, і схеми їх з'єднання, зміни величини кутів відкриття вентилями, способи їх управління, частота обертання ротора, параметри механізму – моменти статичний та інерції. Запропоновано використовувати для дослідження узагальнену схему параметричного управління асинхронного електродвигуна. Бібл. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, узагальнена схема, тиристорний перетворювач, пульсації.

Представлены расчеты и физическое моделирование колебательных составляющих электромагнитного момента при изменении параметров асинхронного электродвигателя, элементов силовых схем преобразователей, построенных на резисторно-тиристорных модулях. Установлено, что величина пульсаций электромагнитного момента в квазистационарных режимах зависит от выбранной силовой схемы статорной и роторной коммутаторов преобразователя, состава элементов, входящих в них, и схемы их соединения, изменения величины углов открытия вентилями, способы их управления, частота вращения ротора, параметры механизма - моменты статический и инерции. Предложено использовать для исследования обобщенную схему параметрического управления асинхронного электродвигателя. Библиограф. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, обобщенная схема, тиристорный преобразователь, пульсации.

Постановка проблеми. Силові схеми перетворювачів для управління асинхронних електродвигунів (АД) будуються з використанням різних елементів – резисторів, індуктивностей, діодів, тиристорів, тощо. Перетворювачі, що використовують ці елементи, включаються в статорні, роторні або одночасно в статорні та роторні кола АД і відносять до перетворювачів із параметричним управлінням [1, 2]. У залежності від силової схеми перетворювача змінюються відповідно статичні та динамічні характеристики АД. Схеми перетворювачів по різному визначають пускові, гальмові, реверсивні, енергетичні характеристики АД. При навантаженні АД, що управляється такими перетворювачами, з'являються динамічні зусилля в елементах кінематичного ланцюга, які можуть виявлятися в перехідних і сталих режимах роботи через колювання електромагнітного моменту (ЕМ) АД.

Відомо, що ЕМ містить середню і коливальну складові, але як остання змінюється, з якою частотою, чи залежить від вибраної силової схеми перетворювача та місця включення його елементів у схемі, не досліджено. Пульсації ЕМ, викликані впливом вищих гармонік напруги на АД, призводять до погіршення вібраційних і акустичних характеристик АД і механізму, тобто збільшується шум і вібрація. Це явище супроводжується резонансними явищами і погіршенням міцності механічного обладнання електроприводу і механізму. При збільшенні моменту інерції, кількість пульсацій ЕМ зростає. Особливо великих значень максимальні кидки моментів досягають при реверсі АД. Проте, до теперішнього часу для деяких типів перетворювачів відсутні дослідження і не визначено, як величина колювань ЕМ залежить від параметрів АД і електроприводу, вибраних схем перетворювачів, величини кутів відкриття тиристорів, способу управління

вентилями, частоти обертання ротора, тощо. Тому ці явища потребують досконального дослідження.

Для комплексного підходу і систематизованого аналізу, знаходження або отримання раціональних варіантів силових схем перетворювачів із параметричним управлінням АД найбільш зручно скористуватися узагальненою (спільною) силовою схемою та її математичним описом, який дозволяє створити загальний алгоритм управління та ефективно використовувати при проведенні досліджень ЕОМ (рис.1,а).

Послідовне включення силового тиристора з активним резистором, паралельно яким підключено другий додатковий резистор, утворює модуль, який є не тільки окремим функціональним модулем, а й може бути конструктивно виготовленим блоком, названий як: резисторно-тиристорним модулем (РТМ). Як видно з рис.1,а, узагальнена силова схема перетворювача управління АД складається з статорного (СК) і роторного (РК) комутаторів.

Розглянемо можливості запропонованої узагальненої схеми перетворювача із РТМ у колах статора, позначених у РТМ1 – РТМ6, як: R_{si} і r_{si} та в колах ротора РТМ7 – РТМ12, як: R_{ri} і r_{ri} , за умови, що:

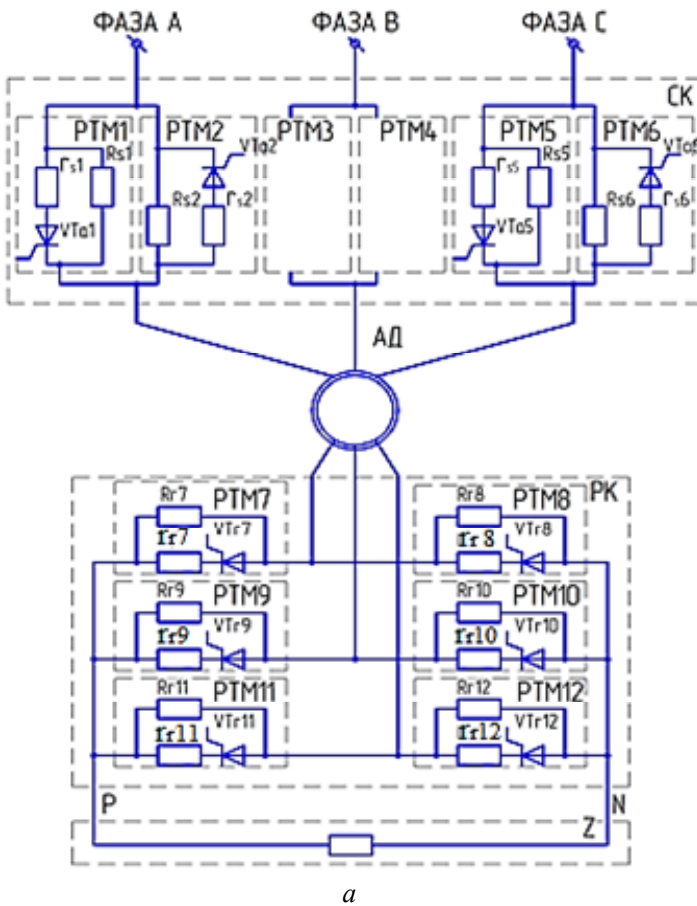
$$R_{si} = R_s; R_{ri} = R_r; r_{si} = r_s; r_{ri} = r_r,$$

де $i = 1, 2, \dots$ для граничних $(0, \infty)$ і проміжних значень величин R_s, r_s, R_r і r_r і трьох пристроїв Z_0, Z_s, Z_i , модуля зв'язку виду Z .

У відповідності з прийнятими обмеженнями у таблицях (рис. 1,б,в) наведені можливі варіанти силових схем відповідно для СК і РК, які позначені через: S_{ij} та Z_{kij} . Індекси ij вказують у таблицях порядковий номер відповідного рядка та стовпця, а індекс k приймає значення $0, s, i$, тобто позначає вид модуля зв'язку Z і утворює ланку постійного струму. У модулі Z окремо використовуються три різні пристрої: Z_0, Z_s, Z_i , що утворюють відповідні групи РК.

У першу групу Z_0 входять пристрої, які контур постійного струму закорочують, у другу групу Z_s – дозволяють дискретно змінювати величину параметрів елементів Z і третю групу Z_i – здійснюють

імпульсне регулювання цих параметрів. Проте в модулі зв'язку виду Z змінюється за певним законом величина опору активного резистору, включеного між точками P і N .



r_{si}	R_{si}		
	0	const	∞
0	S_{11}	S_{12}	S_{13}
const	S_{21}	S_{22}	S_{23}
∞	S_{31}	S_{32}	S_{33}

δ

Z_k		R_{ri}		
		0	const	∞
Z_0	const	Z_0R_{11}	Z_0R_{12}	Z_0R_{13}
	∞	Z_0R_{21}	Z_0R_{22}	Z_0R_{23}
	0	Z_0R_{31}	Z_0R_{32}	Z_0R_{33}
Z_s	const	Z_sR_{11}	Z_sR_{12}	Z_sR_{13}
	∞	Z_sR_{21}	Z_sR_{22}	Z_sR_{23}
	0	Z_sR_{31}	Z_sR_{32}	Z_sR_{33}
Z_i	const	Z_iR_{11}	Z_iR_{12}	Z_iR_{13}
	∞	Z_iR_{21}	Z_iR_{22}	Z_iR_{23}
	0	Z_iR_{31}	Z_iR_{32}	Z_iR_{33}

ϵ

Рис. 1. Узагальнена силова схема параметричного управління АД із СК і РК у складі перетворювача (а), та варіанти силових схем: СК (б) і РК (в)

Незважаючи на введення обмежень, варіант запропонованої узагальненої схеми перетворювача охоплює багато відомих схем параметричного управління АД, про що ілюструють наступні приклади. Схема роздільного параметричного управління за допомогою тиристорів у статорі типу S_{13} , відома як неперевсивний тиристорний регулятор напруги (ТРН). У схемі S_{13} прийнято $R_{si} = \infty$ і $r_i = 0$, тобто у кожен фазу статора АД включені два тиристори, які з'єднані між собою за зустрічно-паралельною схемою. Якщо в СК прийняти $R_{si} = \text{const}$ і $r_i = 0$, то в кожній фазі АД залишиться тільки резистор R_{si} . Інша схема типу S_{12} надає для випадку коли $R_{si} = \text{const}$ і $r_i = 0$. Статорні обмотки АД у схемі типу S_{12} підключені до живильної мережі через ПТМ. У схемі типу S_{12} ПТМ містить один резистор R_{si} , паралельно якому підключений тиристор VT_i . Причому, в кожен фазу статора АД включено по два ПТМ, сполучених між собою зустрічно-паралельно.

Звертаємо увагу на те, що перетворювачі, які мають у своєму складі вентиляльні елементи із неповною керованістю (тиристори або симистори), що

включаються в кола змінного струму, працюють у режимі природної комутації. Цей тип перетворювачів реалізує фазне управління у статорних або роторних колах АД.

На рис. 1,б представлено двадцять сім варіантів різних силових схем управління колами ротора АД. Варіанти силових схем управління колами ротора АД Z_0R_{11} , Z_0R_{21} , Z_0R_{31} , Z_sR_{11} , Z_sR_{21} , Z_sR_{31} , Z_iR_{11} , Z_iR_{21} , Z_iR_{31} при $R_{ri} = 0$ забезпечують лише замикання обмоток ротора у загальну точку з'єднання, перетворюючи таким чином звичайний ротор у короткозамкнений. Згідно із узагальненою схемою параметричного управління АД при $R_{ri} = \text{const}$ і $r_{ri} = \text{const}$ у кожній фазі ротора АД паралельно опору R_{ri} включається коло із послідовно з'єднаних між собою резисторів опору r_{ri} і тиристорів VT_i , а при $R_{ri} = \infty$ і $r_{ri} = \text{const}$ – залишається лише послідовно поєднане коло із цих елементів. Усе це призводить до різноманітних силових схем. Так, при $R_{ri} = \text{const}$ утворюються різновиди схем типів: Z_kR_{12} , Z_kR_{22} і Z_kR_{32} , а при $R_{ri} = Z_kR_{13}$, Z_kR_{23} , Z_kR_{33} , а також ряд інших схем, наведених на рис. 1,в. Схема типу Z_kR_{13} при $r_{ri} = 0$ відома під назвою мосто-

вої схеми Ларіонова, у колі постійного струму якої включений модуль зв'язку виду Z_k . Дві інші схеми типу $Z_k R_{22}$ (при $R_{ri} = \text{const}$ і $r_{ri} = \text{const}$ і $Z_k = \infty$) та $Z_k R_{23}$ (при $R_{ri} = \infty$ і $r_{ri} = \text{const}$ і $Z_k = \infty$) не мають розімкнутого ланцюга постійного струму, і тому можуть бути використані самостійно.

Застосовуючи модуль зв'язку виду Z , відповідний Z_0 схема типу $Z_k R_{22}$ перетвориться в схему типу $Z_0 R_{32}$, а схема типу $Z_k R_{23}$ відповідно у схему типу $Z_0 R_{33}$. Крім того, зі схеми типу $Z_0 R_{32}$ при $R_{ri} = \infty$ і $r_{ri} = \text{const}$ з'являється вже нова схема типу $Z_0 r_{13}$, а при $R_{ri} = \text{const}$ і $r_{ri} = \infty$ досить широко застосовується у промислових умовах схема типу $Z_0 r_{22}$, що містить у ланцюзі ротора тільки додаткові резистори. При $R_{ri} = \text{const}$ і $r_{ri} = 0$ виходить схема типу $Z_0 R_{32}$ і при $R_{ri} = \text{const}$, $r_{ri} = 0$ – типу $Z_0 r_{33}$. Аналогічним чином із схеми типу $Z_0 R_{33}$ при $r_{ri} = 0$ утворюється інша схема – типу $Z_0 r_{33}$, в якій обмотки ротора з'єднані у схему «зірки» і послідовно підключені до тиристорів та резисторів, що замкнуті між собою у нульову точку. Силова структура РК значно зміниться для схеми типу $Z_0 R_{32}$, якщо в ланцюзі постійного струму будуть присутні пристрої типу Z_s або Z_i .

Із схеми типу $Z_{s(i)} R_{32}$ отримується роторний комутатор, у якому тиристири з'єднані у схему трикутника. У цьому разі влаштування Z_s або Z_i є тільки один тиристор, включений у ланцюг постійного струму. Якщо прийняти, що в узагальненій схемі типу $Z_{s(i)} R_{32}$ резистори: $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = R_{r4} = R_{r5} = R_{r6} = \infty$, $r_{r2} = r_{r3} = r_{r5} = r_{r6} = \infty = \text{const}$, $r_{r1} = r_{r4} = 0$, то виявиться, що трикутний комутатор включений у нульову точку з'єднання ротора АД, і виходить силова схема типу $Z_1 R_{32}$, у ланцюзі ротора відсутні резистори опору. Якщо прийняти у схемі типу $Z_{s(i)} R_{32}$, що $R_{r1} = R_{r4} = R_{r5} = R_{r6} = \infty = \text{const}$, а $r_{r1} = r_{r4} = 0$, $r_{r2} = r_{r3} = r_{r5} = r_{r6} = \infty = \text{const}$, то комутатор буде включений за схемою $Z_2 R_{32}$.

Таким чином, використання узагальненої схеми перетворювача для параметричного управління АД дозволить використати для дослідження різних силових схем перетворювачів, які отримуються від узагальненої і вирішити актуальну проблему визначення величини пульсацій, перенапружень, амплітуд і частот коливальних складових ЕМ простими інженерними методами.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Дослідженню управління АД у різних режимах роботи присвячена велика кількість публікацій. Ці питання є одними з основних, що сьогодні обговорюються фахівцями. Автори не надають достатньої інформації для побудови автоматизованих систем параметричного управління АД з урахуванням зміни електромагнітних моментів, які суттєво змінюються на перехідні процеси при пусках, гальмуванні, реверсу та роботі. Основною проблемою АД, яку вирішують дослідники, це узгодження крутного моменту з моментом навантаження, так як під час пуску, наприклад, крутний момент за частки секунди часто досягає 150-200 %, що може привести до виходу з ладу кінематичного ланцюга приводу [3]. У той же самий час високий пусковий струм при старті може бути в 6-8 разів більше номінального, породжуючи проблеми зі стабільністю живлення та коливаннями ЕМ, величини яких

у представленій інформації не визначені та й не представлені. Для усунення деяких цих недоліків промисловістю випускаються контролери ЕнерджіСейвер (пристрої плавного пуску з функцією енергозбереження і корекції коефіцієнта потужності) займають проміжне положення між пристроями плавного пуску і перетворювачами частоти. ЕнерджіСейвер використовує традиційну для пристроїв плавного пуску схему зустрічно-паралельно включених тиристорів [4], тобто ТРН, які по закінченню процесу пуску замикаються контакторами. Момент, створений АД, залежить від величин прикладеної напруги і ковзання. Чим менший момент навантаження прикладений до ротора, тим більше ротор «доганяє» поле статора (ковзання зменшується), тим далі АД переходить у менш економічний режим. Якщо відповідним чином знизити напругу живлення на обмотках статора АД, ковзання повернеться до номінального значення. Механічні характеристики АД при зниженні напруги на обмотках статора мають відповідні знижені ЕМ. При цьому знизиться струм, що протікає через обмотки АД, і споживана потужність, пропорційна добутку напруги і струму, втрати зменшуються, ККД електродвигуна зростає [5]. Проте, якісний та кількісний аналіз зміни амплітуд і частоти коливальних складових ЕМ у цій роботі відсутній.

Аналіз динамічних процесів перетворення енергії в АД являє собою складну задачу в зв'язку з істотною нелінійністю рівнянь, що описують АД, обумовленої добутком змінних. Тому дослідження динамічних характеристик АД доцільно вести з застосуванням засобів обчислювальної техніки [6]. Спільне рішення системи диференціальних рівнянь у програмному середовищі MathCAD дозволяє розрахувати графіки перехідних процесів швидкості ω і ЕМ M при чисельних значеннях параметрів схеми заміщення АД. Як показав аналіз динамічної механічної характеристики АД в [6], максимальні ударні моменти при прямому пуску перевищують номінальний момент M_n статичної механічної характеристики більш ніж в 4.5 рази і можуть досягти неприпустимо великих по механічній міцності значень. Ударні моменти при пуску, і особливо при реверсі АД, призводять до виходу з ладу кінематики виробничих механізмів і самого АД. У той же час, коливання моментів АД при управлінні від перетворювачів не визначено.

До числа актуальних завдань в області управління АД відноситься розробка досить простих і ефективних перетворювачів для розширення діапазону регулювання швидкості обертання АД вниз від номінального значення. Можливість переведення електроприводу на знижені частоти обертання дозволяє реалізувати економічні режими експлуатації при зниженні технологічних навантажень і розширює його регульовальні властивості. Потреба в такому регулюванні неминуче з'являється в умовах діючого виробництва. Традиційні системи регульованого АД з короткозамкненим двигуном «тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун» (ТПН-АД) орієнтовані для плавного пуску і для створення гальмівних режимів [7]. Схема передбачає регулювання напруги за рахунок формування заданих кутів управління тиристорами.

Основою такого перетворювача є фазове або імпульсне управління. Це дозволяє використовувати відносно недорогі одноопераційні тиристори, які мають досить високі енергетичні показники [8]. При управлінні такими перетворювачами виникає необхідність підвищення рівномірності обертання ротора за рахунок зменшення амплітуди і/або управління частотою пульсацій ЕМ, спотворених роботою силових елементів перетворювача [9].

Дослідження пульсацій ЕМ у перетворювачах частоти з ШІМ інвертора при постійній і змінній частоті розглядається в роботі [10]. Результати досліджень в цій роботі вказують на існування цієї проблеми при управлінні АД, але методика розрахунку не може бути перенесена на розрахунок коливань моменту для перетворювачів із параметричним управлінням. Основою перетворювачів із фазовим або імпульсним управлінням є інша силова схема, що складається з РТМ [11]. Разом з очевидними перевагами використання простих перетворювачів побудованих на основі РТМ, як показує аналіз науково-технічної літератури, питання визначення рівнів пульсацій ЕМ АД фахівцями досконально не розглядалось.

Методи аналітичних розрахунків здійснені для перетворювачів частоти, асинхронно-вентильних каскадів або вентильних двигунів можуть бути частково використані для розрахунку пульсацій ЕМ при управлінні такими типами перетворювачів. Основні відмінності тут викликані, як особливістю регулювання величини струму через керовані вентилями, так і можливими схемами з'єднання резисторів, тиристорів, статорних і роторних обмоток АД. Окрім цього відомо, що у АД змінюються в процесі регулювання величини, такі як кут відкривання тиристорів, напруга статора, ЕРС ротора, струми статора та ротора, ЕМ, його ковзання й інші та вони пов'язані між собою відповідними функціональними залежностями [10]. Зміна коливань ЕМ ΔM залежить від вибраних силових схем, що включені в статор і ротор, величини кутів відкриття тиристорів, способу управління вентилями, частоти обертання ротора, параметрів електродвигуна і електроприводу [5, 6, 9].

При проектуванні сучасних електроприводів часто виникає необхідність визначення динамічних зусиль в елементах кінематичного ланцюга, які можуть виявлятися в перехідних і сталих режимах роботи через коливання ЕМ. У перехідних режимах роботи електроприводу відхилення форми кривої напруги на затисках АД від синусоїдальної викликає високочастотні коливання ЕМ і нерівномірність частоти обертання ротора.

Визначення коливальних складових ЕМ має велике практичне значення, оскільки вони істотно впливають не тільки на механічну міцність вузлів електроприводу і стан технологічного механізму. Якщо частоти власних коливань механічної частини електроприводу виявляються близькими до частот коливальних складових ЕМ, то може виникнути небезпека появи значних перенапружень в елементах електроприводу.

Метою роботи є виявлення впливу параметрів електродвигуна, елементів силових схем перетворювачів, побудованих на РТМ, статичного моменту і моменту інерції механізму на коливальні складові ЕМ АД.

Методи дослідження. Всебічний аналіз різноманітності силових схем перетворювачів і дослідження основних режимів АД пов'язаний з великим обсягом аналітичних обчислень і необхідністю проведення експериментальних досліджень. Тому методологічною основою вирішення поставлених завдань є комплексний підхід, що дозволяє найбільш зручно користуватися узагальненою схемою управління АД [11], її математичним описом, загальним алгоритмом управління і провести дослідження коливальних складових ЕМ шляхом математичного моделювання.

Викладення матеріалу та результати. Для оцінки значень коливань ЕМ використовується узагальнена схема управління АД. Схема має перетворювач, що складається з статорного і роторного комутаторів. Кожний комутатор реалізується з РТМ (рис. 1,а). Використовуючи ЕОМ виконані розрахунки різних режимів роботи АД. Встановлено, що пульсації в деяких випадках досягають значних величин, виконаних. Так, для АД типу МТГ 411-8, керованого за допомогою силових типів $S_{13}Z_0r_{11}$, $S_{13}Z_0r_{22}$, $S_{13}Z_0r_{32}$, $S_{13}Z_2R_{32}$, $S_{22}Z_kR_{32}$, $S_{11}Z_lR_{33}$ обчислені максимальні M_{\max} , мінімальні M_{\min} і середні M_m значення ЕМ. Використовуючи обчислені значення ЕМ, визначені коливання ΔM при різних кутах відкриття α_s , α_r тиристорів статора і роторного комутаторів і швидкостях обертання ротора ω_r , відповідно рівних: мінус 600, 400, 200, плюс 200, 400 і 600 об/хв. Результати розрахунків зведені графіками, що представлені на рис. 2.

Величини опорів резисторів РТМ, що входять у досліджувані силові схеми, прийняті відповідно до табл. 1.

У схемах включення РТМ послідовно з обмотками АД викликає появу додаткових коливань складових ЕМ, частота і амплітуда яких визначаються специфікою роботи тиристорів у перетворювачі. При комутації вентилями резисторів у колах АД виникає квазісталий режим, що є послідовністю перехідних процесів. У такому режимі змінюється структура силових кіл АД. Інтервали існування структур для статорних і роторних кіл визначаються моментами подачі управляючих імпульсів і умовами природної комутації вентилів.

У результаті зміни структури силових кіл змінюється і еквівалентна величина опорів резисторів РТМ, зміна яких приводять до коливань струмів статора і ротора АД. Останні у свою чергу змінюють магнітний потік і ЕМ електродвигуна. Як показують розрахунки (рис. 2), найменші коливання ЕМ АД забезпечують силові схеми з роздільним управлінням у колі ротора (типу $S_{11}Z_lR_{33}$) і сумісним управлінням у колах статора і ротора (типу $S_{22}Z_kR_{32}$). Перша схема практично повністю усуває коливання ЕМ. У цій схемі підвищується M_m і підтримується приблизно на рівні номінального у всьому діапазоні вимірювання частоти обертання АД. Зменшення пульсації ЕМ тут досягається унаслідок підвищення коефіцієнта загасання струму роторного кола. Він збільшується за рахунок підвищення еквівалентного опору резисторів РТМ. Друга схема поступається першій по амплітуді пульсацій ΔM електродвигуна.

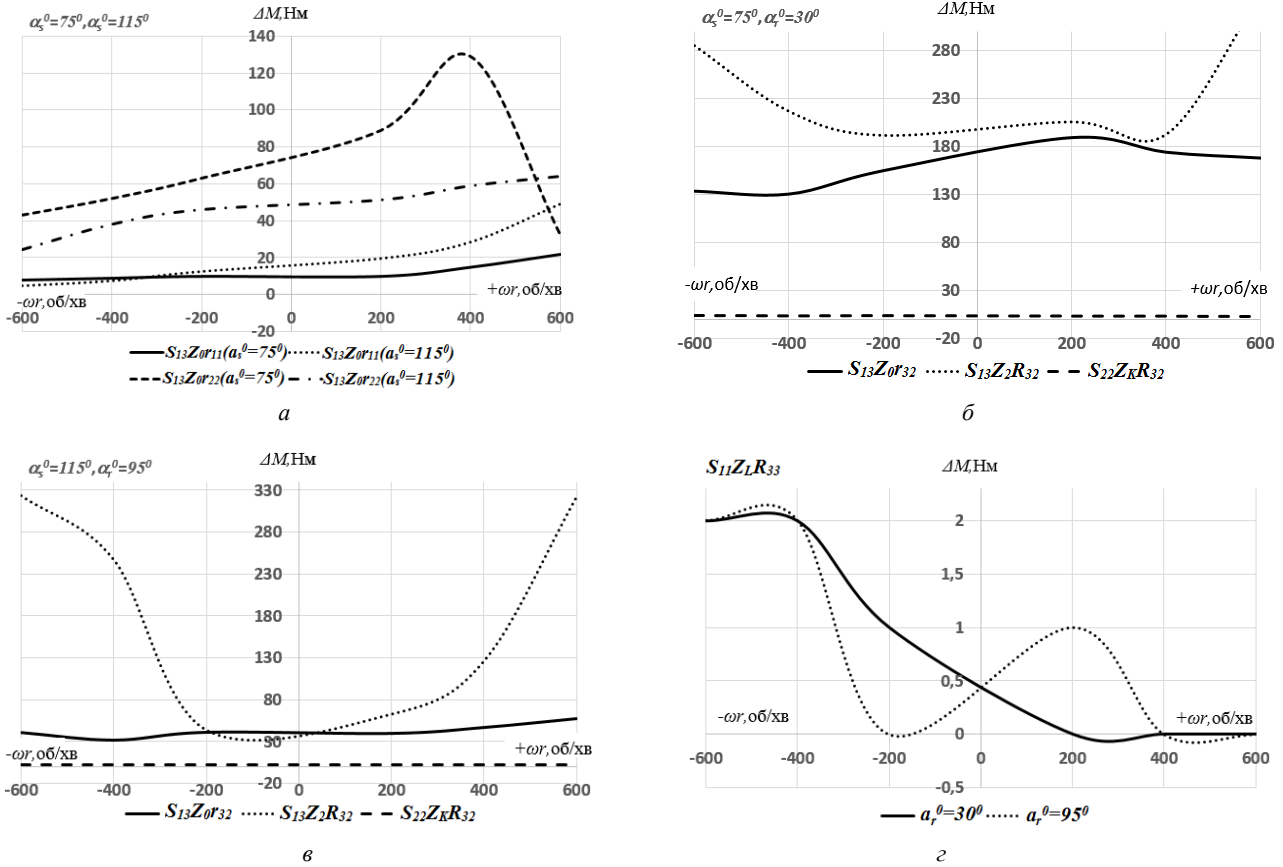


Рис. 2. Коливання електромагнітного моменту АД при швидкостях обертання ротора, кутах відкриття α_s , α_r тиристорів СК і РК для різних силових схем

Таблиця 1
Величини опорів резисторів РТМ для схем

Тип силової схеми	Величина опорів резисторів, Ом			
	R_{si}	R_{ri}	r_{si}	r_{ri}
$S_{13}Z_0r_{22}$	–	1.95	–	–
$S_{13}Z_0r_{32}$	–	2.8	–	–
$S_{13}Z_2R_{32}$	–	2.8	–	–
$S_{22}Z_kR_{32}$	0.32	4.4	0.1	0.48
$S_{11}Z_lR_{33}$	–	4.4	–	0.9

Збільшення кута відкриття α_r для першої схеми приводить до підвищення максимального моменту в зоні низьких швидкостей і зменшення його при високих швидкостях АД. Це пояснюється тим, що змінюється гармонійний склад напруг АД. Включення РТМ тільки в дві фази ротора (схема типу $S_{13}Z_2R_{32}$) приводить до значних коливань ЕМ АД. Велике значення ΔM викликає вібрацію, сильний шум і удари, тому їх величина повинна бути зменшена до мінімуму. Величина цих коливань вище в порівнянні з іншими силовими схемами. Так, наприклад, для цієї схеми при швидкості $n_r = 600$ об/хв і кутах $\alpha_s = 75^\circ$ і $\alpha_r = 30^\circ$ ΔM досягає значення, рівного 377 Нм, що в 1.5 рази вище за номінальний момент АД. При частоті обертання ротора АД, рівній 400 об/хв і кутах $\alpha_s = 115^\circ$ і $\alpha_r = 95^\circ$ ΔM досягає величини, рівної його номінальному моменту. При цьому коливання моменту ΔM можуть досягати потрібної величини критичного моменту АД. При несиметричному включенні елементів перетворювача у колі ротора АД ЕМ так само, як і при

однофазному включенні, містить середню і коливальну складові.

Амплітуда коливальної складової ЕМ залежить від ступеня несиметрії у колі ротора, а її частота завжди рівна подвоєній частоті ковзання. Що ж до середніх моментів АД, то вони при фазовому управлінні вентилями у колі статора (схема типу $S_{13}Z_0r_{32}$) збільшуються з підвищенням частоти обертання ротора і, навпаки, зменшуються за наявності у колі ротора додаткових резисторів (схема типу $S_{13}Z_0r_{22}$) або РТМ (схеми типів $S_{13}Z_0r_{32}$, $S_{13}Z_2r_{32}$, $S_{13}Z_kr_{32}$, $S_{13}Z_lr_{32}$). Середній момент АД змінюється в незначних межах при регулюванні частоти обертання ротора в схемі з роздільним управлінням у колі ротора ($S_{11}Z_lr_{33}$) і в схемі зі сумісним управлінням у колах статора і ротора ($S_{22}Z_kr_{32}$). Для першої згаданої схеми величина середнього моменту найбільша у всьому діапазоні зміни швидкості АД.

Отже, вживання РТМ у колі АД дозволяє помітно знизити величину пульсацій ЕМ, підвищити значення максимального і середнього моментів і обмежити його величини ударних і знакозмінних моментів як при пуску, так і, як показали дослідження, при переході з однієї швидкості на іншу. Збільшення еквівалентної величини опорів резисторів РТМ у колі статора дещо покращує коефіцієнт потужності кола, завдяки цьому ударні знакозмінні моменти виявляються зменшеними не тільки через зниження напруги на статорі, але і через зменшення їх значення і збільшення загасання аперіодичних струмів.

Момент інерції електроприводу робить істотний вплив на тривалість і характер протікання перехідних процесів. На рис. 3 приведені одержані на ЕОМ і експериментальній установці осцилограми пуску електроприводу за наявності на валу АД різних по величині додаткових махових мас. Аналізуючи ці графіки, можна прийти до висновку, що із збільшенням моменту

інерції електроприводу кількість значних по величині кидків перехідного ЕМ спочатку процесу пуску збільшується, а коливання частоти обертання ротора і ЕМ у районі синхронної швидкості зменшується. Це викликано тим, що деякі коефіцієнти загасання вільних складових ЕМ при малій швидкості вельми малі.

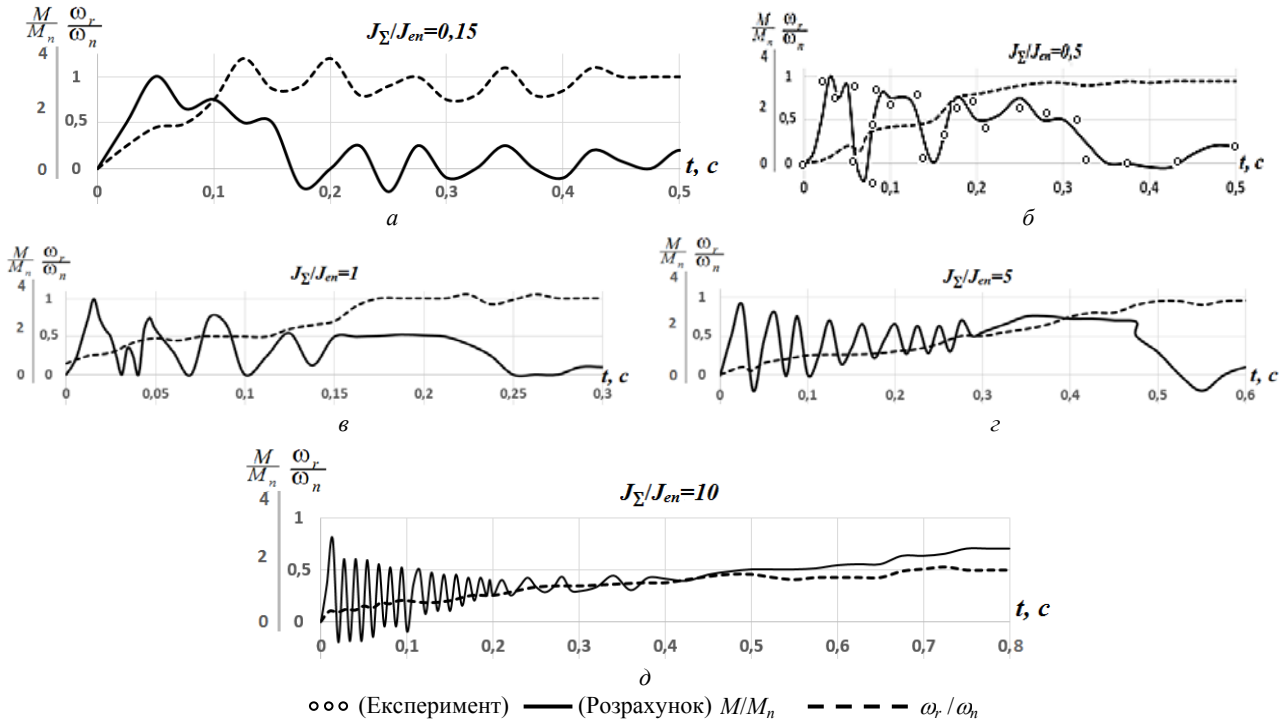


Рис. 3. Осцилограми пуску електроприводу з різними значеннями махових мас

Якщо збільшити момент інерції електроприводу, то АД довше працюватиме на знижених швидкостях, де малі коефіцієнти загасання статорного і роторного кіл, що і визначає більш повільне загасання ЕМ із збільшенням сумарного моменту інерції J_{Σ} електроприводу та механізму. При збільшенні J_{Σ} підвищується частота і збільшується амплітуда піків перехідного ЕМ. Спочатку процесу із зменшенням J_{Σ} кількість цих піків знижується. Проте, при цьому збільшуються коливання швидкості і ЕМ у зоні низьких ковзань АД.

Зіставлення великого числа розрахункових і експериментальних осцилограм для АД різної потужності з нормальним і підвищеним ковзанням указує на те, що отримані результати при зміні сумарного моменту інерції адекватні. Вплив сумарного моменту інерції на перехідний процес для інших силових схем управління АД майже такий же, як і для схеми типу $S_{13}Z_{0r}r_{32}$.

Збільшення статичного моменту на валу АД приводить також до більш тривалого протікання за часом процесу розгону (рис. 4).

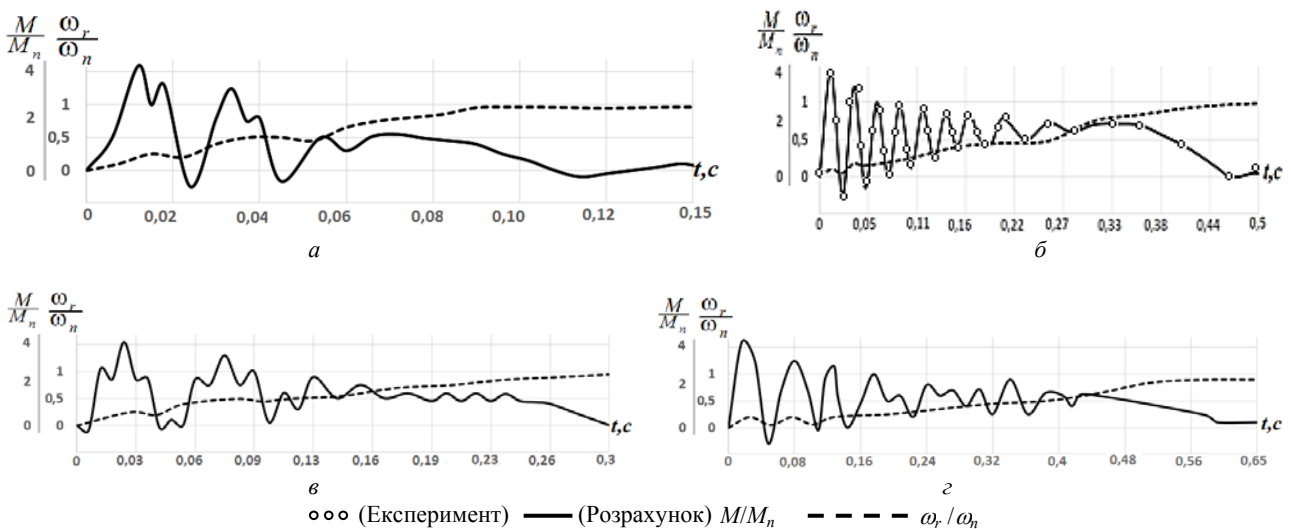


Рис. 4. Розрахункові та експериментальні осцилограми пуску АД при зміні статичного моменту для схеми $S_{13}Z_{0r}r_{11}$: а – $M_s = 0$, б – $M_s = M_n$; та для схеми $S_{13}Z_{0r}r_{32}$: в – $M_s = 0$, г – $M_s = M_n$

Частота пульсацій ЕМ спочатку процесу розгону підвищується. Із збільшенням швидкості ротора АД частота пульсацій значно знижується, і в районі синхронної швидкості коливання моменту зовсім пропадають. Картина перехідного процесу при зміні статичного моменту нагадує картину перехідного процесу при зміні моменту інерції. Осцилограми пуску АД при зміні статичного моменту на валу ротора, наведені на рис. 4 для двох силових типів $S_{13}Z_{0r_{11}}$ і $S_{13}Z_{0r_{32}}$ наочно підтверджують вищесказане. Для першої схеми кут відкриття α_S тиристорів прийнятий рівним 90° , а для другої схеми кути α_S і α_r відповідно склали 30° і 60° . Результати моделювання на ЕОМ показують, що картина перехідного процесу для інших силових схем при зміні навантаження на валу АД аналогічна перехідному процесу, створюваному схемами типів $S_{13}Z_{0r_{11}}$ і $S_{13}Z_{0r_{32}}$. Відмінність їх виявляється тільки в різних коливаннях ЕМ.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведені дослідження дозволили виявити особливості впливу параметрів елементів різних типів силових схем перетворювачів, побудованих на РТМ, на амплітуду і частоту коливальних складових ЕМ АД.

Виконане математичне та фізичне моделювання дозволило встановити умови виникнення електромагнітних пульсацій, визначити шляхи їх усунення та підтвердило ефективність вибраного методу дослідження. При цьому встановлено, що величина пульсацій електромагнітного моменту АД у квазісталих режимах залежить від вибраної силової схеми перетворювача, статорного і роторного комутаторів, складу елементів, що входять до них, і схеми їх з'єднання в модулях.

Зіставлення розрахункових і експериментальних осцилограм пуску АД різної потужності з нормальним і підвищеним ковзанням указує на те, що вплив на пульсації ЕМ надають величини кутів відкриття вентилів, способи їх управління, частоти обертання ротора, параметри електродвигуна і механізму – моменту статичний та інерції.

Одночасно виявлено, що вживання РТМ у складі силових схем статорного і роторного комутаторів перетворювача знижують величину пульсації ЕМ у АД та підвищують значення його максимального і середнього моментів і обмежують величину ударного і знакозмінних моментів, як при його пуску, так і переході з однієї швидкості на іншу.

У подальших дослідженнях планується зосередитись на перевірці розробленої методики в промислових умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Маренич К.Н., Бурака А.Н. Обоснование принципа параметрического управления асинхронным двигателем нагрузочного стенда в генераторном режиме // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2001. – №27. – С. 278-282.
2. Однолько Д.С. Математическое имитационное моделирование системы бездатчикового векторного управления

асинхронным двигателем в условиях параметрических возмущений // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – №2. – С. 31-35.

3. Принцип действия устройств плавного пуска: оборудование для управления электроприводом. – Режим доступа: https://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip_dejstviya/.

4. Контроллеры-оптимизаторы ЭнерджиСейвер: оборудование для управления электроприводом. – Режим доступа: <https://www.softstarter.ru/catalog/plavnij-pusk/energysaver/>.

5. Макаров А.М., Сергеев А.С., Крылов Е.Г., Сердобинцев Ю.П. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие. Волгоград: ВолГТУ, 2016. – 192 с.

6. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 232 с.

7. Анисимов В.А., Горнов А.О., Москаленко В.В. Тиристорные пусковые устройства в электроприводах переменного тока // Привод и управление. – 2002. – №1. – С. 32-34.

8. Черепанов В.П., Хрулев А.К. Тиристоры и их зарубежные аналоги: справочник. – М: ИП РадиоСофт, 2002. – 512 с.

9. Красовский А.Б. Основы электропривода: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 405 с.

10. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

11. Lobov V.Y. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – no.6. – pp. 102-108.

REFERENCES

1. Marenich K.N., Burlaka A.N. Substantiation of the principle of parametric control of an asynchronous motor of a load stand in the generator mode. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Mining and electromechanical*, 2001, no.27, pp. 278-282. (Rus).
2. Odolko D.S. Mathematical simulation of sensorless vector control induction motor under parametric perturbations. *System analysis and applied information science*, 2015, no.2, pp. 31-35. (Rus).
3. Principle of operation of soft starters: equipment for electric drive control. Available at: https://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip_dejstviya/ (accessed 15 October 2015).
4. Controllers-optimizers EnergySaver: equipment for electric drive control. – Available at: <https://www.softstarter.ru/catalog/plavnij-pusk/energysaver/>. (accessed 22 May 2016).
5. Makarov A.M., Sergeyev A.S., Krylov Ye.G., Serdobintsev Yu.P. *Sistemy upravleniia avtomatizirovannym elektroprivodom peremennogo toka: ucheb. posobie* [Control systems automated AC drive. Tutorial]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2016. 192 p. (Rus).
6. Demytyev Yu.N., Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. *Elektricheskii privod: ucheb. posobie* [Electric drive. Tutorial]. Tomsk, TPU Publ., 2010. 232 p. (Rus).
7. Anisimov V.A., Gornov A.O., Moskalenko V.V. Thyristor starting devices in AC drives. *Drive and control*, 2002, no.1, pp. 32-34. (Rus).
8. Cherepanov V.P., Khrulev A.K. *Tiristory i ikh zarubezhnyye analogi: spravochnik* [Thyristors and their foreign counterparts. Directory]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2002. 512 p. (Rus).
9. Krasovskiy A.B. *Osnovy elektroprivoda: ucheb. posobie* [Bases of the electric drive. Tutorial]. Moscow, Publishing House MSTU N.E. Bauman, 2015. 405 p. (Rus).

10. Chernyshev A.Yu., Dementyev Yu.N., Chernyshev I.A. *Elektroprivod peremennogo toka: ucheb. posobie* [AC electric drive. Tutorial]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2011. 213 p. (Rus).

11. Lobov V.Y. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no.6, pp. 102-108.

Надійшла (received) 10.02.2017

Лобов В'ячеслав Йосипович¹, к.т.н., доц.,

Лобова Карина Віталіївна¹,

¹ Криворізький національний університет,
50027, Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11,
тел/phone +38 0564 4090635,
e-mail: lobovvjcheshlav@gmail.com

V.I. Lobov¹, K.V. Lobova¹

¹ Kryvyi Rih National University,
11, V. Matusyevycha Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

The thyristor converter influence on the pulsations of the electromagnetic torque of the induction motor at parametrical control.

Purpose. The purpose of the work is to identify the parameters influence of the electric motor, the power circuits elements of the converters, built on resistor-thyristor modules, the static torque and the moment of inertia of the mechanism on the vibrational components of the induction motor's electromagnetic moment. **Methodology.** The methodological basis for the solution of the task is an integrated approach. The application of the generalized control circuit for an induction electric motor and its mathematical description made it possible to analyze various power circuits of parametric control of an induction electric motor. To create a common control algorithm, effectively use the computer for calculations. To perform qualitative and quantitative analysis of the amplitudes and frequencies of the vibrational components of the electromagnetic torque of the electric motor. **Results.** The conducted researches allowed to reveal the

peculiarities of the effect of the parameters of the elements of various types of power circuits of the parametric control converters on the vibrational components of the electromagnetic torque of an induction electric motor. Calculations and physical modeling have been performed, it has been possible to establish the conditions for the occurrence of electromagnetic pulsations and to determine the ways of their elimination. It was found that the magnitude of pulsations of the electromagnetic moment of an induction electric motor in quasi-permanent modes depends on the selected power circuit of the converter's stator and rotor commutators, the composition of the elements included in them, and the connection circuits. Comparison of calculated and experimental waveform when starting induction electric motors indicates that the pulsation of the electromagnetic torque is affected by: the size of the opening angle of the valves, their control methods, the rotor speed, the parameters of the electric motor and the mechanism are static and inertial moments. At the same time, it was revealed that the use of resistor-thyristor modules in the power circuits of the stator and rotary commutators reduces the magnitude of the pulsation of the electromagnetic torque of the induction electric motor. Increase the value of its maximum and average torques. Limit the magnitude of the shock and alternating torques when it starts and the transition from one speed to another. **Scientific novelty.** It is proposed to use a generalized circuit of parametric control of an induction electric motor for studying the change in the electromagnetic torque. The circuit consists of resistor – thyristor modules in stator and rotary commutators. The presented technique allowed simultaneously to investigate transients during the control of an induction electric motor by various power circuits of converters. The results of calculations allow choosing the necessary power circuit, taking into account the vibrational components of the electromagnetic torque of the induction motor. References 11, tables 1, figures 4.

Key words: induction electric motor, generalized circuit, thyristor converter, pulsations.

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ КАНАЛА ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В СИЛЬНОТОЧНОЙ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ МОЩНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Приведені результати розрахункової оцінки еквівалентного активного опору R_{ce} каналу імпульсного дугового електричного розряду в повітряній двоелектродній системі (ДЕС) сильноточного розрядного кола потужного високовольтного ємнісного накопичувача енергії (ЕНЕ), використовуваного при моделюванні в лабораторних умовах тривалої С-компоненти струму штучної блискавки. Рекомендовано розрахункове співвідношення для оцінки максимальної електронної температури T_{me} в низькотемпературній плазмі каналу імпульсної електричної дуги в досліджуваній повітряній ДЕС. Виконана практична апробація отриманих співвідношень для R_{ce} і T_{me} стосовно повітряної ДЕС сильноточного розрядного кола потужного високовольтного ЕНЕ генератора ГИТ-С, що діє, призначеного для проведення випробувань технічних об'єктів на електротермічну стійкість до дії тривалої С-компоненти струму штучної блискавки з амплітудно-часовими параметрами, що відповідають нормативним документам США SAE ARP 5412: 2013 і SAE ARP 5416: 2013. Бібл. 16, рис. 6.

Ключові слова: потужний високовольтний ємнісний накопичувач енергії, повітряна двоелектродна система, імпульсна електрична дуга, активний опір каналу імпульсної електричної дуги, максимальна температура каналу імпульсної електричної дуги.

Приведены результаты расчетной оценки эквивалентного активного сопротивления R_{ce} канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной двухэлектродной системе (ДЭС) сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), используемого при моделировании в лабораторных условиях длительной С-компоненты тока искусственной молнии. Рекомендовано расчетное соотношение для оценки максимальной электронной температуры T_{me} в низкотемпературной плазме канала импульсной электрической дуги в исследуемой воздушной ДЭС. Выполнена практическая апробация полученных соотношений для R_{ce} и T_{me} применительно к воздушной ДЭС сильноточной разрядной цепи действующего мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С, предназначенного для проведения испытаний технических объектов на электротермическую стойкость к воздействию длительной С-компоненты тока искусственной молнии с амплитудно-временными параметрами, соответствующими нормативным документам США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013. Библ. 16, рис. 6.

Ключевые слова: мощный высоковольтный емкостный накопитель энергии, воздушная двухэлектродная система, импульсная электрическая дуга, активное сопротивление канала импульсной электрической дуги, максимальная температура канала импульсной электрической дуги.

Введение. Известно, что в газоразрядных промежутках (например, в воздушных зазорах высоковольтных воздушных коммутаторов и иных электродных систем электрических нагрузок) цепей высоковольтных электроустановок с мощными емкостными накопителями энергии (ЕНЭ), предназначенных для воспроизведения в лабораторных условиях сильноточных электрофизических явлений (например, искусственной молнии с А-импульсной и С-длительной компонентами тока), могут протекать как импульсные искровые электрические разряды, так и импульсные дуговые электрические разряды [1-3]. Для импульсных искровых электрических разрядов, протекающих в воздушных промежутках разрядных цепей мощных высоковольтных ЕНЭ, характерными параметрами являются длительность их протекания $\tau_{pd} \leq 1$ мс и амплитуда силы их тока $I_{md} \leq 1000$ кА [1]. Что касается импульсных дуговых электрических разрядов в разрядных цепях мощных высоковольтных ЕНЭ, то для них указанные электрические параметры τ_{pd} и I_{md} характеризуются следующими численными значениями [2, 3]: $1000 \text{ мс} \geq \tau_{pd} \geq 100 \text{ мс}$ и $1000 \text{ А} \geq I_{md} \geq 100 \text{ А}$. В последнем случае численные значения параметров τ_{pd} и I_{md} практически соответствуют известным характеристикам классического дугового электрического разряда, возникающего в воздушной двухэлектродной

системе (ДЭС) между ее катодом и анодом при постоянном или переменном токе в электрической цепи [4]. Согласно данным, приведенным в [4, 5], дуговой электрический разряд в воздушной ДЭС поддерживается за счет термоэлектронной эмиссии с поверхности металлического или графитового электрода-катода. За счет ускорения электронов в межэлектродном промежутке и ударной ионизации ими молекул воздуха между катодом и анодом ДЭС возникает столб (канал) ярко светящегося сильно ионизированного газа, называемого в электрофизике электронно-ионной плазмой. При этом для классического примера дугового электрического разряда на открытом воздухе между графитовыми (угольными) электродами ДЭС термодинамическая температура канала дуги радиусом до 4 мм при постоянном токе в 200 А на поверхности анода в его центральной зоне может достигать значения до 4200 К, а на поверхности катода – до 3500 К [4, 5].

В [6, 7] были представлены результаты приближенного расчета активного сопротивления R_c канала импульсного искрового электрического разряда между металлическими электродами высоковольтного сильноточного воздушного коммутатора атмосферного давления. Простые и удобные формулы для оценки максимальной температуры T_{me} электронно-ионной

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

плазмы импульсной электрической дуги в воздушной ДЭС в настоящее время нам не известны. Несомненный научный и практический интерес представляют электрофизические задачи, связанные с расчетным определением активного сопротивления R_{ce} и максимальной температуры T_{me} канала импульсного дугового электрического разряда между металлическими (графитовыми) электродами воздушной ДЭС в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ испытательной электрофизической установки.

Целью статьи является приближенный расчет активного сопротивления R_{ce} и максимальной температуры T_{me} плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС, входящей в состав сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ, а также практическая апробация данных расчетов в условиях высоковольтной лаборатории на реальном мощном ЕНЭ электроустановки.

1. Постановка задачи исследования. Рассмотрим воздушную ДЭС, размещенную в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора импульсного тока (ГИТ), ЕНЭ которого построен по одномодульной схеме на основе параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов и предназначен для воспроизведения в воздушном промежутке длиной h_a ДЭС длительной С-компоненты тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП) согласно технических требований действующих нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 [8, 9]. Напомним, что нормируемые АВП для аperiodической длительной С-компоненты тока молнии имеют нижеследующие численные значения [8, 9]: амплитуда тока $I_{mdc} = \pm(200-800)$ А; переносимый электрический заряд $q_{dc} = \pm(200 \pm 40)$ Кл; продолжительность протекания тока $\tau_{pdc} = (0,25-1)$ с. Видно, что АВП указанной компоненты тока искусственной молнии соответствуют основным характеристикам тока дугового электрического разряда между катодом и анодом воздушной ДЭС [4, 5]. Принимаем, что металлические или графитовые электроды рассматриваемой ДЭС расположены в атмосферном воздухе при нормальных условиях (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна $\theta_0 = 0^\circ \text{C}$ [4]). С учетом указанных численных значений τ_{pdc} используем условие изотермичности плазмы в канале рассматриваемой электрической дуги, согласно которому ее максимальная электронная температура T_{me} будет практически равна максимальной температуре T_{mi} носителей ее ионного тока ($T_{me} \approx T_{mi}$) [4]. Полагаем, что в ДЭС длина l_{ce} цилиндрического канала равновесной плазмы импульсной электрической дуги в первом приближении равна минимальной длине межэлектродного воздушного промежутка в исследуемой ДЭС. Принимаем, что в сильноточном канале дугового электрического разряда в воздушной ДЭС плотность тока δ_{dc} , термодинамическая электронная T_{me} и ионная T_{mi} температуры его равновесной плазмы в первом приближении характеризуются практически однородным распределением по его радиусу. Требуется в рамках инженерного подхода получить новое расчетное соотношение для активного сопротивления

R_{ce} и рекомендовать простую формулу для расчетной оценки максимальной температуры T_{me} плазмы канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС, а также осуществить практическую апробацию выполненных приближенных расчетов величин R_{ce} и T_{me} применительно к реальной сильноточной разрядной цепи действующего мощного ГИТ (ГИТ-С), имитирующего на низкоомной RL -нагрузке длительную С-компоненту тока искусственной молнии.

2. Основные расчетные соотношения. Воспользовавшись плазмодинамическим методом расчета величины R_{ce} [6], для переменного во времени t активного сопротивления плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в исследуемой воздушной ДЭС запишем следующее выражение:

$$R_{ce}(t) = l_{ce} [\pi r_{ce}^2(t) \gamma_{ce}]^{-1}, \quad (1)$$

где $r_{ce}(t)$ – изменяющийся во времени t радиус плазменного канала дугового электрического разряда между металлическими (графитовыми) электродами ДЭС; γ_{ce} – усредненная удельная электропроводность низкотемпературной плазмы в цилиндрическом канале импульсной дуги между электродами ДЭС.

Известно, что величина $r_{ce}(t)$ в процессе протекания импульсного разрядного тока $i_{dc}(t)$ мощного ЕНЭ генератора ГИТ-С через исследуемую ДЭС изменяется на нарастающей части аperiodического токового импульса от своего минимального нулевого значения (момент времени $t=0$) до своего максимального значения r_{cem} , соответствующего моменту времени t_{mdc} , когда сила тока $i_{dc}(t)$ достигает своего максимального значения I_{mdc} . На спадающей части указанного импульса тока величина $r_{ce}(t)$ изменяется от максимального значения r_{cem} (момент времени t_{mdc}) до минимального нулевого значения, соответствующего моменту прекращения протекания импульсного разрядного тока $i_{dc}(t)$ через воздушную ДЭС (момент времени $t=\tau_{pdc}$). Очевидно, что в моменты времени $t=0$ и $t=\tau_{pdc}$ активное сопротивление плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС принимает согласно (1) бесконечно большие численные значения. В связи с этим пользоваться напрямую соотношением (1) для практических расчетов величины $R_{ce}(t)$ невозможно. Поэтому перед нами возникает новая электротехническая задача, связанная с заменой переменной во времени t величины активного сопротивления $R_{ce}(t)$ импульсной электрической дуги на некоторую эквивалентную величину ее активного сопротивления R_{ce} , остающуюся постоянной в течение всего процесса протекания импульсного разрядного тока $i_{dc}(t)$ аperiodической временной формы через рассматриваемую ДЭС. Одним из возможных путей приближенного решения подобной задачи может стать усреднение в (1) во времени t величины $R_{ce}(t)$. Причем, такое нестандартное усреднение, когда в правой части выражения (1) усреднению подлежит временная функция вида $f(r_{ce}) = r_{ce}^2(t)$. О пределах изменения этой функции нами было сказано выше. Тогда для эквивалентного активного сопротивления R_{ce} канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС получаем соотношение:

$$R_{ce} = l_{ce} / (\pi \gamma_{ce} r_{cem}^{-1} \int_0^{r_{cem}} r_{ce}^2 dr_{ce}) = 3l_{ce} (\pi r_{cem}^2 \gamma_{ce})^{-1}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что для нахождения численного значения величины эквивалентного активного сопротивления R_{ce} канала дугового разряда длиной l_{ce} необходимо знать его два таких параметра как максимальный радиус r_{cem} и усредненную удельную электропроводность γ_{ce} электронно-ионной плазмы, формирующей столб рассматриваемой электрической дуги. Радиус r_{cem} (м) канала импульсного дугового разряда в воздушной ДЭС зависит от силы протекающего в нем разрядного тока $i_{dc}(t)$ мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С и для нормальных атмосферных условий в системе СИ определяется в виде [3, 10]:

$$r_{cem} = 1,1 \cdot 10^{-4} (I_{mdc})^{1/2}. \quad (3)$$

где I_{mdc} – амплитуда (А) аperiodической длительной С- компоненты тока искусственной молнии в плазменном канале импульсной электрической дуги ДЭС.

Подставив (3) в (2), для эквивалентного активного сопротивления R_{ce} (Ом) плазменного канала импульсной электрической дуги в ДЭС сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С получаем следующее соотношение:

$$R_{ce} = 78,92 \cdot 10^6 l_{ce} (I_{mdc} \gamma_{ce})^{-1}. \quad (4)$$

Из (4) вытекает, что с увеличением силы тока I_{mdc} в разрядной цепи мощного ЕНЭ максимальное падение напряжения $U_{mdc} = R_{ce} I_{mdc}$ на импульсной электрической дуге в воздушной ДЭС будет убывать. Связано это с тем, что с возрастанием тока I_{mdc} за счет увеличения термоэлектронной эмиссии с катода ДЭС степень ионизации газа в ее разрядном промежутке будет также возрастать. Возрастание ионизации газа в воздушном разрядном промежутке ДЭС будет приводить к увеличению усредненной удельной электропроводности γ_{ce} электронно-ионной плазмы канала исследуемой дуги. В результате указанных электрофизических процессов в газоразрядном промежутке воздушной ДЭС согласно (1) эквивалентное активное сопротивление R_{ce} ее импульсной электрической дуги будет сильно уменьшаться. В итоге это и будет приводить к убыванию падения напряжения U_{mdc} на импульсной электрической дуге в воздушной ДЭС с увеличением амплитуды тока I_{mdc} . Установленная особенность соответствует указанному в [4] характеру поведения дугового разряда в ДЭС. Данное обстоятельство косвенно указывает на достоверность полученного расчетного соотношения (4) для эквивалентного активного сопротивления плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС.

Что касается количественных значений для величины γ_{ce} , входящей в (4), то согласно расчетно-экспериментальным данным из [7, 11] они в первом приближении с учетом (2) численно составляют около $5000 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$. Укажем, что для высокоионизированной электронно-ионной плазмы канала импульсного дугового электрического разряда в исследуемой воздушной ДЭС верхняя граница численных значений γ_{ce} может достигать уровня порядка $20 \cdot 10^3 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ [1, 6].

При расчетной оценке наибольшей электронной температуры T_{me} в электронно-ионной равновесной плазме импульсного дугового разряда для воздушной ДЭС с учетом принятых допущений (3) и приведенного в [12] теплофизического подхода может быть рекомендовано следующее приближенное выражение:

$$T_{me} \approx 95,35 \cdot \sqrt[4]{U_{ac} / \sigma_c}, \quad (5)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}\cdot\text{(м}^2\cdot\text{К}^4\text{)}^{-1}$ – постоянная Стефана-Больцмана [4]; $U_{ac} \leq 11 \text{ В}$ – приэлектродное падение напряжения в воздушной ДЭС с металлическими (графитовыми) электродами (для графитового анода $U_{ac} \approx U_a \approx 11 \text{ В}$, а для графитового катода $U_c \approx 10 \text{ В}$ [5]).

3. Мощный высоковольтный ЕНЭ генератора ГИТ-С и его применение для испытаний технических объектов на молниестойкость. На рис. 1, 2 приведены принципиальная электрическая схема и общий вид мощного ЕНЭ генератора ГИТ-С, используемого при экспериментальных исследованиях на электротермическую молниестойкость испытательных образцов (ИО) тех или иных элементов (например, металлической или композиционной обшивки) различных технических объектов (например, летательного аппарата). Собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-С при этом были равны [2]: активное сопротивление $R_c \approx 4,74 \text{ Ом}$; индуктивность $L_c \approx 11,43 \text{ мГн}$; емкость $C_c \approx 45,36 \text{ мФ}$.

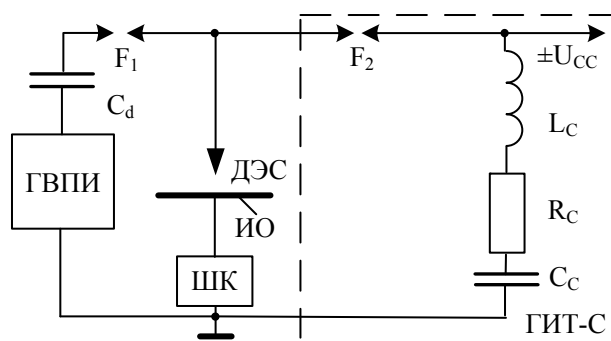


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С, используемого для исследования воздействия канала электрической дуги на ИО металлической обшивки технического объекта (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой до $\pm 100 \text{ кВ}$; F_1, F_2 – двухэлектродные высоковольтные воздушные искровые коммутаторы; C_d – разделительная емкость на 180 пФ и импульсное напряжение до $\pm 120 \text{ кВ}$ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием коммутаторов F_1 и F_2 ; ДЭС – двухэлектродная система с воздушным промежутком; ИО – испытательный образец металлической обшивки объекта; ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения тока импульсной электрической дуги в воздушном промежутке ДЭС и ИО; $\pm U_{cc}$ – зарядное напряжение высоковольтных конденсаторов генератора ГИТ-С; $L_c \approx 11,43 \text{ мГн}$, $R_c \approx 4,74 \text{ Ом}$, $C_c \approx 45,36 \text{ мФ}$ – собственные электрические параметры генератора ГИТ-С, включающие индуктивность, активное сопротивление и емкость его сильноточной разрядной цепи)

Мощный ЕНЭ одномодульного исполнения генератора ГИТ-С был собран на основе 324 параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ-5-140 (номинальное напряжение

± 5 кВ; номинальная емкость 140 мкФ) [2, 13]. Номинальное значение запасаемой электрической энергии в ЕНЭ генератора ГИТ-С составляло $W_{co} \approx 567$ кДж [2]. В соответствии с рис. 1 в цепи генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) был установлен двухэлектродный воздушный коммутатор F_1 с массивными основными стальными электродами на напряжение до ± 50 кВ, а в разрядной цепи генератора ГИТ-С – высоковольтный двухэлектродный воздушный коммутатор F_2 типа ВДВК-10 с прямоугольными графитовыми электродами на напряжение до ± 10 кВ [14] (рис. 3). При практической апробации расчетных соотношений (4) и (5) применительно к сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-С использовалась воздушная ДЭС, схематически показанная на рис. 4. Для инициирования электрического пробоя воздушного промежутка h_a в этой ДЭС и в соответствии с требованиями [8, 9] была применена тонкая медная электрически взрывающаяся проволочка (ЭВП), имеющая радиус $r_e \approx 0,1$ мм и длину $l_e \approx 37$ мм. Воздушные рабочие промежутки h_a и h_e в данной ДЭС составляли соответственно 14 и 1 мм. На рис. 5 в укрупненном виде приведен внешний вид используемой в сильноточной разрядной цепи мощного ЕНЭ высоковольтного генератора ГИТ-С воздушной ДЭС.



Рис. 2. Общий вид мощного ЕНЭ высоковольтного генератора ГИТ-С (на переднем плане видны формирующие активно-индуктивные элементы его сильноточной разрядной цепи, а на заднем плане – параллельно соединенные высоковольтные импульсные конденсаторы ИМ-5-140) [2, 3]

Зарядное напряжение высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ генератора ГИТ-С для выполнения соответствующих экспериментов выбиралось отрицательной полярности по модулю равным $U_{cc} \leq 4,2$ кВ. Выбор полярности зарядного напряжения U_{cc} определялся необходимостью моделирования наиболее тяжелых в электротермическом смысле условий в исследуемой ДЭС и соответственно в круглой зоне привязки сильноточного цилиндрического плазменного канала импульсной электрической дуги с дли-

тельной C - компонентой тока искусственной молнии на наружной плоской поверхности ИО металлической обшивки технического объекта. Для предотвращения механических разрушений в мощной конденсаторной батарее генератора ГИТ-С и обеспечения требуемых условий по технике безопасности для обслуживающего его высоковольтный ЕНЭ персонала при аварийных режимах его работы (например, при электрическом пробое изоляции хотя бы одного из 324 указанных конденсаторов при их заряде или разряде) на всех высоковольтных выводах используемых конденсаторов ЕНЭ генератора ГИТ-С были установлены защитные сопротивления, выполненные из высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 на постоянное напряжение до ± 25 кВ [2, 15].



Рис. 3. Внешний вид высоковольтного двухэлектродного воздушного коммутатора типа ВДВК-10 с графитовыми электродами прямоугольной формы на напряжение до ± 10 кВ, используемого в разрядной цепи генератора ГИТ-С [2]

В высоковольтном ЕНЭ генератора ГИТ-С на высоковольтных выводах каждого из 324 шт. его конденсаторов типа ИМ-5-140 были закреплены по одному защитному резистору ТВО-60-100 Ом [2, 15].

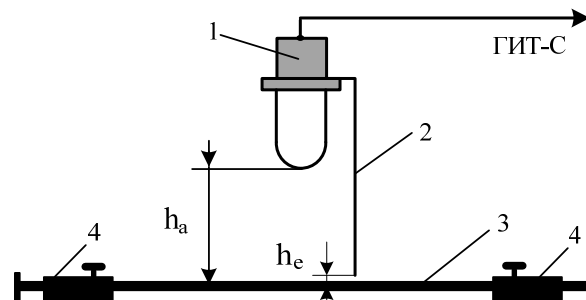


Рис. 4. Общий вид воздушной ДЭС в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-С (1 – верхний массивный цилиндрический стальной электрод; 2 – круглая тонкая медная ЭВП; 3 – нижний массивный плоский электрод, являющийся ИО металлической обшивки технического объекта; 4 – массивные прямоугольные алюминиевые электроды, предназначенные для жесткого двухстороннего закрепления в их пазах плоского ИО; h_a – длина воздушного промежутка в ДЭС; h_e – длина воздушного промежутка между нижним краем медной ЭВП и наружной плоской поверхностью ИО)

Синхронное срабатывание искровых коммутаторов F_1 и F_2 в схеме на рис. 1 осуществлялось за счет подачи через высоковольтную разделительную емкость C_d на сферический стальной электрод диаметром 30 мм коммутатора F_1 от ГВПИ микросекундного импульса напряжения амплитудой до ± 100 кВ [2, 14].

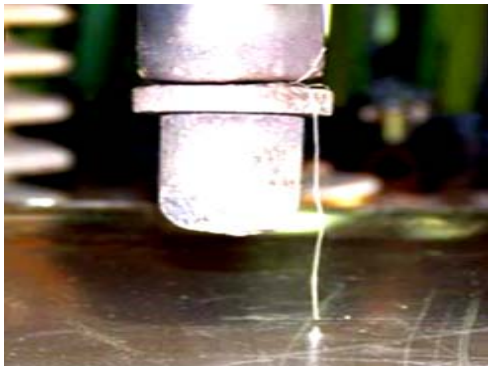


Рис. 5. Укрупненный внешний вид воздушной ДЭС с тонкой медной ЭВП на рабочем столе высоковольтного генератора ГИТ-С с мощным ЕНЭ при испытаниях в его сильноточной разрядной цепи ИО листовой металлической обшивки технического объекта на электротермическую стойкость к прямому воздействию на него длительными АВП ($h_a \approx 14$ мм; $h_e \approx 1$ мм; $r_e \approx 0,1$ мм; $l_e \approx 37$ мм) [10]

При электрическом пробое от ГВПИ воздушного рабочего промежутка искрового коммутатора F_1 и его последующем срабатывании возникающее импульсное перенапряжение на ДЭС с ИО приводит к практически одновременному с ним срабатыванию и искрового коммутатора F_2 . После срабатывания искровых коммутаторов F_1 , F_2 , электрического пробоя воздушного промежутка длиной $h_e \approx 1$ мм и электрического взрыва тонкой медной проволоочки в зоне ДЭС за счет разряда предварительно заряженных высоковольтных конденсаторов ЕНЭ генератора ГИТ-С через воздушную ДЭС и ИО металлической обшивки технического объекта начинает протекать импульс длительной С-компоненты тока искусственной молнии с требуемыми по [8, 9] АВП. Измерение АВП длительной С-компоненты тока искусственной молнии в канале электрической дуги в воздушной ДЭС и ИО металлической обшивки объекта проводилось с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [2, 14], имеющего для этого импульсного тока коэффициент преобразования $K \approx 5642$ А/В, и цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS 1012.

4. Результаты экспериментальной апробации расчетов активного сопротивления и температуры канала импульсной электрической дуги в воздушной ДЭС. Согласно данным рис. 1 и представленных выше научно-технических материалов в рассматриваемой сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С имеются две последовательно включенные в общую электросхему воздушные ДЭС: первая – непосредственно в зоне размещения ИО листовой металлической обшивки технического объекта с длиной воздушного промежутка $h_a \approx 14$ мм; вторая – в зоне искрового коммутатора F_2 с межэлектродным воздушным промежутком длиной $h_{ak} \approx 4$ мм. Именно суммарный воздушный промежуток этих двух ДЭС длиной $l_{ce} = (h_a + h_{ak})$ и будет определять минимальную суммарную длину канала импульсной электрической дуги в сильноточной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С и соответственно его минимальное общее

активное сопротивление R_{ce} . На рис. 6 приведена осциллограмма длительной С-компоненты тока искусственной молнии, протекающей через указанные воздушные ДЭС и ИО металлической обшивки объекта.

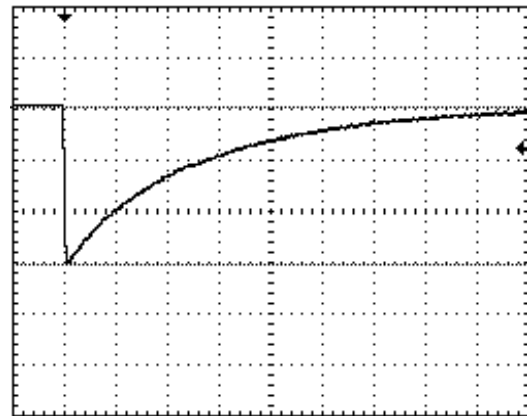


Рис. 6. Осциллограмма длительной С-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в сильноточной цепи генератора ГИТ-С при разряде его мощного ЕНЭ на воздушную ДЭС с электрически взрывающейся тонкой медной проволоочкой ($r_e = 0,1$ мм; $l_e = 37$ мм) и листовым ИО из алюминиевого сплава марки АМг2М толщиной 2 мм ($U_{cc} \approx 4,2$ кВ; $W_C \approx 400$ кДж; $I_{mdc} \approx 0,869$ кА; $t_{mdc} \approx 9$ мс; $\tau_{pdc} \approx 1000$ мс; $q_{dc} \approx 192$ Кл; масштаб по вертикали – 282 А/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка)

Из данных рис. 6 видно, что АВП используемой в опытах длительной С-компоненты тока искусственной молнии соответствуют требованиям [8, 9] и характеристикам импульсного дугового электрического разряда в указанных воздушных ДЭС. Принимая, что $\gamma_{ce} \approx 5 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹ [11], $l_{ce} \approx 18 \cdot 10^{-3}$ м и $I_{mdc} \approx 869$ А, из (4) находим, что в рассматриваемом опытном случае суммарное эквивалентное активное сопротивление плазменного канала импульсной электрической дуги в исследуемых воздушных ДЭС будет составлять не менее $R_{ce} \approx 0,327$ Ом. Полученное расчетное значение R_{ce} будет составлять до 7 % от собственного активного сопротивления R_C разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С. С учетом данных, полученных в [6], можно заключить, что при одинаковых значениях l_{ce} и усредненной удельной электропроводности плазмы, равной $\gamma_{ce} \approx 5 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹, в воздушной ДЭС атмосферного давления сильноточной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ эквивалентное активное сопротивление канала импульсного дугового электрического разряда при $I_{mdc} \approx 0,869$ кА ($t_{mdc} \approx 9$ мс; $\tau_{pdc} \approx 1$ с) будет примерно в 100 раз больше эквивалентного активного сопротивления канала импульсного искрового электрического разряда при $I_{md} \approx 202$ кА ($t_{md} \approx 36$ мкс; $\tau_{pd} \approx 0,5$ мс). Объясняется такой полученный результат для R_{ce} тем, что при указанных АВП миллисекундного (с амплитудой I_{mdc}) и микросекундного (с амплитудой I_{md}) токов в воздушной ДЭС максимальный радиус по (3) $r_{cem} \approx 3,24$ мм канала импульсного дугового электрического разряда оказывается при прочих равных условиях практически на порядок меньше максимального радиуса $r_{cm} \approx 32,7$ мм канала импульсного искрового электрического разряда, удовлетворяющего для больших токов микросекундной длительности формуле Брагинского [1, 7, 16].

При $U_{ac} \approx U_a \approx 11$ В из формулы (5) получаем, что в рассматриваемом сильноточном эксперименте с применением мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С максимальная электронная температура T_{me} равновесной электронно-ионной плазмы в цилиндрическом канале импульсного дугового разряда в исследуемой воздушной ДЭС для коммутатора типа ВДВК-10 ($l_{ce} \approx 4$ мм) составляет примерно 11250 К. Видно, что полученное расчетное численное значение электронной температуры T_{me} плазмы в ярко светящемся столбе (канале) импульсной электрической дуги вблизи графитового анода указанной воздушной ДЭС хорошо согласуется с известными термодинамическими данными, характерными для приосевой области классического дугового разряда, протекающего в воздушной ДЭС с графитовыми электродами при атмосферном давлении и силе тока 200 А [4, 5]. Укажем, что при этом согласно [5] в приосевой зоне «угольной» («графитовой») дуги ($l_{ce} \approx 46$ мм), свободно «горящей» в воздушной ДЭС, температура ее равновесной плазмы составляет около 10^4 К, а вблизи катода – $1,2 \cdot 10^4$ К.

Выводы.

1. Получено новое соотношение (4) для приближенного расчета эквивалентного активного сопротивления R_{ce} плазменного канала импульсной электрической дуги в воздушной ДЭС сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ испытательной электрофизической установки, генерирующей длительную С- компоненту тока искусственной молнии.

2. Для расчетной оценки максимальной электронной температуры T_{me} в равновесной электронно-ионной низкотемпературной плазме импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС с металлическими (графитовыми) электродами примененного в описанных опытах мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С электротехникам рекомендуется использовать приближенную формулу (5).

3. Проведенные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сильноточные эксперименты на мощном высоковольтном ЕНЭ генератора ГИТ-С, воспроизводящем на низкоомной активно-индуктивной нагрузке длительную С- компоненту тока искусственной молнии с нормированными АВП согласно действующих требований нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013, подтвердили работоспособность предлагаемых расчетных соотношений (4) и (5) для определения электро- и теплофизических величин R_{ce} и T_{me} в плазменном канале импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
6. Баранов М.И. Приближенный расчет активного сопротивления плазменного канала искрового разряда в высоковольтном сильноточном воздушном коммутаторе атмосферного давления // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2017. – №15(1237). – С. 5-11.
7. Баранов М.И., Рудаков С.В. Приближенный расчет энерговыделения и электрической эрозии электродов в высоковольтном сильноточном воздушном коммутаторе атмосферного давления // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №3. – С. 32-39. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.05.
8. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
9. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
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. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
12. 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.
13. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
14. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Nosenko M.A. High-voltage high-current air-filled spark gaps of an artificial-lightning-current generator // Instruments and Experimental Techniques. – 2008. – vol.51. – no.6. – pp. 833-837. doi: 10.1134/s0020441208060109.
15. Баранов М.И., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 47-52. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.08.
16. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.

REFERENCES

1. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shikh impul'snykh tokov i magnitnykh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
2. 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.
3. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriia elektrofizicheskikh effektiv i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).

5. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).
6. Baranov M.I. A close calculation of active resistance of plasma channel of a spark digit is in the high-voltage heavy-current air switchboard of atmospheric pressure. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Technique and electrophysics of high voltage»*, 2017, no.15(1237), pp. 5-11. (Rus).
7. Baranov M.I., Rudakov S.V. An approximate calculation of energy dissipation and electric erosion of electrodes in the high-voltage high-current air switch of atmospheric pressure. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.3, pp. 32-39. doi: **10.20998/2074-272X.2017.3.05**.
8. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
9. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
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. *Izbrannye 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).
12. 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).
13. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevsky M.N., Ermuratsky V.V., Kuchinsky G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Spravochnik* [The electrical capacitors and condenser options. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 656 p. (Rus).
14. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Nosenko M.A. High-voltage high-current air-filled spark gaps of an artificial-lightning-current generator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol.51, no.6, pp. 833-837. doi: **10.1134/s0020441208060109**.
15. Baranov M.I., Rudakov S.V. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy from emergency currents. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 47-52. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.6.08**.
16. Lozanskiy E.D., Firsov O.B. *Teoriya iskry* [Theory of spark]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 272 p. (Rus).

Поступила (received) 20.04.2017

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

Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,

¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841,

e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

² Национальный университет гражданской защиты Украины,

61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

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

M.I. Baranov¹, S.V. Rudakov²

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

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

Approximate calculation of active resistance and temperature of the pulse electric arc channel in a high-current discharge circuit of a powerful high-voltage capacitor energy storage.

Purpose. To obtain calculation correlations for active resistance R_{ce} and maximal temperature T_{me} of plasma channel of pulse electric arc in the air double-electrode system (DES) with metal (graphite) electrodes, and also practical approbation of the obtained correlations for R_{ce} and T_{me} in the conditions of high-voltage laboratory on the powerful capacity energy storage (CES) of electric setting, intended for reproducing on the electric loading of protracted C- component of current of artificial lightning with the USA rationed on normative documents by amplitude-temporal parameters (ATP). **Methodology.** Electrophysics bases of high-voltage impulse technique, scientific and technical bases of development and creation of high-voltage high-current impulse electrical equipment, including powerful CES, and also measuring methods in discharge circuits of powerful high-voltage CES of pulse currents of millisecond temporal range. **Results.** On the basis of engineering approach the new results of approximate calculation of values of R_{ce} and T_{me} are resulted in the plasma channel of pulse electric arc discharge in air DES of atmospheric pressure with metallic (graphite) electrodes. Practical approbation of results of calculation of values of R_{ce} and T_{me} is executed as it applies to air DES, to connected in a discharge circuit of powerful high-voltage CES with protracted C- of component current of artificial lightning, characterized rationed ATP. It is shown that calculation of numeral value R_{ce} approximately in 100 times exceeds the proper value of active resistance for the plasma channel of impulsive spark of electric discharge in air DES other things being equal, and a calculation of numeral value T_{me} well corresponds with the known thermodynamics information for classic electric arc in air DES of atmospheric pressure with graphite electrodes. **Originality.** New engineering approach is developed for the approximate calculation of values of R_{ce} and T_{me} in electron-ion plasma of channel of pulse electric arc, arising in air DES of high-current discharge circuit of powerful high-voltage CES of proof-of-concept of electric setting of the technological setting. A formula is first obtained for the approximate calculation of equivalent active resistance of R_{ce} of channel of pulse electric arc in air DES, remaining unchanging in the process of high-current discharge on RL- load of indicated CES. **Practical value.** Drawing on the got calculation results for the values of R_{ce} and T_{me} in high-voltage impulse technique provides the rational choice of own electric parameters and construction elements of basic devices of powerful high-voltage CES of technological of electric setting, and also account of influence of electrical engineering descriptions of air DES on electromagnetic processes, taking place in the high-current discharge circuit of indicated CES with protracted C- of component current of artificial lightning. References 16, figures 6.

Key words: powerful high-voltage capacitor energy storage, air double-electrode system, pulse electric arc, active resistance of pulse electric arc channel, maximal temperature of pulse electric arc channel.

Н.И. Бойко, А.В. Макогон

ГЕНЕРАТОР ПО СХЕМЕ АРКАДЬЕВА – МАРКСА С ПОКАСКАДНЫМ ОБОСТРЕНИЕМ ФРОНТА ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Мета. Експериментально отримати на навантаженні генератора імпульсних напруг величиною менше 50 Ом у вигляді більш, ніж двох робочих камер з водовмісним продуктом тривалість фронту імпульсів високої напруги менше 1,5 наносекунд, що підвищує ефективність знезараження оброблюваних продуктів. *Методика.* Для одержання високовольтних імпульсів на робочих камерах – навантаженні генератора застосована методика генерування імпульсів за схемою Аркадьєва – Маркса. Імпульси на навантаженні вимірювалися за допомогою низькоомного резистивного діляника напруги, передавалися по широкосмуговому коаксіальному кабелю і реєструвалися за допомогою осцилографа С7-19 зі смугою пропускання 5 ГГц. Робочі камери заповнювалися водою і складалися з кільцевидного корпусу, який виконано з фторопласту, і металевих електродів, що утворюють дно та кришку камери, мають плоскі накладки з харчової неіржавіючої сталі для контакту з харчовим продуктом усередині камери. *Результати.* Високовольтні імпульси на навантаженні генератора приблизно 50 Ом і менше мають трапецієвидну форму з закругленою вершиною і тривалість по основі не більше 80 нс. Експериментально одержані амплітуди імпульсів на навантаженні генератора – до 18 кВ. При зменшенні опору навантаження амплітуда імпульсів зменшується, а тривалість фронту і імпульсів у цілому скорочується із-за прискореного розряду ємнісних нагромаджувачів каскадів. *Наукова новизна.* Вперше на навантаженні генератора у вигляді трьох паралельно включених робочих камер з водою, активний опір кожної з котрих менше, ніж 50 Ом, експериментально отримано тривалість фронту імпульсів $t_f \approx 1$ нс. Крім того, налагоджено стабільний 9-10 каналний режим спрацювання вихідного розрядника тригатронного типу в п'ятикаскадному генераторі імпульсних напруг з покаскадним загостренням фронту імпульсів (ГІНПЗ). *Практична значущість.* Одержана експериментально наносекундна тривалість фронту імпульсів на навантаженні ГІНПЗ відкриває перспективу промислового застосування таких генераторів для мікробіологічно знезаражувальної обробки (інактивації мікроорганізмів) водовмісних харчових продуктів. Бібл. 6, рис. 8.

Ключові слова: генератор імпульсних напруг, покаскадне загострення фронту імпульсів, робоча камера, ємнісний нагромаджувач, розрядник, інактивація мікроорганізмів в харчових продуктах.

Цель. Експериментально получить на нагрузке генератора импульсных напряжений величиной менее 50 Ом в виде более двух рабочих камер с водосодержащим продуктом длительность фронта импульсов высокого напряжения менее 1,5 наносекунд, что повышает эффективность обеззараживания обрабатываемых продуктов. *Методика.* Для получения высоковольтных импульсов на рабочих камерах - нагрузке генератора применена методика генерирования импульсов по схеме Аркадьева – Маркса. Импульсы на нагрузке измерялись при помощи низькоомного резистивного делителя напряжения, передавались по широкополосному коаксиальному кабелю и регистрировались при помощи осциллографа С7-19 с полосой пропускания 5 ГГц. Рабочие камеры заполнялись водой и состояли из кольцеобразного корпуса, выполненного из фторопласта, и металлических электродов, образующих дно и крышку камеры, имеющих плоские накладки из пищевой нержавеющей стали для контакта с пищевым продуктом внутри камеры. *Результаты.* Высоковольтные импульсы на нагрузке генератора примерно 50 Ом и менее имеют трапециевидную форму со скругленной вершиной и длительность по основанию не более 80 нс. Экспериментально полученные амплитуды импульсов на нагрузке генератора – до 18 кВ. При уменьшении сопротивления нагрузки амплитуда импульсов уменьшается, а длительность фронта и импульсов в целом укорачивается из-за ускоренного разряда емкостных накопителей каскадов. *Научная новизна.* Впервые на нагрузке генератора в виде трех параллельно включенных рабочих камер с водой, активное сопротивление каждой из которых менее 50 Ом, экспериментально получена длительность фронта импульсов $t_f \approx 1$ нс. Кроме того, отлажен стабильный 9-10 каналный режим спрабатывания выходного разрядника тригатронного типа в пятикаскадном генераторе импульсных напряжений с покаскадным обострением фронта импульсов (ГИНПО). *Практическая значимость.* Полученная экспериментально наносекундная длительность фронта импульсов на нагрузке ГИНПО открывает перспективу промышленного применения таких генераторов для микробиологически обеззараживающей обработки (инактиваации микроорганизмов) водосодержащих пищевых продуктов. Библ. 6, рис. 8.

Ключевые слова: генератор импульсных напряжений, покаскадное обострение фронта импульсов, рабочая камера, разрядник, инактиваация микроорганизмов в пищевых продуктах.

Введение. Генераторы по схеме Аркадьєва-Маркса широко используются в высоковольтной импульсной технике [1]. Благодаря возможности получать наносекундные фронты при напряжении 100 кВ и больше на нагрузке таких генераторов [2], частотах следования 200 импульсов в секунду и более они перспективны для обеззараживающей обработки жидких водосодержащих продуктов.

Обработка продуктов импульсными электрическими полями (ИЭП) с наносекундными фронтами позволяет лучше, чем при использовании традиционных тепловых методов, сберечь исходное качество

пищевых продуктов при уменьшении удельных энергозатрат на инактиваацию микроорганизмов в них [3, 4]. В методе ИЭП, или комплексе высоковольтных импульсных воздействий (КВИВ), используются короткие электрические импульсы, которые можно получить при помощи генераторов Аркадьєва – Маркса. Обеззараживающая обработка ведется в рабочих камерах с обрабатываемым продуктом, которые являются нагрузкой для генераторов высоковольтных импульсов. Типичная длительность импульсов напряженности сильного импульсного электрического поля

© Н.И. Бойко, А.В. Макогон

в рабочих камерах может варьироваться от 50 нс до 1 мкс, амплитуда – от 5 кВ/см до 200 кВ/см без пробоев. Несколько рабочих камер с водосодержащим продуктом, подключенных к выходу генератора, являются низкоомной нагрузкой для генератора, которая может не превышать 50 Ом и может привести к нежелательному удлинению фронта импульсов напряжения. В [5] предложен способ обработки жидкостей и текучих продуктов в нескольких рабочих камерах, позволяющий избежать нежелательного удлинения фронта благодаря использованию обострителей фронта импульсов. Генераторы импульсных напряжений Аркадьева – Маркса в режиме покаскадного обострения фронта импульсов (ГИНПО) позволяют на практике решить

проблему нежелательного удлинения фронта. В данной работе проведена экспериментальная проверка работы ГИНПО на нагрузку не более 50 Ом в виде трех рабочих камер с водой, включенных параллельно, без удлинения фронта импульсов на нагрузке.

Цель работы – экспериментально получить на нагрузке генератора менее 50 Ом в виде более двух рабочих камер с водосодержащим продуктом длительность фронта импульсов высокого напряжения менее 1,5 наносекунд, что повышает эффективность обеззараживания обрабатываемых продуктов.

Экспериментальная установка. Схема установки приведена на рис. 1.

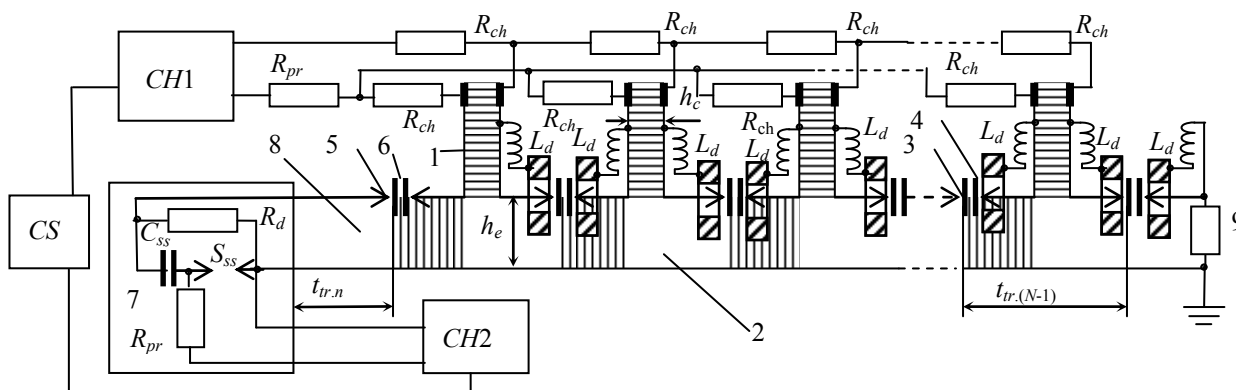


Рис. 1. Схема установки с генератором импульсных напряжений с покаскадным обострением фронта импульсов

На рис. 1 заштрихованы предварительно заряженные до напряжения U_{main} участки энергопровода и емкостные накопители; N – количество каскадов; 1 – емкостный накопитель каскада с емкостью C_{st} , который может представлять собой длинную линию с распределенными параметрами; 2 – энергопровод – широкополосная однородная длинная линия с распределенными параметрами с расстоянием h_e между прямым и обратным токопроводами с волновым сопротивлением z_e ; 3 – разрядник каскада; 4 – емкость (C_{gap}) между электродами разрядника 3; 5 – стартовый разрядник ГИНПО; 6 – емкость ($C_{gap.o}$) между электродами разрядника 5; 7 – система (устройство) запуска; 8 – длинная линия передачи с волновым сопротивлением $Z_n=Z_e$ между устройством 7 и стартовым разрядником 5; 9 – нагрузка с импедансом Z_{load} ; $t_{tr.n}$ и $t_{tr.k}$ соответственно время пробега электромагнитной волны по линии 8 и между двумя соседними разрядниками каскадов; k – номер каскада ($k=1, 2, \dots, N$); h_e – длина разрыва в прямом токопроводе, в который (разрыв) включен емкостный накопитель k -го каскада. $R_{pr}=1$ МОм, $R_{ch}=3,2$ кОм, $R_d=1440$ Ом, $L_d \approx 0,5$ мкГн.

Оба зарядных устройства $CH1$ и $CH2$ собраны по схеме умножения Кокрофта [6] и запитываются от повышающих трансформаторов, на вход которых подается регулируемое переменное напряжение от системы управления CS . Устройство запуска 7 содержит керамический конденсатор K15-10 емкостью 10 нФ (C_{ss}) и двухэлектродный искровой разрядник S_{ss} , срабатывающий от перенапряжения (на самопробое).

В ГИНПО, на котором проведены эксперименты, 5 каскадов. Емкостные накопители каскадов

$C_{st}=3 \times 10^{-9}$ Ф выполнены в виде низкоомных полосковых линий (которые при заряде можно рассматривать как плоские конденсаторы) из фольгированного стеклотекстолита, высотой и шириной обкладок по 0,45 м, толщиной диэлектрика $h_e=5$ мм.

Энергопровод данного ГИНПО выполнен в виде реальной полосковой линии с расстоянием между прямым и обратным токопроводом $h_e=50$ мм [2]. Обратный токопровод представляет собой латунный лист длиной 1 м, шириной 0,4 м, толщиной 1 мм. На него положен лист оргстекла толщиной 8 мм. Остальное пространство между прямым и обратным токопроводом заполнено воздухом при атмосферном давлении.

Общий вид пятикаскадного генератора импульсных напряжений с покаскадным обострением фронта формируемых импульсов, на котором проведены эксперименты, представлен на рис. 2.

Разрядники каскадов – тригatronного типа с воздушным заполнением при атмосферном давлении. Каждый из двух электродов разрядника выполнен в виде металлической пластины, закрепленной на опоре из оргстекла, толщиной 5 мм, в которой выполнено 10 отверстий на равных расстояниях друг от друга. В эти отверстия вставлено 10 игольчатых электродов, соединенных накоротко с соответствующей обкладкой емкостного накопителя каскада ГИНПО и через индуктивность $L_d \approx 0,5$ мкГн – с пластиной.

Межэлектродные промежутки в разрядниках регулируются по длине. Такая конструкция разрядников обеспечивает однородное электрическое поле в них при заряде каскадов ГИНПО и резконеоднородное

поле при разряде. Поэтому при разряде ГИНПО искровые каналы образуются только между соответствующими двумя игольчатыми электродами, расположенными встречно на одной оси. В каждом из разрядников каскадов может образоваться при разряде от 1 до 10 искр.



Рис. 2. Общий вид ГИНПО

Нагрузка 9 (рис. 1) в ходе экспериментов варьировалась: выполнялась в виде 10 резисторов ТВО-10 номинальным сопротивлением 560 Ом каждый (измеренная величина сопротивлений составляла от 580 до 630 Ом), в виде одной рабочей камеры с водой, трех рабочих камер с водой. Нагрузочные резисторы и рабочие камеры подключались к соответствующим острийным электродам десятиканального выходного разрядника ГИНПО.

Экспериментальная установка работает следующим образом. При помощи системы управления *CS* через *СН1* заряжаются емкостные накопители каскадов ГИНПО, а затем через *СН2* заряжается емкостный накопитель C_{ss} системы запуска до самопробоя S_{ss} . Уровень заряда контролируется киловольтметрами С-196.

Предварительно емкостные накопители 1 каскадов генератора заряжаются до напряжения U_{main} (рис. 1). В общем случае зарядка может быть как выпрямленным напряжением, так и импульсной. После предварительной зарядки единственным разрядником, на котором отсутствует «дежурное» напряжение U_{main} , является разрядник на выходе ГИНПО, он же – разрядник последнего N -го каскада. После зарядки каскадов от устройства запуска 7 на стартовый разрядник 5 по линии 8 подается инициирующий разряд генератора импульс напряжения с амплитудой U_{ivp} , обеспечивающий время его коммутации $t_{sw,0}$ и длительность фронта $t_{f,0}$ формируемого импульса меньшими времени $2t_{tr,0}$ двойного пробега электромагнитной волны между стартовым разрядником и разрядником первого каскада. Разрядники ГИНПО срабатывают последовательно, начиная со стартового, срабатывающего от управляющего импульса из системы запуска, и заканчивая выходным разрядником с наименьшим временем коммутации.

Начало спада импульсного напряжения на нагрузке генератора ГИНПО сразу после нарастания напряжения на ней до величины A_N [2]:

$$A_N = \left(NU_{main} + 2U_{ivp} \right) \frac{Z_{load}}{Z_{load} + Z_e}, \quad (1)$$

или

$$A_N = 2A_{N-1} \frac{Z_{load}}{Z_{load} + Z_e}, \quad (2)$$

где Z_{load} – импеданс нагрузки, обеспечивается тем, что возможные отражения от устройства 7 запуска, могущие привести к медленному нарастанию амплитуды напряжения на нагрузке до $2 \times A_N$, компенсируются разрядом емкостей каскадов, а также тем, что устройство запуска отделено от собственно ГИНПО линией передачи 8 с соответствующим временем пробега электромагнитной волны по ней. Количество каскадов в данном ГИНПО $N=5$.

Согласно (1) при $U_{main}=6$ кВ, $U_{ivp}=12$ кВ, $Z_{load} = 50$ Ом, $Z_e=50$ Ом $A_N=(5 \times 6 + 2 \times 12) \times 50 / (50 + 50) = 27$ кВ.

Результаты исследований. Исследование характеристик импульсов на различных нагрузках ГИНПО проводилось при помощи низкоомного резистивного делителя напряжения, подключенного к нагрузке генератора, регистрирующего осциллографа С7-19 с полосой пропускания 5 ГГц и широкополосного коаксиального кабеля с волновым сопротивлением $Z_c=50$ Ом, соединяющего экранированное низковольтное плечо делителя с входом осциллографа через аттенуатор 20 dB. Осциллограф располагался в измерительной кабине, защищающей его от электромагнитных помех.

Сопротивление высоковольтного плеча делителя $R_1 = 560$ Ом – один из нагрузочных резисторов ТВО-10 в ГИНПО, сопротивление низковольтного плеча $R_2 = 3$ Ом набрано из параллельно включенных резисторов ТВО – 0,5 (рис. 3). Низковольтное плечо делителя и согласующее сопротивление $R_3=50$ Ом расположены в экранирующем металлическом корпусе цилиндрической формы с фланцем, соединенном накоротко с обратным токопроводом генератора. Кабель подключен к низковольтному плечу делителя при помощи коаксиального разъема.

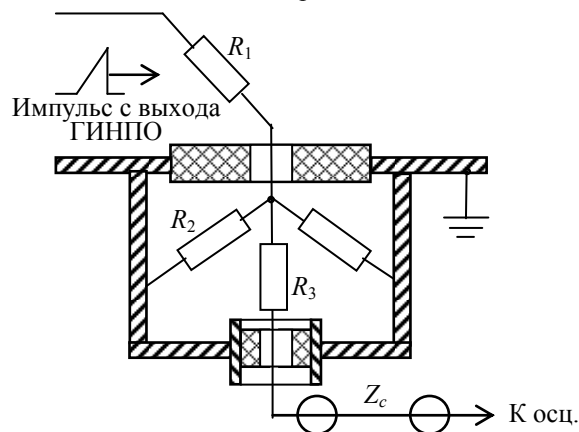


Рис. 3. Схема резистивного делителя напряжения на выходе ГИНПО

С учетом того, что входное сопротивление осциллографа С7-19 составляет 50 Ом, коэффициент деления делителя $K_d = [(R_1+R_2)/R_2] \times (R_3+Z_c)/Z_c = [(560+3)/3] \times (50+50)/50 \approx 375$ (Ом). Между входом осциллографа С7 – 19 и концом кабеля с разъемом вставлялся аттенуатор 20 dB, ослабляющий приходящий по кабелю сигнал в 10 раз.

Поэтому общий коэффициент деления $K_{d\ total} \approx 3750$. Чувствительность осциллографа С7-19 составляет $1,6\text{ В/дел} = 1,6\text{ В/см}$.

Выходной многоканальный разрядник ГИНПО при амплитуде зарядного напряжения высоковольтного емкостного накопителя системы управления, превышающей в два раза и более амплитуду зарядного напряжения основных накопителей каскадов ГИНПО, стабильно срабатывает в 9-10 канальном режиме (10 – максимально возможное количество каналов разряда в разряднике). Этот режим при работе ГИНПО на резистивную нагрузку в виде десяти резисторов ТВО-10 с номинальным сопротивлением 560 Ом каждый иллюстрирует рис. 4. После формирования десяти каналов в выходном разряднике все десять нагрузочных резисторов соединены параллельно.

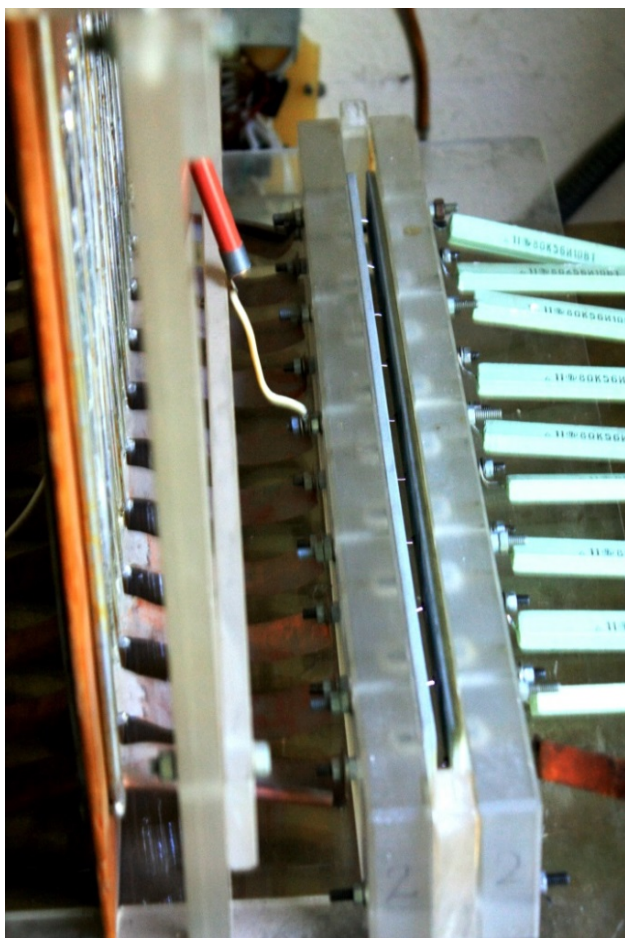


Рис. 4. Фото многоканального искрового разряда в выходном разряднике ГИНПО

Отметим, что яркость каналов разряда примерно одинакова, что свидетельствует о том, что ток по каналам разряда распределяется достаточно равномерно. Получены осциллограммы импульсов с наносекундными фронтами на нагрузке ГИНПО в виде резисторов ТВО-10, одной рабочей камеры, трех рабочих камер. Форма импульсов на нагрузке близка к трапециoidalной, что иллюстрирует рис. 5.

Из осциллограмм на рис. 5 видно, что фронт импульсов содержит две части: первую (начальную) крутую часть и вторую (ближе к вершине) более

пологую. Это свидетельствует о том, что в разрядниках ГИНПО в данном конкретном режиме имеет место не полное, частичное обострение фронта формируемых импульсов. Из-за наличия пологой части общая длительность фронта t_f импульсов составляет примерно $t_f \approx 20\text{ нс}$. Пологая часть фронта импульсов имеет место также вследствие отражений электромагнитных волн, вызванных срабатыванием разрядников, от различных неоднородностей в энергопроводе ГИНПО и в системе запуска. Длительность импульсов по основанию составляет примерно 80 нс , амплитуда – 18 кВ . Это в 1,5 раза меньше, чем приведенная выше расчетная амплитуда.

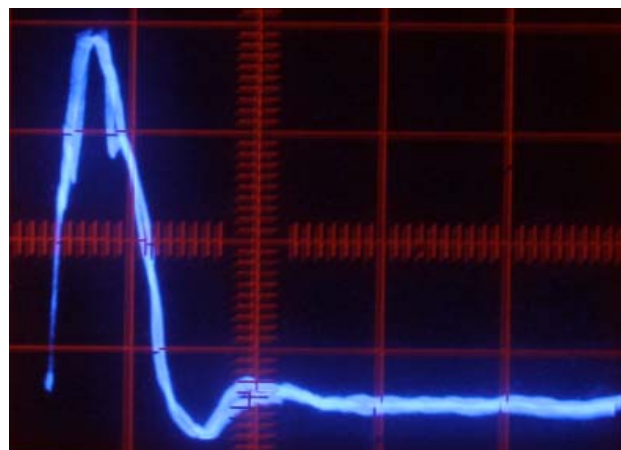


Рис. 5. Осциллограммы (наложено две осциллограммы) импульсов напряжения на нагрузке в виде 10 резисторов ТВО-10 по 560 Ом : цена деления по оси времени 100 нс/дел , по оси процесса 6 кВ/дел

Меньшие значения экспериментально полученной амплитуды, по сравнению с расчетной амплитудой, объясняются удлинением фронта за счет неполного его обострения разрядниками каскадов, недостаточного согласования волнового сопротивления энергопровода ГИНПО с его резистивной нагрузкой, появляющихся из-за этого нежелательных отражений напряжения в ГИНПО и достаточно быстрым разрядом емкостных накопителей ГИНПО.

Осциллограмма на рис. 6 иллюстрирует форму напряжения на нагрузке в виде одной рабочей камеры и пяти резисторов ТВО-10 по 560 Ом .

Из осциллограммы на рис. 6 следует, что длительность фронта импульса составляет примерно $2,5\text{ нс}$, а амплитуда 12 кВ . Амплитуда уменьшилась из-за того, что нагрузка стала более низкоомной после подключения рабочей камеры с водой (см. также формулу (1)). Кольцеобразный корпус рабочей камеры выполнен из фторопласта, а металлические электроды, образующие дно и крышку камеры, имеют плоские накладки из пищевой нержавеющей стали для контакта с пищевым продуктом внутри камеры.

Рабочий объем рабочей камеры, заполненный водой, имеет дисковую форму с диаметром $D = 90\text{ мм}$ и высотой $h = 15\text{ мм}$. При удельном объемном сопротивлении воды $\rho = 10\text{ Ом}\times\text{м}$ активное сопротивление R_w воды в рабочей камере составляет $R_w = \rho h / (\pi D^2 / 4) = 10 \times 0,015 / (3,14 \times 0,09^2 / 4) \approx 23,6\text{ Ом}$.

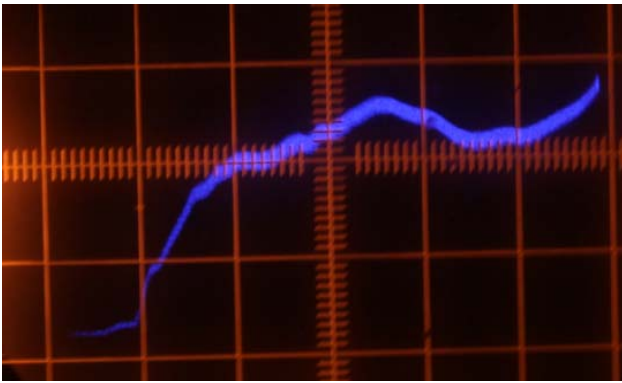


Рис. 6. Осциллограмма фронтальной части импульса напряжения на нагрузке ГИНПО в виде одной рабочей камеры, включенной в параллель с пятью нагрузочными резисторами ТВО-10; цена деления по оси времени 2,5 нс/дел, по оси процесса – 6 кВ/дел

В связи с уменьшением сопротивления нагрузки емкостные накопители каскадов стали разряжаться быстрее, что в свою очередь привело к уменьшению амплитуды. При этом вклад необостренной части в длительность фронта импульса на нагрузке значительно уменьшился, и фронт укоротился до $\approx 2,5$ нс.

При подключении в качестве нагрузки трех рабочих камер (см. рис. 7) амплитуда напряжения на них становится еще меньше (см. рис. 8), чем на одной рабочей камере.

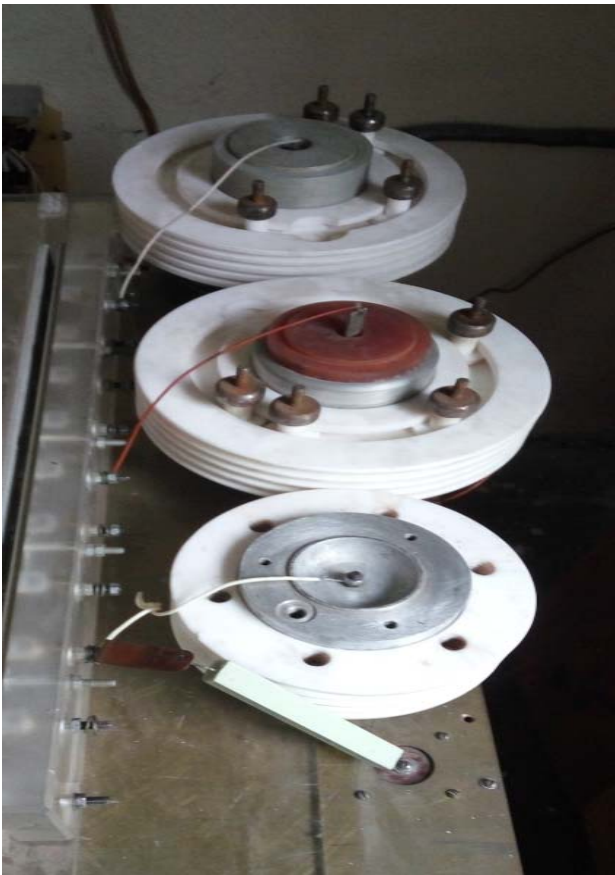


Рис. 7. Нагрузка ГИНПО в виде трех рабочих камер с водой

Из осциллограммы на рис. 8 следует, что длительность фронта импульса на нагрузке составляет примерно 1 нс, а амплитуда – примерно 8 кВ.

Для увеличения напряженности импульсного электрического поля в рабочих камерах и напряжения на них без удлинения фронта импульсов следует увеличить зарядные напряжения емкостных накопителей от зарядных устройств $CH1$ и $CH2$, увеличив при этом соответствующим образом зазоры в разрядниках ГИНПО.

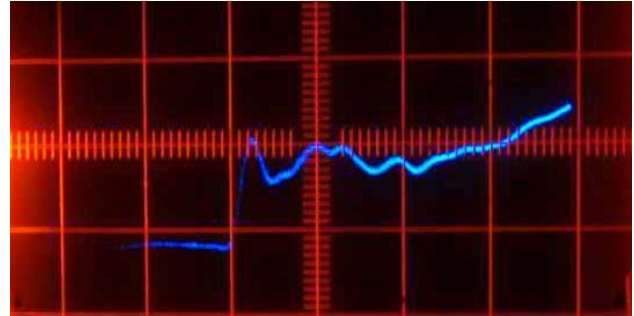


Рис. 8. Осциллограмма фронтальной части импульса напряжения на нагрузке ГИНПО в виде трех рабочих камер, включенных в параллель между собой и с нагрузочным резистором ТВО-10; цена деления по оси времени 2,5 нс/дел, по оси процесса – 6 кВ/дел

Показанная экспериментально (см. рис. 8) возможность получения на нескольких рабочих камерах, включенных параллельно, напряжений, а, следовательно, и напряженностей импульсного электрического поля с рекордно коротким фронтом (примерно 1 нс) открывает перспективу уменьшения удельных энергозатрат на микробиологически обеззараживающую обработку водосодержащих пищевых продуктов, увеличения сроков их хранения без ухудшения потребительской ценности. А, следовательно, и перспективу промышленного применения ГИНПО.

Выводы.

1. Предложен метод укорочения фронта импульсов в рабочих камерах для инактивирующей микроорганизмы обработки пищевых продуктов за счет использования генераторов импульсных напряжений по схеме Аркадьева – Маркса в режиме покаскадного обострения фронта импульсов.

2. Экспериментально получена длительность фронта $t_f \approx 1$ нс импульсов на нагрузке ГИНПО в виде трех параллельно включенных рабочих камер с водой, активное сопротивление каждой из которых менее 50 Ом. Такая короткая длительность фронта импульсов подтверждает, что генераторы – ГИНПО перспективны для микробиологически обеззараживающей обработки водосодержащих пищевых продуктов (инактивации микроорганизмов в продуктах).

3. Отлажен стабильный 9-10 канальный режим срабатывания выходного разрядника пятикаскадного генератора – ГИНПО.

4. Импульсы на нагрузке измерены при помощи низкоомного резистивного делителя напряжения, в качестве передающей линии использован широкополосный коаксиальный кабель, подключенный к регистрирующему устройству - осциллографу С7-19 с полосой пропускания 5 ГГц.

5. Используются рабочие камеры, выполненные в виде кольцеобразного корпуса из фторопласта и металлических электродов, образующих дно и крышку

камеры, имеющих плоские накладки из пищевой нержавеющей стали для контакта с пищевым продуктом внутри рабочего объема. Камеры заполнялись водой.

6. Высоковольтные импульсы на нагрузке ГИНПО примерно 50 Ом и менее имеют трапециевидную форму с длительностью по основанию не более 80 нс, экспериментально полученные амплитуды импульсов на нагрузке – до 18 кВ. При уменьшении сопротивления нагрузки амплитуда импульсов уменьшается, а длительность фронта и импульсов в целом укорачивается. Укорочение фронта происходит вследствие того, что пологая (медленная) часть фронта импульсов, имеющая место вследствие отражений электромагнитных волн, вызванных срабатыванием разрядников, от различных неоднородностей в энергопроводе ГИНПО и в системе запуска, убирается частично или полностью ускоренным разрядом емкостных накопителей каскадов на нагрузку с уменьшенным сопротивлением.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Бойко Н.И. Генератор по схеме Аркадьева-Маркса в режиме с покаскадным обострением фронта импульсов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2000. – Частина 6. – С. 94-97.
3. Barbosa-Canovas G.V., Gongora-Nieto M.M., Pothakamury U.R., Swansson B.G. Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields. – Washington, San Diego, Academic Press Publ., 1999. – 200 p. doi: 10.1016/b978-0-12-078149-2.x5000-4.
4. Jasim Ahmed, Hosahalli S. Ramaswamy, Stefan Kasapis, Joyce I Boye. Novel Food Processing: Effects on Rheological and Functional Properties. – CRC Press Publ., 2016. – 510 p. Chapter 11. Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology by Maged E.A. Mohamed and Ayman H. Amer Eissa. – 2012. – pp. 275-306. doi: 10.5772/48678.
5. Пат. 113592 Україна, МПК (2016.01) C02F 1/48(2006.01). Спосіб обробки рідин і текучих продуктів / М.І. Бойко, А.В. Макогон. – Опубл. 10.02.2017, бюл. № 3.
6. М. Бейер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгль. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / Пер. с нем. И.П. Кужекина / Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.

REFERENCES

1. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
2. Boyko N.I. Generator on Arcadyev-Marx scheme in the mode with peaking of the pulse front in its cascades for food disinfecting. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki»*, 2000, part 6, pp. 94-97. (Rus).
3. Barbosa-Canovas G.V., Gongora-Nieto M.M., Pothakamury U.R., Swansson B.G. *Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields*. – Washington, San Diego, Academic Press Publ., 1999. – 200 p. doi: 10.1016/b978-0-12-078149-2.x5000-4.
4. Jasim Ahmed, Hosahalli S. Ramaswamy, Stefan Kasapis, Joyce I Boye. *Novel Food Processing: Effects on Rheological and Functional Properties*. CRC Press Publ., 2016. 510 p. Chapter 11. *Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology* by Maged E.A. Mohamed and Ayman H. Amer Eissa. 2012. pp. 275-306. doi: 10.5772/48678.

5. Boyko N.I., Makogon A.V. *Sposib obrobky ridyn i tekuchykh produktiv* [The method of treatment liquids and fluid products]. Patent UA, no. 113592, 2017. (Ukr).

6. Beier M., Bek V., Meller K., Tsaengl V. *Tekhnika vysokikh napriazhenii: teoreticheskie i prakticheskie osnovy primeneniia* [Technics of high voltages. Theoretical and practical application bases]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 555 p. (Rus).

Поступила (received) 08.06.2017

Бойко Николай Иванович¹, д.т.н., проф.,
Макогон Артём Витальевич¹,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076245, e-mail: qnaboyg@gmail.com

M.I. Boyko¹, A.V. Makogon¹

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

Generator on Arcadyev-Marx scheme with peaking of the pulse front in its cascades for food disinfecting.

Purpose. To obtain experimentally that the duration of the high-voltage pulse front is less than 1.5 nanoseconds on the load of a pulse voltage generator of less than 50 ohms in the form of more than two working chambers with a water-containing product. That increases the efficiency of disinfection of treated products.

Methodology. To obtain high-voltage pulses in working chambers - the generator load - the pulse generation method was used according to the Arkadyev-Marx scheme. The pulses on the load were measured with a low-ohm resistive voltage divider, transmitted over a broadband coaxial cable, and recorded using a C7-19 oscilloscope with a 5 GHz bandwidth. The working chambers were filled with water and consisted of an annular body made of PTFE 4 and metal electrodes forming the bottom and the chamber cover having flat linings of food stainless steel for contact with the food product inside the chamber. **Results.** The high-voltage pulses on the generator load of about 50 Ohm or less have a trapezoidal shape with a rounded apex and a base duration of no more than 80 ns. The experimentally obtained pulse amplitudes on the generator load are up to 18 kV. As the load resistance decreases, the amplitude of the pulses decreases, and the duration of the front and pulse duration in general are shortened because of the accelerated discharge of cascade capacitive storages. **Originality.** For the first time we have obtained experimentally on the load of the generator in the form of three parallel working chambers with water, the active resistance of each of which is less than 50 Ohm, the pulse front duration $t_{\approx 1}$ ns. In addition, we have obtained experimentally a stable 9-10 channel triggering mode of the trigatron type spark gap in a five-cascade pulse voltage generator with a step-by-step peaking (exacerbation) of the pulse front in its cascades (GPVCP). **Practical value.** We have obtained experimentally the nanosecond pulse front duration on the GPVCP load and that opens the prospect of industrial application of such generators for microbiologically disinfecting treatment (inactivation of microorganisms in food) water-containing food products. References 6, figures 8.

Key words: generator of pulsed voltages, peaking of the pulse front in cascades of generator, working chamber, spark gap or switch, inactivation of microorganisms in food products.

В.М. Золотарев, Ю.А. Антонец, С.Ю. Антонец, О.В. Голик, Л.А. Щебенюк

ОН-ЛАЙН КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭМАЛЬПРОВОДОВ

Представлено результати неруйнівного технологічного контролю кількості дефектів в ізоляції емаль проводу на основі поліімідного полімеру. Розглянуто застосування статистичного аналізу результатів вимірювання показників контролю за допомогою математичної моделі тренду для використання результатів в активному технологічному контролі. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання параметрів функції тренду для контролю гарантованого рівня бездефектності ізоляції методами статистики граничних значень. 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 дефектності емаль ізоляції для проводу ПЭЭИДХ2 – 200 з двошаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм впродовж неперервного технологічного циклу. Визначення кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції дозволяє також виділити і кількісно оцінити випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, кожною з яких можна знехтувати порівняно із сумою. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: емаль провід, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, технологічний контроль, випробування напруженою.

Представлены результаты неразрушающего технологического контроля количества дефектов в изоляции эмаль провода на основе полиимидного полимера. Рассмотрено применение статистического анализа результатов измерения показателей контроля с помощью математической модели тренда для использования результатов в активном технологическом контроле. Предложены рекомендации для практического использования параметров функции тренда для контроля гарантированного уровня бездефектности изоляции методами статистики предельных значений. Параметром тренда является скорость уменьшения (или увеличения) длины провода с заданной дефектностью в течение технологического цикла. Теоретически показана и подтверждена измерениями возможность количественной оценки тенденции изменения дефектности эмальизоляции для провода ПЭЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм в течение технологического цикла. Определение количественной оценки тенденции изменения дефектности эмаль изоляции позволяет также выделить и количественно оценить случайную ошибку технологического процесса – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса и обусловлена большим количеством причин, каждой из которых можно пренебречь по сравнению с суммой. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: эмаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, технологический контроль, испытания напряжением.

Постановка проблеми. Емальпровід на основі поліімідних синтетических сополімерів з температурним індексом 200 °С має високі електричні та механічні властивості ізоляції [1, 2]. Внедрення таких інноваційних видів кабельно-проводникової продукції в виробництво дозволяє забезпечити найвищий сучасний рівень електричної, механічної міцності та нагрієвостійкості виткової ізоляції обмоток електричних машин і апаратів – масової продукції електромашиностроєння.

Для виробництва таких проводів застосовують сучасні автоматичні лінії з високими швидкостями (до 1000 м/хв) і глибоким каталітичним віджигом розчинників емальлаків [2]. Освоєння подібної продукції, інноваційної для конкретного виробника, вимагає застосування системи оперативного технологічного контролю, який забезпечує ліквідність продукції при досягнутому рівні технічних параметрів. При цьому контроль і аналіз дисперсії основних технічних параметрів продукції є базовою інформацією для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001: 2015.

Проблема для конкретного виробника складається в розробці та впровадженні нестандартних технічних і організаційних рішень технологічного контролю з обов'язковою прив'язкою допуску технічних параметрів до досягнутого рівня технології виробництва. Існує протиріччя між відносно високою ціною інноваційної продукції, виготовленої за допомогою сучасних передових технологій і матеріалів, з однієї сторони, і необхідністю організації технологічного контролю дисперсії технічних параметрів в процесі неперервного автоматичного технологічного циклу, який потребує додаткових витрат, з іншої.

Задача, на перший погляд, здається такою, якої немає рішення для виробників в період освоєння нової продукції. Прикладом може служити концепція «Шість сигма («6σ»)» [3]. В ній основним критерієм якості продукції є її однорідність, яку кількісно відображає загальноприйнята характеристика розбросу параметрів – їх середньоквадратичне відхилення σ . Показателем однорідності, що використовується в маркетингу, є

отношение диапазона допустимых значений основного параметра к экспериментально определенному значению σ . Концепция «Six Sigma Methodology» является демонстрацией достижений производителя в отрасли качества, но не содержит методологии обеспечения этих достижений.

Приведенный пример свидетельствует о том, что противоречия между относительно высокой стоимостью инновационной продукции и необходимостью дополнительных затрат на организацию технологического контроля инновационного процесса ее изготовления является одной из основных проблем технологического развития предприятия. И чем больше технологический цикл автоматизирован, тем больше эта проблема становится актуальной. При этом ее решение требует принятия нестандартных технических и технологических решений, поскольку между задачами приемочного и текущего технологического контроля существует значительное и теоретическое, и техническое различие [4]. Проблема организации активного технологического контроля является концептуальной для современного, нацеленного на развитие и автоматизацию, производителя массовой продукции.

Анализ литературы. Поскольку данная проблема тесно связана с экономической составляющей массового производства, в [1] предложено разрешить противоречия между относительно высокой стоимостью продукции и ценовым фактором, как критерием ликвидности для проводов с полиимидной изоляцией, путем снижения уровня требований к напряжению пробоя, согласованного с потребителем. На наш взгляд, внедрение спектра технических требований на одну и ту же продукцию значительно расширяет диапазон применимых технических требований. Это, как минимум, размывает диапазоны допустимых значений параметров одного и того же изделия, усложняет взаимоотношения между производителем и заказчиком продукции, но не решает проблемы применения эффективного технологического контроля.

Первые концептуальные работы, посвященные задачам текущего технологического контроля, датированы началом 60-х XX в. и их итог сформулирован в [5]: «В отличие от приемочного контроля, где определяется степень пригодности уже готовых партий продукции, текущий контроль должен обеспечить нормальный ход технологического процесса». Это значит, что в самой постановке вопроса о технологическом контроле заложена возможность изменений в технологическом процессе и необходимость оперативного обнаружения и количественной оценки таких изменений. Теоретически это означает, что каждый очередной результат, полученный при технологическом контроле, является элементом иного, неизвестного статистического массива. Поэтому статистическая процедура обработки результатов технологического контроля требует разработки алгоритма обработки и представления результатов; алгоритма принятия решений. Приведенная общая концепция технологического контроля [4] является актуальной. Ее конкретные реализации в автоматизированных и скоростных непрерывных технологических циклах современного кабельного производства требуют кроме

практически мгновенной оперативности (режим онлайн) [2, 3, 5] решения ряда проблем: научных и технических.

Научные проблемы обусловлены следующим.

Измерение дисперсии технического параметра в процессе производства по методу получения и представления результатов является опосредствованным и относительным. К этим измерениям не может применяться классическая (каноническая) модель измерения, поскольку она требует выполнения трех условий [3]:

- время измерения не ограничено;
- измеренная величина сохраняет истинное значение неизменным в течение всего цикла измерений;
- все факторы, влияющие на результат, точно определены.

Как минимум первые два условия в принципе не могут быть выполнены при измерении дисперсии технического параметра в конкретной задаче текущего технологического контроля. Поэтому в данном случае приемлемой является только статистическая модель при которой измеряемая величина является последовательностью значений, которые дают информацию о текущем состоянии объекта измерений. При этом истинное значение величины может оставаться неопределенным на данном интервале процесса измерения [2].

Поэтому в каждом непрерывном технологическом процессе необходима разработка статистической модели конкретного процесса технологического контроля, которая включает: статистическую модель процесса измерения дисперсии параметров, алгоритм обработки и представления результатов.

Технические проблемы обусловлены тем, что на основе анализа влияния составляющих технологического процесса на формирование электрофизических параметров изделия необходимы:

- 1) выбор операций, которые являются определяющими для обеспечения качества продукции;
- 2) выбора измеряемых параметров, которые являются определяющими для обеспечения качества продукции;
- 3) определения технологических допусков для выбранных параметров;
- 4) определения периодичности измерений и минимального объема выборки.

При этом необходимо разделить тенденции изменения контрольного параметра как функции технологического времени и случайной погрешности технологического процесса. Указанное разделение может быть выполнено по известной статистической модели тренда с ошибкой (только ошибка является случайной величиной) для ряда наблюдений за значениями величины x [7]:

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

где t_i – детерминированная переменная, которая является технологическим временем; $f(t_i)$ – детерминированная функция (тренд технологического процесса);

σ_i – случайная величина (случайная составляющая стабильности технологического процесса).

Мировые производители оборудования для эмальпроводов на основе полиимидных синтетических сополимеров [3] для текущего технологического контроля используют современные высокоэффективные системы непрерывного статистического контроля удельного числа дефектов (er) изоляции в режиме *онлайн*. Число дефектов – это число мест, в которых ток через изоляцию превышает установленный. Дискретное измерение тока через изоляцию под воздействием высокого напряжения постоянного тока обеспечивает система EFHP фирмы MAG-ECOTESTER [3]. Статистические показатели числа дефектов изоляции, зафиксированные для каждой катушки, хранятся на магнитных носителях для дальнейшего анализа. Это – пример современного технологического контроля, в котором критерии принятия технологических решений устанавливает производитель.

Цель работы. Оценка **гарантированного уровня бездефектности изоляции** эмальпроводов, изолированных полиимидными сополимерами на основе разделения:

- **тренда** технологического процесса – существенного детерминированного изменения результатов технологического контроля в течение технологического процесса;

- статистической **погрешности** технологического процесса – суммарной погрешности результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса.

Основные результаты.

Результаты измерения количества дефектов провода в процессе изготовления в течение 24 часов показывают наличие двух различных периодов при непрерывном автоматизированном процессе. Существенное различие динамики изменения дефектности в эти периоды свидетельствует о том, что в технологическом цикле следует различать периоды приработки (повышенная, но быстро снижающаяся дефектность изоляции в начале цикла) и нормального изолирования (дефектность изоляции стабильна).

Рассмотрение результатов контроля дефектности эмальпровода как единого статистического массива возможно с помощью выбора соответствующей функции для тренда, в данном случае экспоненциальной (рис. 1,а). Однако существенное различие динамики изменения дефектности в периоды приработки и нормального изолирования обуславливает существенную разницу в оценке статистической ошибки контроля (рис. 1,б). Поэтому для решения поставленной задачи: разработки метода оценки **гарантированного уровня бездефектности изоляции** использовано разделение массива данных на – детерминированную линейную функцию $f(t_i)$ (тренд: сплошная линия) и случайную величину δ_i в соответствии с моделью тренда с ошибкой (1) в [7] (см. рис. 2).

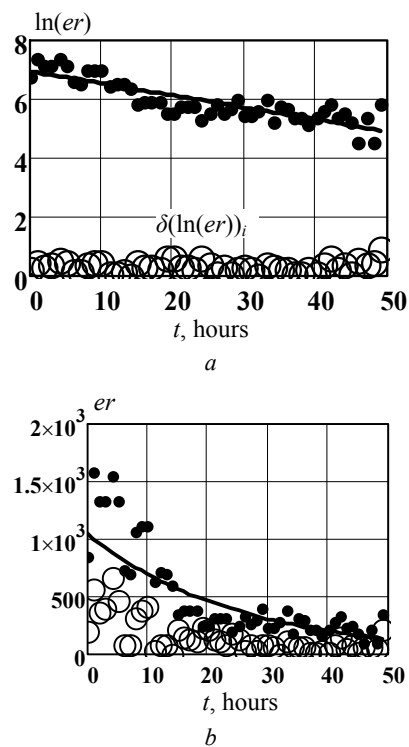


Рис. 1. Разделение массива данных о количестве дефектов на катушке (черные точки) на – детерминированную функцию $f(t_i)$ (тренд: сплошная линия экспоненциальная функция) и случайную величину δ_i (пустые точки) с помощью различных математических процедур разделения

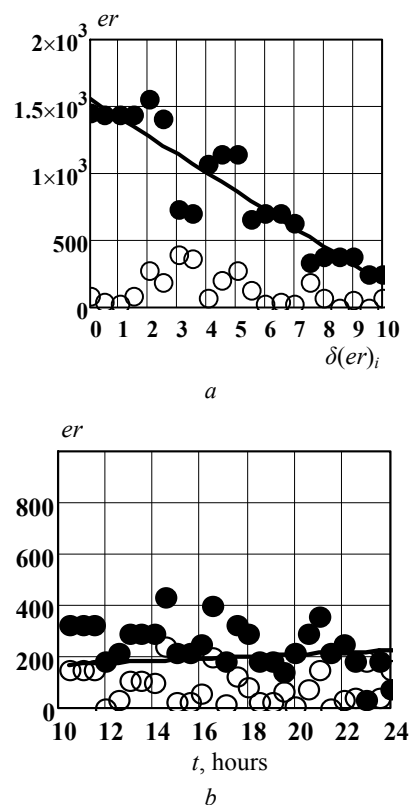


Рис. 2. Разделение массивов данных о количестве дефектов на катушке (черные точки) на – детерминированную линейную функцию $f(t_i)$ (тренд: сплошная линия) и случайную величину δ_i (пустые точки) для двух периодов в непрерывном автоматическом процессе изготовления: первый (а) период приработки и последующий (б) период нормального изолирования

Представление результатов контроля дефектности эмальпровода двумя статистическими массивами (рис. 2) показывает, что случайная составляющая (ошибка технологического процесса) в период нормального изолирования стабильна и может быть количественно определена и ее среднее значение составляет в данном случае 10 % от среднего количества дефектов за весь период наблюдений. Именно эта величина является количественной оценкой случайных отклонений в технологическом процессе и должна быть предметом статистического контроля в системе обеспечения однородности продукции.

В то же время тренд количества дефектов в период нормального изолирования, поскольку он определен детерминированной функцией, должен быть предметом анализа для специалистов технологов, поскольку именно **тренд количества дефектов в период нормального изолирования** определяет критерий для оптимальной длительности непрерывного технологического цикла. В данном случае наблюдается слабый положительный тренд: увеличение количества дефектов (2 ± 1) дефекта в час, что позволяет определить время оптимальной длительности непрерывного технологического цикла.

Иная ситуация существует в периоде приработки. Данные рис. 2, *b* свидетельствуют о необходимости технических решений, в первую очередь, по сокращению периода приработки. Количественным критерием при этом является отрицательный коэффициент тренда. В данном случае минус (125 ± 7) дефекта в час. Несомненной задачей технолога является обеспечение увеличения этого параметра по абсолютной величине вдвое.

Тенденция изменения (тренд) значений контролируемого параметра в течение непрерывного технологического цикла характерно не только для дефектности изоляции. На рис. 3 приведены результаты относительного изменения диаметральной толщины эмальизоляции δl в непрерывном процессе изготовления 60 катушек эмальпровода.

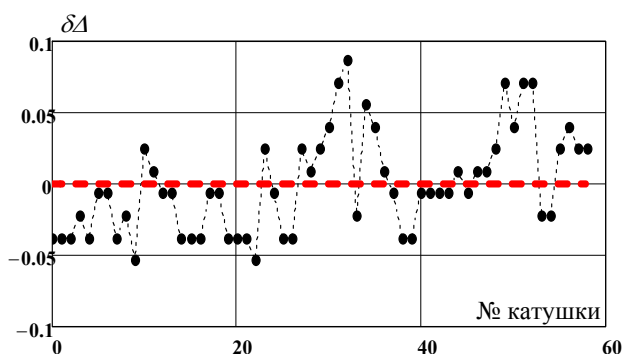


Рис. 3. Относительное изменение диаметральной толщины эмальизоляции δl в непрерывном процессе изготовления эмальпровода ПЭЭИДХ2-200-МЭК диаметром 0,56 мм

Здесь также очевидно наличие тренда, поэтому стандартная оценка дисперсии параметра включает и случайный его разброс (статистическая ошибка) и влияние параметров детерминированной составляющей (тренда). В данном случае тренд толщины изоляции обусловлен технологической вытяжкой медной

проволоки, которая допустима (менее 0,5 % диаметра), но оказывает влияние на толщину эмальизоляции.

Только когда параметры тренда и его причина определены (обязанности инженера-технолога), может быть выполнен контроль дисперсии контролируемого параметра, для этого в массовом производстве должна использоваться унифицированная методика оценки случайной составляющей дисперсии параметра.

Дисперсии нормируемых параметров провода могут быть определены после его изготовления (прежде всего, дисперсия напряжения пробоя), поэтому такой контроль в условиях производства остается в значительной мере пассивным.

В системе EFHP [3] результаты испытаний представлены в режиме on-line на мониторе, результаты хранятся на магнитных носителях (преимущество системы). Однако, в производственной практике эти результаты не используются как количественные показатели. Для оценки гарантированного уровня бездефектности изоляции необходимо выделить случайную ошибку технологического контроля. Для этого должна использоваться унифицированная оценка случайной составляющей дисперсии параметра катушки после выделения детерминированного тренда и оценена вероятность появления максимального количества дефектов на катушке (см. рис. 4).

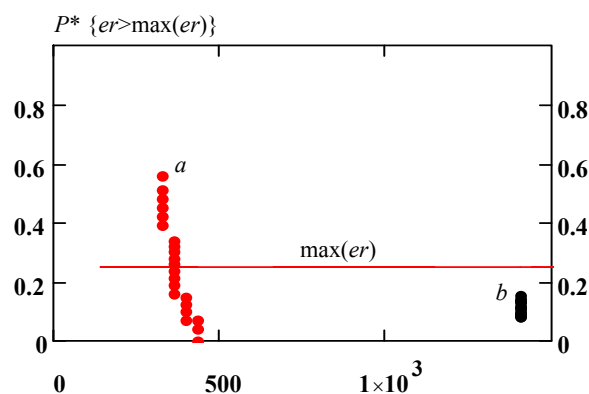


Рис. 4. Зависимость вероятности превышения максимального количества дефектов на катушке от максимального количества зафиксированных дефектов (на длине 3600 м) как оценка гарантированного уровня однородности эмальизоляции, полученная с помощью предельного распределения максимальных значений в периоды приработки (повышенная, но быстро снижающаяся дефектность изоляции в начале непрерывного технологического цикла *a*) и нормального изолирования (дефектность изоляции стабильна длительно *b*): видно, что использование математического аппарата предельных значений позволяет четко различать период технологической приработки и период нормального хода технологического процесса

Математическая процедура выделения тренда процесса позволяет организовать активный контроль случайной составляющей дефектности (ошибка технологического процесса). С помощью статистических процедур дискретных интервальных моделей [2] производится оценка, анализ и принятие текущего технического решения относительно дисперсии дефектности каждой очередной катушки провода на протяжении всего технологического цикла.

Например, при контроле диаметра эмальпровода D используется статистическая процедура оценки максимальной вероятности P_{\max} выхода контролируемого параметра ΔD за границы диапазона $\underline{E} \dots \bar{E}$, определенная как сумма соответствующих вероятностей выхода параметра за односторонние границы [4]. Причем, вероятность выхода контролируемого параметра ΔD за нижнюю границу взята с минусом:

$$P_{\max i} = \sup(P_{\max i}) - \inf(P_{\max i}); \quad (2)$$

$$\sup(P_{\max i}) = [\sup(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 / \{[\sup(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 + [\bar{E} - 0,5(D_{i2-1} + D_{i2})]^2\}]; \quad (3)$$

$$\inf(P_{\max i}) = [\inf(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 / \{[\inf(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 + [\underline{E} - 0,5(D_{i2-1} + D_{i2})]^2\}]; \quad (4)$$

где D – диаметр провода; \bar{E} – верхняя технологическая граница диаметра; \underline{E} – нижняя технологическая граница диаметра; ΔD_{i2} – разность между текущим диаметром в выборке № $i:2$ и средним значением диаметра, определенным в течение технологического цикла (i : № измерения):

$$\Delta D_{i2} = D_{i2} - (i)^{-1} \cdot \sum D_k, k = 1 \dots i. \quad (5)$$

Значение $[\sup(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2]$ в (3) – квадрат наибольшего текущего изменения диаметра в выборке № $i:2$ в сторону верхней технологической границы. Значение $[\inf(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2]$ в (4) – квадрат наибольшего текущего изменения диаметра в сторону нижней технологической границы.

На рис. 5 приведены результаты контроля диаметра (a) эмальпровода с полиимидной изоляцией в непрерывном технологическом цикле и представлена контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за границы диапазона $\underline{E} \dots \bar{E}$ (b), определенная в соответствии с (2) – (5).

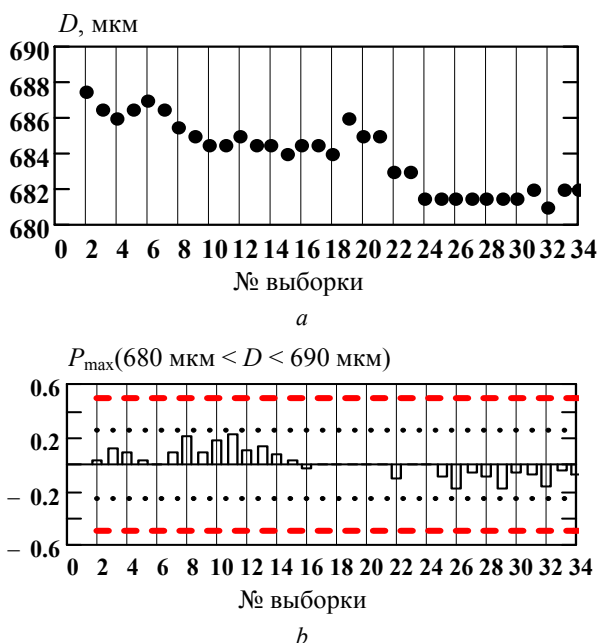


Рис. 5. Результаты контроля диаметра (a) эмальпровода в непрерывном технологическом цикле и контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за границы нормативного диапазона (b)

Сопоставление рис. 5, a и рис. 5, b свидетельствует об информативности технологического контроля

максимальной вероятности P_{\max} выхода параметра за границы заданного двустороннего диапазона:

1) контрольная карта отражает период технологической стабильности, в течение которого P_{\max} не превышает по абсолютной величине уровень 0,25 (пунктир) – уровень наибольшей чувствительности контроля к увеличению отклонения от среднего;

2) контрольная карта также отражает стабильную тенденцию уменьшения значений контрольного параметра, которая позволила определить причину тенденции уменьшения D , – возрастание вытяжки проводника в течение технологического цикла.

Выделение **тренда** технологического процесса дает возможность оценить количественно неслучайную тенденцию изменения контролируемого параметра, как результат **определимых технологических причин**. Без такой оценки само понятие технологического контроля не имеет смысла, поскольку исключает обратную связь в системе организации такого контроля. Кроме того, выделение **тренда** технологического процесса дает возможность оценить случайную ошибку технологического контроля, которая обусловлена суммарным влиянием множества таких факторов, влиянием каждого из которых можно пренебречь по сравнению с суммой.

Необходимость использования процедуры разделения массива данных технологического контроля на детерминированную и случайную составляющие обусловлена фундаментальным отличием задач приемочного и технологического контроля. Это фундаментальное отличие отмечалось специалистами [4]. Задача технологического контроля – обеспечение возможности активной коррекции технологического процесса, что невозможно без выделения **определимых технологических причин** тренда контролируемого параметра.

Выводы.

1. Выполнена оценка **гарантированного уровня бездефектности изоляции** эмальпроводов, изолированных полиимидными сополимерами. Вероятность того, что максимальное количество зафиксированных на длине 3600 м дефектов не более 1400 в период приработки, и 400 дефектов на длине 3600 м в период нормального изолирования, составляет более 80 %.

2. Разработана и использована при организации технологического контроля дефектности эмальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров статистическая процедура разделения массива данных технологического контроля на детерминированную (тренд) и случайную составляющую (статистическая ошибка технологического процесса). Выделение тренда дает возможность оценить количественно неслучайную тенденцию изменения контролируемого параметра, как результат **определимых технологических причин**.

3. Тренд количества дефектов в период нормального изолирования (рис. 2, b) слабый положительный: увеличение дефектности (2 ± 1) дефектов в час. Оценка тренда дефектности в этот период может быть использована для определения времени оптимальной длительности непрерывного технологического цикла.

4. В период приработки отрицательный коэффициент тренда (в данном случае минус (125 ± 7) количества дефектов в час) использован для оценки длительности приработки и контроля мероприятий по его сокращению вдвое.

5. Выделение случайной составляющей позволяет количественно оценить ошибку технологического процесса, снижение которой требует комплексного подхода, называемого в мировой практике методом Деминга [10]. Случайная составляющая (ошибка технологического процесса) в период нормального изолирования стабильна, ее среднее значение составляет в данном случае 10 % от среднего количества дефектов за весь период наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 19-23.
2. Щебенюк Л.А., Антоненко С.Ю. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальних проводів // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – №23. – С. 166-169.
3. Голик О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальюизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход // Український метрологічний журнал. – 2009. – №1. – С. 15-18.
4. Голик О.В. Статистические процедуры при двустороннем ограничении контролируемого параметра в процессе производства кабельно-проводниковой продукции // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №5. – С. 47-50. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.07.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
6. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Радио и связь. 1991. – 352 с.
7. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
8. 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.
9. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
10. 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. Golik O.V. Statistical procedures for two-sided limit of a controlled parameter in the process of production of cable and wire products. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no.5, pp. 47-50. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.07.

5. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.O., Solovjev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in theory of reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 524 p. (Rus).

6. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1991. 352 p. (Rus).

7. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka ryadov nabludeni* [Statistical analysis of observation series]. Moscow, Znanie Publ., 1973. 64 p. (Rus).

8. 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).

9. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.

10. Mary Walton. *The Deming Management Method*. Foreword by W. Edward Deming. New York: NY 10016 Copyright, 1986. 262 p.

Поступила (received) 11.05.2017

Золотарев Владимир Михайлович¹, д.т.н., проф.,

Антоненко Юрий Афанасьевич¹, к.т.н.,

Антоненко Станислав Юрьевич², аспирант,

Голик Оксана Вячеславовна², к.т.н., доц.,

Щебенюк Леся Артемовна², к.т.н., проф.,

¹ ПАО «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ»,

61099, Харьков, ул. Автогенная, 7,

тел/phone +380 57 7545312; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua,

antonets@yuzhcable.com.ua

² Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 57 7076544,

e-mail: unona928@gmail.com, agurin@kpi.kharkov.ua

V.M. Zolotaryov¹, Yu.P. Antonets¹, S.Yu. Antonets², O.V. Golik², L.A. Shchebeniuk²

¹ Private Joint-stock company Yuzhcable works,

7, Avtogenynaya Str., Kharkiv, 61099, Ukraine.

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrypychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Online technological monitoring of insulation defects in enameled wires.

In this paper the authors used non-destructive technological monitoring of defects insulation enameled wire with polyimide polymer. The paper is devoted to the statistical method for processing, comparison and analysis of results of measurements of parameters of insulation of enameled wire because of mathematical model of trend for application in active technological monitoring is developed; the recommendations for parameters of such monitoring are used. It is theoretically justified and the possibility of determination of dependence of the error on the velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects in enameled insulation by non-destructive tests by high voltage. The dependence of average value of amount of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide insulation in a range of nominal diameter 0.56 mm is experimentally determined. The technological monitoring purpose is to reduce the quantifying defects of enameled insulation. References 10, figures 5.

Key words: enameled wire, polyimide insulation, defects of insulation, technological monitoring, tests by voltage.

Е.И. Сокол, Ю.А. Сиротин, Т.С. Иерусалимова, О.Г. Гриб, С.В. Швец, Д.А. Гапон

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ СЕТЕЦЕНТРИЗМА

Забезпечення мережецентричного підходу до режиму управління трифазною мережею і оцінка збалансованості режиму мережі з урахуванням впливу миттєвої потужності на величину втрат дасть можливість виключити появу нульової послідовності і, тим самим, підвищити якість електроенергії. Бібл. 9, рис. 3.

Ключові слова: мережецентрична технологія, миттєва потужність, нульова послідовність, нейтраль.

Обеспечение сетевцентрического подхода к режиму управления трехфазной сетью и оценка сбалансированности режима сети с учетом влияния мгновенной мощности на величину потерь даст возможность исключить появление нулевой последовательности и, тем самым, повысит качество электроэнергии. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: сетевцентрическая технология, мгновенная мощность, нулевая последовательность, нейтраль.

Введение и постановка проблемы. Проблемы совместимости различных видов генерации требуют концентрации усилий на объединении энергетических кластеров, которые должны быть сбалансированы по первичным энергоресурсам с взаимодействием субъектов производства, передачи и потребления электрической энергии. При сравнении свойств традиционных иерархических и новационных сетевцентрических систем управления режимами работы трехфазной сети, среди основных преимуществ последних следует отметить использование иррегулярных подсистем (подсистемы с переменной структурой и изменяющимся набором функций) и использование информации в режиме реального времени. Однако это требует перестройки не только присоединяемых локальных энергосистем, но и всей совокупности распределенных энергетических объектов [1].

Решение задачи осложняет наличие слабых и в то же время протяженных информационно-управленческих связей на больших территориях [2].

Современные информационные технологии позволяют осуществить многомерный анализ информации о состоянии энергосистемы в едином информационном пространстве при условиях обеспечения сетевцентрического подхода к режиму управления и использования беспилотных летательных аппаратов в качестве средств мониторинга состояния трехфазной сети [3].

Реактивность, асимметрия и несинусоидальность режима потребления для ряда потребителей обусловлены технологическими причинами и имеют длительный характер, что является причиной появления пульсаций мгновенной мощности (ММ), которая вызывает дополнительные потери электроэнергии и способствует возникновению опасных резонансных явлений при работе трехфазной сети [4].

Анализ последних исследований и публикаций.

При несимметричном напряжении задача минимизации потерь и создание уравновешенного режима электропитания становится многокритериальной. Усовершенствование методов компенсации и симметризации

нагрузки при несимметричном напряжении требует дальнейшего развития теории мощности [5].

Цель исследований. Развитие методов теории мгновенной мощности в условиях наличия несимметричной нагрузки при сетевцентрическом управлении режимами работы трехфазной сети.

Основные материалы исследований. В 4-проводной системе ММ определяется как сумма четырех попарных произведений мгновенных значений (м.з.) токов и напряжений. В силу I закона Кирхгофа только три линейных тока (из четырех) независимы (свободные) величины, а ММ – инвариантна относительно выбора точки отсчета (ТО) одновременно для 4-х напряжений. Такая инвариантность ММ приводит к тому, что и среди 4-х напряжений (трех фазных напряжений и напряжения нейтрали) только три величины напряжений независимы (свободные).

ТО фазных напряжений, относительно которой нулевая последовательность вектора фазных напряжений равна «0», называют *искусственной точкой заземления* (ИТЗ, artificial point). Выбор в качестве ТО ИТЗ для сечения $\langle a, b, c, n \rangle$ делает 4 величины напряжений условно четырехмерными. Это приводит к усложнению математического описания энергетических процессов и требует неоправданного применения техники множителей Лагранжа [6].

Выбор нейтрали в качестве ТО напряжений не изменяет величину ММ. При этом ММ явно зависит только от трех независимых фазных напряжений и трех независимых линейных токов. Это позволяет считать энергетические процессы (тока и напряжения) в 4-проводной системе трехмерными и полностью определенными тремя фазовыми величинами сечения трех фаз $\langle a, b, c \rangle$, зависящими от времени – тремя кривыми (3-waveforms): $x_a = x_a(t)$, $x_b = x_b(t)$, $x_c = x_c(t)$. Кривые рассматриваемого процесса в трех фазах определяют радиус-вектор $x(t) = [x_a(t) \ x_b(t) \ x_c(t)]^T$ со значениями в 3-мерном пространстве $X^{(3)}$ (3-мерную кривую $x(t) \in X^{(3)}$, сокращенно 3-кривую).

Здесь $X^{(3)}$ – арифметическое пространство трехмерных вещественных векторов (матриц-столбцов) с операциями:

– скалярного произведения (СП):

$$(x, y) = x \bullet y = \begin{bmatrix} x_a & x_b & x_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_a \\ y_b \\ y_c \end{bmatrix} = x_a y_a + x_b y_b + x_c y_c; \quad (1)$$

– векторного произведения (ВП):

$$x \times y = \begin{bmatrix} x_b y_c - x_c y_b \\ x_c y_a - x_a y_c \\ x_a y_b - x_b y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b y_c - x_c y_b - x_c y_a - x_a y_c - x_a y_b - x_b y_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

Вектора ортогональны, если их скалярное произведение равно нулю:

$$x \perp y \Leftrightarrow (x, y) = 0. \quad (3)$$

Вектора параллельны (коллинеарны), если их векторное произведение равно нулю:

$$x \parallel y \Leftrightarrow x \times y = 0. \quad (4)$$

Представление энергетических процессов тремя независимыми (а не четырьмя зависимыми) кривыми вектор-функциями со значениями в арифметическом 3-мерном пространстве $X^{(3)}$ адекватно как для 4-проводных, так и для 3-проводных цепей.

Анализ энергетических процессов в 4-проводной сети. Векторный подход с единых позиций позволяет получать и анализировать новые энергетические характеристики как для 4-проводных, так и для 3-проводных цепей, как в синусоидальном, так и не синусоидальном режиме, как во временной, так и частотной области, математически рассматривая 3-проводную схему электроснабжения как частный случай 4-проводной схемы электроснабжения.

Мгновенная мощность и неуравновешенный режим. В каждый момент времени локальное состояние энергетических процессов в трехфазном сечении $\langle a, b, c \rangle$ характеризуется векторами мгновенных значений тока и напряжения:

$$\begin{aligned} u(t) &= [u_a(t) \ u_b(t) \ u_c(t)]^T, \\ i(t) &= [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T. \end{aligned} \quad (5)$$

При рассмотрении 4-проводной цепи полагаем, что напряжения измеряются относительно нейтрали. Определение нормы вектора в 3-мерном пространстве $X^{(3)}$ в каждый момент времени определяет норму вектора м.з. тока и напряжения:

$$|u(t)| = \sqrt{u \bullet u(t)} = \sqrt{u_a(t)^2 + u_b(t)^2 + u_c(t)^2}; \quad (6)$$

$$|i| = |i(t)| = \sqrt{i \bullet i(t)} = \sqrt{i_a(t)^2 + i_b(t)^2 + i_c(t)^2}. \quad (7)$$

Стандартная (скалярная) ММ определена как сумма попарных произведений м.з. тока и напряжения трех фаз:

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \frac{dW}{dt} \quad (8)$$

и характеризует скорость передачи энергии $W=W(t)$ в этом сечении. Как следует из (1), в каждый момент времени она равна СП векторов (5):

$$p(t) = (i, u) = i \bullet u = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)] \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Полагая, что процессы (5) T -периодические, т.е. $u(t+T)=u(t)$ и $i(t+T)=i(t)$, можно корректно определить среднее ММ и выделить переменную составляющую:

$$P = \bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt, \quad (10)$$

$$p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t),$$

где $\tau \geq 0$ – произвольное число.

Если ММ не имеет переменной (пульсирующей) компоненты $\tilde{p}(t) \equiv 0$, то режим уравновешен [7]. В общем случае $\tilde{p} = p(t) - \bar{p} \neq 0$ и режим неуравновешен. Симметричный синусоидальный режим уравновешен, даже при ненулевой реактивной мощности. Обратное утверждение не верно. Режим может быть уравновешенным и при несимметричной нагрузке. Режим может быть уравновешенным и при несимметричном напряжении.

Векторная ММ и уравнение мгновенных мощностей. Произведение норм векторов (5) определяет кажущуюся ММ энергетического режима:

$$s(t) = |u(t)| \cdot |i(t)| = u(t) \cdot i(t). \quad (11)$$

В 3-мерном пространстве $X^{(3)}$ для любой пары векторов справедливо неравенство Коши-Шварца [8], что для векторов (5) дает импликацию:

$$|i(t) \bullet u(t)| \leq |i(t)u(t)| \Rightarrow |p(t)| \leq s(t). \quad (12)$$

Введем векторную ММ как ВП векторов (5) токов и напряжений [8]:

$$\begin{aligned} q(t) &= i(t) \times u(t) = \\ &= \begin{bmatrix} i_b u_c - i_c u_b & i_c u_a - i_a u_c & i_a u_b - i_b u_a \\ q_a & q_b & q_c \end{bmatrix} = \\ &= [q_a \ q_b \ q_c]^T. \end{aligned} \quad (13)$$

Попарные СП векторов (5) образуют матрицу Грама (2×2):

$$G(i, u) = \begin{bmatrix} i \bullet i & i \bullet u \\ i \bullet u & u \bullet u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i^2(t) & p(t) \\ p(t) & u^2(t) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Положительные величины на ее главной диагонали равны квадратам норм векторов (5) напряжений и токов: $u \bullet u = |u(t)|^2 = u^2(t)$, $i \bullet i = |i(t)|^2 = i^2(t)$. Определитель матрицы Грама равен квадрату нормы ВП векторов м.з. токов и напряжений – скалярному квадрату векторной ММ (13):

$$\det[G(i, u)] = \begin{vmatrix} i \bullet i & i \bullet u \\ i \bullet u & u \bullet u \end{vmatrix} \equiv \frac{[i \times u]^T [i \times u]}{q(t) q(t)} = |q(t)|^2. \quad (15)$$

Геометрический смысл определителя матрицы Грама: «квадрат площади параллелограмма, который образован векторами напряжения $u=u(t)$ и тока $i=i(t)$ » иллюстрируется на рис. 1.

Площадь такого «мгновенного» параллелограмма равна:

$$q(t) = |q(t)| = |u(t)| \cdot |i(t)| \sin \varphi(t) = s(t) \sin \varphi(t), \quad (16)$$

где $\varphi(t)$ – мгновенный угол между векторами м.з. тока и напряжения в арифметическом 3-мерном пространстве $X^{(3)}$ в момент времени t .

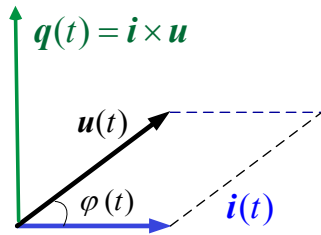


Рис. 1. Вектор тока, вектор напряжения и векторная ММ

Площадь параллелограмма равна нулю, если образующие его вектора параллельны (коллинеарны) $u(t) \parallel i(t)$, когда кажущая мощность равна ММ. Поэтому норму ВП тока $i=i(t)$ и напряжения $u=u(t)$ можно интерпретировать как неактивную ММ. Чтобы подчеркнуть эту интерпретацию, стандартную (скалярную) ММ будем называть активной ММ. Разложение (15) инвариантно относительно перестановки векторов i и u , однако $i \times u = -u \times i$. Здесь векторная (неактивная) ММ определяется согласно (13).

Противоположный выбор сделан в « pq -теории» и приводит к ошибке [9]. Отметим, что вектора i , u , $i \times u$ образуют правую тройку.

Неравенство Коши (12) в каждый момент квадратично дополняется до равенства определителем матрицы Грама [8]:

$$\underbrace{(i \cdot i)}_{i^2(t)} \cdot \underbrace{(u \cdot u)}_{u^2(t)} = \underbrace{(i \cdot u)}_{p^2(t)}^2 + \underbrace{[i \times u]^*}_{q^2(t)} \underbrace{(i \times u)}_{q(t)}. \quad (17)$$

Тождество (17) дает уравнение мощности для мгновенных мощностей и иллюстрируется рис. 2:

$$s^2(t) = p^2(t) + q^2(t). \quad (18)$$

В треугольнике мгновенных мощностей (рис. 2) два катета соответствуют активной и неактивной мгновенным мощностям. Если неактивная ММ обусловлена $\sin\varphi(t)$, то активная ММ обусловлена $\cos\varphi(t)$:

$$p(t) = u \cdot i = \underbrace{|u|}_{s(t)} \cdot \underbrace{|i|}_{\cos\varphi(t)} \cdot \frac{u \cdot i}{|u||i|} = s(t) \cdot \cos\varphi(t). \quad (19)$$

Угол в треугольнике мощностей $\varphi(t)$ равен введенному ранее углу между векторами тока $i=i(t)$ и напряжения $u=u(t)$.

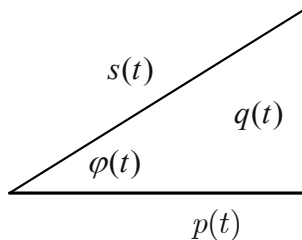


Рис. 2. Треугольник мгновенных мощностей

Если активная ММ (8) характеризует эффективность энергетического режима, то векторная ММ (13) характеризует потери энергетического режима.

Несбалансированный и сбалансированный режим. Подобно (10) в векторной ММ можно выделить векторные составляющие – постоянную и переменную:

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} q(t) dt, \quad \tilde{q}(t) = q(t) - \bar{q}. \quad (20)$$

Режим, при котором векторная ММ не имеет переменной составляющей $\tilde{q} = \tilde{q}(t) \equiv 0$, будем называть сбалансированным режимом [7].

Режим реально сбалансирован, если векторная ММ (неактивная ММ) тождественно равна нулю:

$$q(t) \equiv 0 \Leftrightarrow (\bar{q}(t) \equiv 0) \& (\tilde{q}(t) \equiv 0). \quad (21)$$

Тем самым, режим реально сбалансирован ($q(t) \equiv q(t) \equiv 0$), если в каждый момент (тождественно) вектора (5) параллельны:

$$q(t) \equiv |q(t)| \equiv 0 \Leftrightarrow y(t) \cdot u(t) = i(t). \quad (22)$$

Скалярная величина $y(t)$ (имеет размерность проводимости) не обязана быть константой и коэффициент мощности при этом, в общем случае, меньше 1.

Ток и напряжение 0-последовательности. В 4-проводной цепи при несимметричной нагрузке ток нейтрали не нулевой (ток нулевой последовательности (НП) отличен от нуля). Именно наличие тока НП структурно (и математически) отличает 4-проводную схему энергоснабжения от 3-проводной схемы. НП напряжения обусловлена смещением ноля напряжений фаз. Смещение ноля в расчетах можно учесть соответствующим выбором точки отсчета напряжений. Оба этих энергетических явления с единых методических позиций описываются в рамках общей математической модели, в которой существенную роль играет орт НП (вектор с единичной нормой)

$$e_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \ 1 \ 1]^*, \quad |e| = 1. \quad (23)$$

Разложение 3-мерного вектора $x = [x_a \ x_b \ x_c]^* \in X^{(3)}$ вдоль орта НП определяет представление 3-мерного вектора двумя взаимно ортогональными составляющими

$$x = \underbrace{(x \cdot e_0)}_{x_0} e_0 + \underbrace{e_0 \times [x \times e_0]}_{x_1} = x_0 + x_1; \quad (x_0 \perp x_1), \quad (24)$$

где « \times » – знак векторного произведения.

В разложении (24) первая компонента:

$$x_0 = (x \cdot e_0) e_0 = \underbrace{\frac{x_a + x_b + x_c}{3}}_{\hat{x}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \hat{x} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

является векторной проекцией вектора $x = (x_a, x_b, x_c)$ на 0-орт (23) и равна 0-составляющей этого вектора.

Координаты вектора (25) одинаковы и равны среднему значению 3-х фазных величин:

$$\hat{x}(t) = (x_a(t) + x_b(t) + x_c(t))/3. \quad (26)$$

Составляющая без 0-компоненты (двойное векторное произведение):

$$x_1 = e_0 \times [x \times e_0] \quad (27)$$

является ортогональным дополнением составляющей (25) до полного вектора (и не содержит 0-составляющую). Эту составляющую будем называть 0-уравновешенной составляющей.

Векторное умножение вектора на 0-орт слева:

$$e_0 \times x = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} x_c - x_b \\ x_a - x_c \\ x_b - x_a \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (28)$$

можно представить с помощью кососимметрической матрицы

$$K = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

в виде:

$$e_0 \times x = K \cdot x \quad (30)$$

Векторное умножение слева и справа отличаются знаком. Умножение справа:

$$y \times e_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} y_b - y_c \\ y_c - y_a \\ y_a - y_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_{K^*} \begin{bmatrix} y_a \\ y_b \\ y_c \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$y \times e_0 = K^* \cdot y \quad (32)$$

равносильно умножению на транспонированную матрицу $K^* = -K$.

Для второй компоненты (27) разложения (24) имеем:

$$x_1 = \underbrace{[e_0 \times x]}_{K \cdot x} \times e_0 = \underbrace{K \cdot x \times e_0}_{K^* \cdot K \cdot x} = \underbrace{K^* \cdot K}_{D_1} \cdot x = D_1 \cdot x \quad (33)$$

В матричном виде компоненты разложения (24) записываются как:

$$x_0 = D_0 \cdot x, \quad x_1 = D_1 \cdot x \quad (34)$$

Матрицы:

$$D_0 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

определяют проектор D_0 на орт 0-последовательности и проектор D_1 на 2-мерное подпространство трехмерных векторов, ортогональных 0-орту:

$$L_1^{(2)} = \left\{ x \in X^{(3)} : x \cdot e_0 = 0 \right\} \subset X^{(3)} \quad (36)$$

Вектор $x = D_1 \cdot x$ – 0-уравновешен. В силу эквивалентности утверждений:

$$x \perp e_0 \Leftrightarrow x_0 = 0 \Leftrightarrow x = D_1 \cdot x = x_1 \quad (37)$$

справедливо альтернативное описание 2-мерного подпространства (36) трехмерных 0-уравновешенных векторов (без 0-последовательности)

$$L_1^{(2)} = \left\{ x \in X^{(3)} : x = D_1 \cdot x \right\} \quad (38)$$

2-мерного подпространства (36) – как множество 3-мерных векторов, которые не изменяются под воздействием матрицы D_1 .

Матрицы (35) удовлетворяют условиям:

– квадрат матрицы совпадает с самой матрицей (свойство идемпотентности)

$$D_0^2 = D_0, \quad D_1^2 = D_1; \quad (39)$$

– произведение матриц равно нулю (ортогональность):

$$D_0 D_1 = 0; \quad (40)$$

– сумма матриц дает ортогональное разложение единичной матрицы третьего порядка

$$D_0 + D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Ортогональное разложение (24) справедливо в каждый момент времени, т.е. (24) тождественно выполняется для 3-мерной кривой:

$$x(t) \equiv x_0(t) + x_1(t) \equiv D_0 x(t) + D_1 x(t) \quad (42)$$

Так как выше полученные формулы тождественно выполняются для 3-мерных кривых (справедливы в каждый момент времени), то, чтобы не перегружать формулы, зависимость от времени указывать не будем. В частности для 3-кривых тока и напряжения (5) разложение (42) запишем (явно не указывая зависимость от времени) как (рис. 3):

$$i = \underbrace{D_0 i}_{i_0} + \underbrace{D_1 i}_{i_1} = i_0 + i_1; \quad u = \underbrace{D_0 u}_{u_0} + \underbrace{D_1 u}_{u_1} = u_0 + u_1 \quad (43)$$

Напряжение (разность потенциалов) относительная величина, которая зависит от ТО. Из представления (43) для вектора напряжения следует, что с изменением ТО напряжения изменяется только НП вектора напряжения u_0 , а 0-уравновешенная составляющая вектора напряжения u_1 не изменяется.

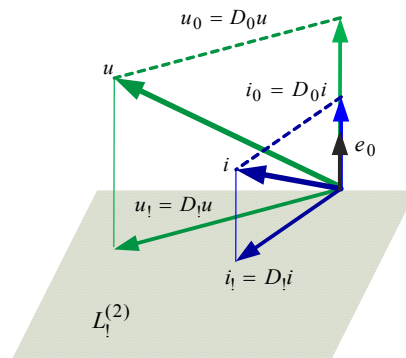


Рис. 3. Ортогональное разложение векторов напряжения и тока вдоль НП в 4-проводной схеме

Вектор фазных напряжений $u_1 = D_1 \cdot u$ 0-уравновешен и (в каждый момент времени) равен вектору напряжений, все фазные компоненты которого измерены относительно ИТЗ.

Все три координаты вектора напряжений 0-последовательности

$$u_0 = D_0 u = (\hat{u}_a(t), \hat{u}_b(t), \hat{u}_c(t))^* \quad (44)$$

одинаковы:

$$\hat{u} = (u_a(t) + u_b(t) + u_c(t))/3 \quad (45)$$

и равны разности напряжений между нейтралью и ИТЗ. Если напряжение симметрично, то оно не содержит НП, в этом случае ИТЗ совпадает с нейтралью.

Выводы. Сетевая технология управления трехфазной сетью – это идея интеграции всех сил и средств в едином пространстве, которая позволяет увеличить эффективность их применения по назначению. Одна из составляющих этого процесса – оценка сбалансированности режима сети и влияние ММ на величину потерь, даст возможность исключить появление нулевой последовательности и, тем самым, повысить качество электроэнергии.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сокол Е.И., Гриб О.Г., Швець С.В. Сетецентрическая оптимизация оперативного обслуживания элементов энергосистемы // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.11.
2. Сокол Е.И., Гриб О.Г., Швець С.В. Структурно-параметрическая организация элементов энергосистемы в условиях сетецентризма // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №2. – С. 61-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.11.
3. Швець С.В., Воропай В.Г. Мережецентричні аспекти використання безпілотних літальних апаратів // *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2016. – №176. – С. 33-34.
4. Сиротин Ю.А., Иерусалимова Т.С. Уравнения мгновенных и интегральных мощностей несинусоидальных 3-фазных процессов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №1. – С. 69-73. doi: 10.20998/2074-272X.2016.1.13.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь, ПГТУ. – 1996. – 173 с.
6. Willems J.L., Ghijselen J.A. The relation between the generalized apparent power and the voltage reference // *Energia elettrica*. – 2004. – vol.81. – pp. 37-45.
7. Шидловский А.К., Мостовяк А.Г., Москаленко А.Г. Уравновешивание режимов многофазных цепей. – Киев: Наукова думка, 1990. – 181 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 832 с.
9. Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1996. – vol.45. – no.1. – pp. 293-297. doi: 10.1109/19.481350.

REFERENCES

1. Sokol Y.I., Gryb O.G., Shvets S.V. Network centrism optimization of expeditious service of elements of the power supply system. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.11.
2. Sokol Y.I., Gryb O.G., Shvets S.V. The structural and parametrical organization of elements of a power supply system in the conditions of network centrism. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 61-64. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.11.
3. Shvets S.V., Voropai U. G. Mariechantal aspects of the use of unmanned aerial vehicles. *Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2016, no.176, pp. 33-34. (Ukr).
4. Sirotnin Yu.A., Ierusalimova T.S. Instantaneous and integral power equations of nonsinusoidal 3-phase processes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.1, pp. 69-73. doi: 10.20998/2074-272X.2016.1.13.
5. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Voprosy kachestva elektroenergii v elektroustanovkakh* [Issues of power quality in electrical installations]. Mariupol, PSTU Publ., 1996. 173 p. (Rus).
6. Willems J.L., Ghijselen J.A. The relation between the generalized apparent power and the voltage reference. *Energia elettrica*, 2004, vol.81, pp. 37-45.

7. Shidlovskii A. K., Mostoviyak A.G., Moskalenko A.G. *Uravnoveshivanie rezhimov mnogofaznykh tsepei* [Balancing the modes of multiphase circuits]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 181 p. (Rus).
8. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (Rus).
9. Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, vol.45, no.1, pp. 293-297. doi: 10.1109/19.481350.

Поступила (received) 17.05.2017

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф., член-корр. НАНУ,
Сиротин Юрий Александрович¹, д.т.н., проф.,
Иерусалимова Татьяна Сергеевна¹, к.т.н.,
Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,
Швець Сергей Викторович¹, к.т.н. доц.,
Гапон Дмитрий Анатольевич¹, к.т.н. доц.,
¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076551,
e-mail: Ierusalimovat@mail.ru, dima12345ml@mail.ru,
se55sh32@gmail.com

Y.I. Sokol¹, Yu.A. Sirotnin¹, T.S. Ierusalimova¹, O.G. Gryb¹,
S.V. Shvets¹, D.A. Gapon¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The development of the theory of instantaneous power of three-phase network in terms of network centrism.

Purpose. Information technologies allow multidimensional analysis of information about the state of the power system in a single information space in terms of providing network-centric approach to control and use of unmanned aerial vehicles as tools for condition monitoring of three-phase network. **Methodology.** The idea of energy processes in three independent (rather than four dependent) curves vector-functions with values in the arithmetic three-dimensional space adequately for both 4-wire and 3-wire circuits. The presence of zero sequence current structural (and mathematically) features a 4-wire scheme of energy from a 3-wire circuit. The zero sequence voltage caused by the displacement of the zero voltage phases. Offset zero in the calculations can be taken into account by appropriate selection of the reference voltages. Both of these energetic phenomena with common methodical positions are described in the framework of the general mathematical model, in which a significant role is played by the ort zero sequence. **Results.** Vector approach with a unified voice allows us to obtain and analyze new energy characteristics for 4-wire and 3-wire circuits in sinusoidal and non-sinusoidal mode, both in temporal and frequency domain. **Originality.** Symmetric sinusoidal mode is balanced, even with non-zero reactive power. The converse is not true. The mode can be balanced and unbalanced load. The mode can be balanced and unbalanced voltage. **Practical value.** Assessing balance in network mode and the impact of instantaneous power on the magnitude of the losses, will allow to avoid the appearance of zero sequence and, thus, to improve the quality of electricity. References 9, figures 3.

Key words: network-centric technology, instant power, zero sequence, neutral.

К.А. Старков, Е.Н. Федосеенко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ НЕЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С УЧЕТОМ ПРОВОДИМОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Мета. Метою статті є розробка алгоритму розрахунку електричних характеристик нееквіпотенціальних заземлюючих пристроїв електроустановок з огляду на велику кількість природних зосереджених заземлювачів, а також з урахуванням власних активних і реактивних опорів горизонтальних заземлювачів. Методика. В роботі були проведені дослідження з послідовним застосуванням методу наведеного потенціалу і методів розрахунку розгалужених електричних кіл з розподіленими параметрами. Результати. Отримано алгоритм розрахунку складних нееквіпотенціальних заземлюючих пристроїв, що дозволяє отримати уточнені значення розподілу потенціалу на території електроустановки. Наукова новизна. Нові положення, в порівнянні з відомими рішеннями, складаються в обліку провідності природних зосереджених заземлювачів сукупністю вертикальних і горизонтальних електродів, що обґрунтована по рівнозначним електричним характеристикам стосовно двошарової моделі електронної структури землі. Практичне значення. Використання запропонованого алгоритму розрахунку в електричних мережах АК «Харківобленерго» дозволили визначити значення розподілу потенціалів при короткому замиканні (КЗ) на електричній підстанції з урахуванням впливу провідності природних зосереджених заземлювачів. Скориговані таким чином результати розрахунку дадуть більш точну інформацію про величини нормованих параметрів заземлюючих пристроїв діючих електроустановок. За допомогою запропонованого алгоритму можуть бути отримані уточнені значення падіння напруги по заземлюючим пристроям при КЗ, а, отже, розраховані напруги, що впливають на ізоляцію кабелів вторинних кіл, - параметри, нормовані за умовами електромагнітної сумісності. Бібл. 9, рис. 1.

Ключові слова: природні зосереджені заземлювачі, електрична підстанція, метод наведеного потенціалу, розподіл потенціалу, двошарова модель землі.

Цель. Целью статьи является разработка алгоритма расчета электрических характеристик неэквипотенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом большого числа естественных сосредоточенных заземлителей, а также собственных активных и реактивных сопротивлений горизонтальных заземлителей. Методика. Проведены теоретические исследования с использованием метода наведенных потенциалов, методов конечных разностей для расчета электрического поля простых заземлителей в земле с двухслойной структурой и последовательного применения метода наведенных потенциалов и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными параметрами. Результаты. Получен алгоритм расчета сложных неэквипотенциальных заземляющих устройств, позволяющий получить уточненные значения распределения потенциала на территории электроустановки. Научная новизна. Новые положения, по сравнению с известными решениями, состоят в учете проводимости естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов, обоснованной по равнозначным электрическим характеристикам применительно к двухслойной модели электрической структуры земли. Практическое значение. Использование предложенного алгоритма расчёта в электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» позволили определить значения распределения потенциалов при КЗ на электрической подстанции с учетом влияния проводимости естественных сосредоточенных заземлителей. Скорректированные таким образом результаты расчета дадут более точную информацию о величинах нормируемых параметров по заземляющим устройствам действующих электроустановок. С помощью предложенного алгоритма могут быть получены уточненные значения падения напряжений по заземляющим устройствам при КЗ, а, следовательно, рассчитаны напряжения, воздействующие на изоляцию кабелей вторичных цепей, – параметры, нормируемые по условиям электромагнитной совместимости. Библ. 9, рис. 1.

Ключевые слова: природные сосредоточенные заземлители, электрическая подстанция, метод наведенного потенциала, распределение потенциала, двухслойная модель земли.

Введение. Характеристики заземляющих устройств (ЗУ) электроустановок с открытыми распределительными устройствами непосредственно определяют электромагнитную обстановку на энергетических объектах. Естественные сосредоточенные заземлители в силу большой поверхности контакта с грунтом выравнивают потенциал в узлах ЗУ и, тем самым, разгружают по току горизонтальные искусственные и естественные заземлители. Поэтому их подробный учет в решении задачи расчета электрических характеристик сложных неэквипотенциальных ЗУ представляется обязательным, так как влияет на уровень электромагнитных помех.

Расчет электрических характеристик неэквипотенциальных заземлителей производится на основе

последовательного применения метода наведенного потенциала и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными электрическими параметрами. Использование возможностей указанного алгоритма расчета сложных ЗУ предполагает размещение естественных сосредоточенных заземлителей (железобетонных оснований и фундаментов) совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов, диаметры которых принимаются такими же, как у соответствующих искусственных электродов. При этом достигается единообразие расчетных форм всех электродов ЗУ.

Метод расчета сложного комбинированного заземлителя может базироваться на условии его эквипо-

© К.А. Старков, Е.Н. Федосеенко

тенциальности, так и на условии неэквипотенциальности, т.е. с учетом продольного сопротивления горизонтальных электродов. Современные вычислительные возможности позволяют реализовать алгоритм расчета неэквипотенциальных сложных комбинированных заземлителей как универсальный.

Анализ последних исследований и публикаций. Предложенная в работе [1] математическая модель неэквипотенциального ЗУ подстанции, размещенного в двухслойном грунте, базируется на основных положениях совместного представления ЗУ, в общем случае, как сложной электрической цепи и создающего установившееся электрическое поле тока в земле. Дополнительно учитывает изменение плотности тока, стекающего с горизонтальных электродов, по линейному закону и их произвольное расположение. Однако влияние на формирование электрических характеристик ЗУ электроустановок, которое могут оказать естественные сосредоточенные заземлители в данной работе не учитывается.

Реализован в виде программного комплекса «Контур» [2] алгоритм расчета, основанный на единой математической модели и одновременно учитывающий как неравномерность распределения потенциалов по ЗУ объекта, так и процесс растекания тока с заземлителя в землю. Предложенная математическая модель, судя из построения алгоритма, не учитывает нелинейной зависимости распределенных параметров горизонтальных электродов от протекающего по ним тока.

В работе [3] рассматриваются различные методы расчета сопротивления различных заземляющих устройств в однородных и двухслойных моделях электрической структуры земли. Полученные результаты сравниваются с соответствующими формулами метода конечных элементов, которые рассматриваются как эталонные. В работе [3] отмечена необходимость поиска лучших аппроксимаций в ходе расчета сопротивления сложного ЗУ, особенно для случая многослойной модели земли.

Основная идея метода [4] заключается в совместном рассмотрении ЗУ в общем случае как сложной электрической цепи и создающего установившееся электрическое поле тока в земле. По этому методу вертикальные элементы представляются сосредоточенными параметрами, а горизонтальные – распределенными параметрами, нелинейно зависящими от проходящего по ним тока.

Анализ приведенных в [4] выражений показывает, что они не охватывают все возможные варианты расположения элементов сложных ЗУ применительно к двухслойной модели грунта. Форма представлений этих выражений отображает те ограничения в части геометрии расчетной модели ЗУ, которые приняты в алгоритме, реализующем выражения. Согласно [4] при проектировании сложных ЗУ арматурные каркасы железобетонных оснований (естественные сосредоточенные заземлители) с учетом возможностей известных алгоритмов расчета заземлителей приходится замещать совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов. Следует, однако, отметить, что расчетная совокупность замещающих электродов в

данном случае не обоснована по эквивалентным электрическим характеристикам.

Целью работы является совершенствование алгоритма, реализующего математическую модель, основанную на совместном рассмотрении ЗУ как сложной электрической цепи и создающего установившееся электрическое поле тока в земле, путем подробного учета естественных сосредоточенных заземлителей открытых распределительных устройств электроустановок высокого напряжения.

Метод расчета сложных ЗУ. Основой для алгоритма расчета сложных неэквипотенциальных ЗУ электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей принят метод расчета сложных ЗУ, учитывающий продольное сопротивление горизонтальных элементов [4]. Этот метод разработан для случая, когда ЗУ содержит наряду с горизонтальными и вертикальные элементы. Под горизонтальными элементами, продольное сопротивление которых учитывается, понимаются части заземлителя, заключенные между двумя соседними узловыми точками (точками, в которых пересекаются и сходятся два или большее число элементов) и которые конструктивно представляют собой электроды заземляющей сетки. В качестве узловой можно принять любую точку, расположенную на горизонтальной части заземлителя [4]. При замещении железобетонных подножников и стоек совокупностью вертикальных и горизонтальных линейных электродов, продольное сопротивление последних элементов не учитывается.

Исходную модель сложного заземлителя определяют допущения в соответствии с [4]:

1) в пределах данного сложного заземлителя те горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых учитывается, обладают однородными (в пределах элемента) распределенными удельными параметрами, т.е. на единицу длины: продольными активными сопротивлениями, индуктивностью и поперечной проводимостью растеканию тока;

2) значения поперечной проводимости элементов зависят также от их продольных параметров, которые в свою очередь при использовании элементов из стали являются нелинейной функцией проходящего по ним тока;

3) отсутствует влияние на распределенные параметры заземлителя электромагнитного поля тока однофазного замыкания на землю, проходящего по воздушным линиям;

4) вертикальные элементы и те горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых не учитывается, являются идеальными сосредоточенными;

5) в пределах заземлителя может быть несколько «задающих» узловых точек, т.е. точек непосредственно электрически связанных с внешней электрической цепью («задающими») являются узловые точки заземлителя, непосредственно связанные с нейтралью трансформаторов или автотрансформаторов, и точка, на которую в расчетном аварийном режиме замкнута фаза линии электропередачи);

6) при расчетном однофазном замыкании через задающие узловые точки проходят задающие токи (установившиеся значения тока однофазного замыкания

на землю и токов, «возвращающихся» в систему через нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов).

В соответствии с требованиями о прямолинейности электродов заземления предложен следующий способ учета естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных заземлителей для реализации возможностей указанного алгоритма расчета. Представим естественный сосредоточенный заземлитель эквивалентной совокупностью линейных электродов, например, таким образом, чтобы эти электроды были расположены по абрису естественного заземлителя. В частности, арматурный каркас подножников замещается совокупностью вертикальных электродов, размеры и расположение которых определяется по соответствующим геометрическим характеристикам стойки подножника, и совокупностью горизонтальных электродов – в соответствии с геометрическими характеристиками его плиты. Совокупность замещающих электродов расположена в земле с послойно однородной электрической структурой, как и моделируемый естественный сосредоточенный заземлитель. Далее к указанной совокупности электродов можно применять метод наведенного потенциала [4] для решения задачи электрического поля как к сложному ЗУ и определить значения сопротивления растеканию и потенциалов точек на поверхности земли.

Замещение естественных сосредоточенных заземлителей. Полифункциональность ЗУ электроустановок напряжением выше 1 кВ сети с глухозаземленной или эффективно заземленной нейтралью привела к необходимости нормирования нескольких параметров ЗУ - или напряжения прикосновения, или сопротивления ЗУ [5]. В связи с этим, принимаем два критерия эквивалентности схемы замещения естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью линейных электродов: приближение по сопротивлению и приближение по потенциалам точек на поверхности земли. При этом в качестве исходных данных для оценки достаточности приближения принимаем результаты решения краевой задачи для уравнения Лапласа применительно к модели естественного сосредоточенного заземлителя в ограниченном объеме земли. Достаточность достигнутого приближения в процессе наращивания замещающих линейных электродов оцениваем таким образом:

по сопротивлению

$$\xi_R = \left| \frac{R_{s,e} - R_{p,m}}{R_{p,m}} \right| \leq \xi_{R,\text{lim}}; \quad (1)$$

по потенциалам точек

$$\xi_\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\varphi_{i,s,e} - \varphi_{i,p,m}}{\varphi_{i,p,m}} \right| \leq \xi_{\varphi,\text{lim}}, \quad (2)$$

где $R_{s,e}$, $R_{p,m}$ – сопротивление растеканию совокупности электродов и апробированной модели соответственно; $\varphi_{i,s,e}$, $\varphi_{i,p,m}$ – потенциал на поверхности земли совокупности электродов и апробированной модели соответственно; n – число точек на поверхности земли.

Варианты замещения естественных сосредоточенных заземлителей (железобетонных стоек и под-

ножников) расчетной совокупностью линейных электродов получены по способу, описанному ранее с использованием ξ_R - и ξ_φ -критериев, и представлены в работах [6, 7].

Расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений. Предложенный способ учета естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных естественных заземлителей может потребовать использования выражений для взаимных и собственных сопротивлений применительно к горизонтальным электродам расположенным в нижнем слое двухслойной модели земли. Необходимость в указанных выражениях появится при замещении арматурного каркаса подножников, плита которых располагается на глубине около 3 м, совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов.

Расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений получены на основании общей формулы для взаимного сопротивления R_{qg} между двумя электродами с индексами g и q , расположенными в проводящем полупространстве применительно к электродам, размеры поперечного сечения которых в сотни раз меньше их длины [4], т.е.

$$R_{qg} = \frac{1}{l_q l_g} \int_{(l_q)} \int_{(l_g)} f'_{0q}(Q) f'_{0g}(G) \Psi_{QG} dl_Q dl_G, \quad (3)$$

где l_q и l_g – длина электродов; $f'_{0q}(Q)$ и $f'_{0g}(G)$ – функция неоднородности линейной плотности тока по длине электрода; Ψ_{QG} – функция пропорциональности между током, выходящим в проводящее полупространство из окрестностей точки G , и потенциалом, наводимым этим током в точке Q .

Как результат вывода согласно (3) получены следующие выражения: взаимное сопротивление двух горизонтальных электродов, расположенных в нижнем слое и параллельных друг другу; взаимное сопротивление двух горизонтальных электродов, расположенных в нижнем слое и перпендикулярных друг другу; взаимное сопротивление двух горизонтальных электродов, в случае если один электрод расположен в верхнем слое, второй – в нижнем слое; взаимное сопротивление двух горизонтальных скрещивающихся под прямым углом электродов, расположенных в верхнем и нижнем слое; взаимное сопротивление горизонтального электрода, расположенного в нижнем слое, и вертикального электрода, пересекающего границу раздела слоев.

Корректность выражений подтверждена путем сопоставления результатов тестовых расчетов по ним и по выражениям, приведенным в работе [4] для условий расположения горизонтального электрода (электродов) в верхнем слое, и исходных данных, соответствующих положению указанного электрода (электродов) на границе раздела слоев. Полученные расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений электродов опубликованы в работе [8] и вместе с ранее опубликованными охватывают все возможные комбинации расположения электродов при расчетах сложных ЗУ с учетом естественных сосредоточенных заземлителей.

Алгоритм расчета сложного неэквипотенциального ЗУ. Полученные модели естественных сосредоточенных заземлителей в виде совокупности линейных вертикальных и горизонтальных электродов вводятся в алгоритм расчета сложного неэквипотенциального ЗУ, которое принимаем за исходное. Эти элементы наряду с искусственными линейными заземлителями участвуют в токораспределении ЗУ. При этом продольное сопротивление горизонтальных электродов, замещающих естественные заземлители, не учитывается. При промышленной частоте электрическое поле тока, выходящего из заземлителя в землю, можно рассматривать как стационарное. В этом случае токораспределение между элементами эквипотенциального ЗУ определяет система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [4]:

$$\varphi_G = \sum_{p=1}^n \alpha_{mp} I_p, \quad \text{при } m = \overline{1, n} \quad (4)$$

где n – число элементов заземлителя; α_{mp} – взаимное сопротивление элементов ЗУ с индексами m и p (при $m \neq p$) и собственное сопротивление элементов при одинаковых индексах; I_p – ток, выходящий в землю с p -го элемента; φ_G – потенциал заземлителя (эквипотенциального).

В данном случае имеем СЛАУ (5) аналогичную СЛАУ с собственными и взаимными потенциальными коэффициентами в системе заряженных тел [9].

Согласно [4] в случае неэквипотенциального заземлителя СЛАУ в матричной форме имеет вид:

$$AI_0 = U, \quad (5)$$

где A – матрица взаимных и собственных сопротивлений элементов; I_0 – матрица-столбец комплексных значений токов, выходящих из элементов сложного заземлителя в землю; U – матрица-столбец комплексных значений напряжений элементов (для горизонтальных элементов берут среднее из значений напряжения в начале и конце элемента, а для вертикальных элементов – напряжение узловой точки, с которой он соединен).

Комплексные значения напряжений элементов ЗУ связаны со значениями задающих токов и с параметрами сложной нелинейной электрической цепи, имитирующей исходное ЗУ – без учета естественных заземлителей. Выражаем эту связь по методу узловых напряжений в матричной форме (все узлы, начиная с опорного, в качестве которого принимаем «землю» – зону нулевого потенциала, пронумерованы от нуля до q) [4]:

$$YU_{nodal} = I_{set}, \quad (6)$$

где Y – квадратная матрица полной проводимости цепей; U_{nodal} – матрица-столбец узловых напряжений; I_{set} – матрица столбец задающих токов.

В соответствии с [4] расчет сложной электрической цепи, замещающей многоэлементное ЗУ, сводится к совместному решению двух матричных уравнений (5) и (6). Учитывая то, что параметры горизонтальных элементов нелинейно зависят от проходящего по ним тока, уравнение (6) – нелинейно. Вертикальные элементы ЗУ замещают сосредоточенными проводимостями на землю; также замещают те

горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых не учитывается.

На следующем этапе алгоритма расчета горизонтальные элементы, продольное сопротивление которых учитывается, замещают эквивалентными П-образными схемами с сосредоточенными параметрами (рис. 1).

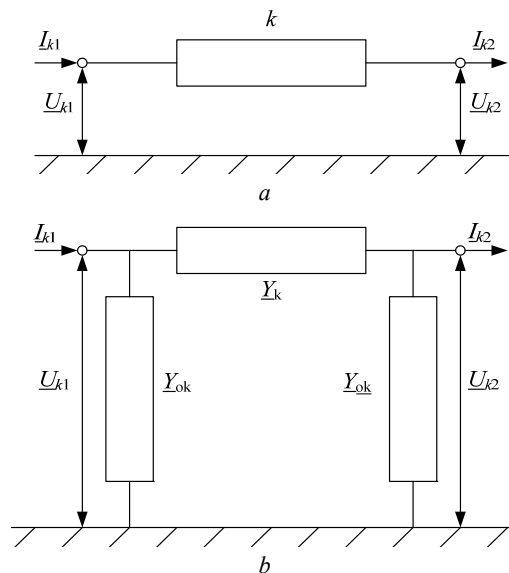


Рис. 1. Горизонтальный k -й элемент с распределенными параметрами r, L, g (a) и его эквивалентная П-образная схема замещения (b)

Связь сосредоточенных параметров П-образной схемы замещения k -го горизонтального элемента (Y_k и Y_{ok}) с его распределенными параметрами известна [6]:

$$\begin{aligned} Y_k &= 1/Z_{wk} \operatorname{sh} \gamma_k l_k; \\ Y_{ok} &= (\operatorname{ch} \gamma_k l_k - 1) / Z_{wk} \operatorname{sh} \gamma_k l_k, \end{aligned} \quad (7)$$

где Z_{wk} – волновое сопротивление; γ_k – коэффициент распространения.

Величины, входящие в формулы для волнового сопротивления Z_{wk} и коэффициента распространения γ_k , представляют собой удельное полное сопротивление элемента Z_k и удельную полную поперечную проводимость g_k . Удельное полное продольное сопротивление горизонтального электрода определяется активным сопротивлением и индуктивностью, причем последняя имеет две составляющие: внешнюю L_{ext} , обусловленную магнитным полем вне электрода, и внутреннюю L_{int} , связанную с магнитным полем внутри электрода. Внутренняя индуктивность L_{int} вычисляется в зависимости от магнитной проницаемости стали электрода μ_k , которая определяется по основной кривой намагничивания при данном действующем значении напряженности магнитного поля на поверхности электрода. Магнитная проницаемость стали элемента μ_k нелинейно зависит от тока I_k , проходящего по k -му элементу. Внешняя индуктивность L_{ext} определяется на основании известной формулы Поллячека. Удельная проводимость

$$g_k = G_k I_k^{-1},$$

причем G_k определяется с помощью метода наведенного потенциала.

Для первого приближения или первой итерации [4] заземлитель принимают эквипотенциальным и находят численные значения вектора решения матричного уравнения (4). Далее определяют поперечные проводимости G всех горизонтальных и вертикальных элементов заземлителя; на первой итерации считаем, что все рассматриваемые проводимости имеют активный характер.

Далее, задавшись некоторым начальным значением магнитной проницаемости стали электрода μ , определяют распределенные продольные параметры горизонтальных элементов заземляющей сетки и параметры их эквивалентных П-образных схем замещения. Решение матричного уравнения (6) при заданных задающих токах позволяет получить численные значения узловых напряжений и рассчитать токи во всех ветвях схемы замещения сложного ЗУ.

При втором приближении [4] напряжения в узлах и токи в ветвях схемы замещения заземлителя, вычисленные в первом приближении, используются в качестве дополнительных исходных данных, а именно, заземлитель представляется как неэквипотенциальный – СЛАУ имеет вид (5), а указанные выше значения токов позволяют уточнить магнитную проницаемость стали электрода μ . Для этого уточнения величины μ используют среднее между значениями тока в начале и в конце каждого горизонтального элемента с распределенными продольными параметрами. Решение системы (3) относительно токов в комплексной форме позволяет далее определить значения полных поперечных проводимостей \underline{G} всех элементов; указанные проводимости имеют реактивные составляющие, что формально связано с наличием у узловых напряжений на первой итерации сдвига по фазе по отношению друг к другу. Далее по μ и \underline{G} определяются распределенные продольные параметры тех горизонтальных элементов заземлителя, продольное сопротивление которых учитывается, и т.д.

В части определения напряжения до прикосновения в заданных точках на поверхности земли и входного сопротивления ЗУ, расчет выполняется известным способом [4].

Полученное решение токов во всех ветвях схемы замещения сложного ЗУ дает значения проходящих по горизонтальным элементам ЗУ токов как среднее между значениями тока в начале и в конце каждого горизонтального элемента с распределенными продольными параметрами. Как результат этого – добавление в алгоритм расчета сложных неэквипотенциальных ЗУ электроустановок решения задачи определения уровня электромагнитной совместимости.

Достаточность достигнутого приближения оценивают по ξ -критерию:

$$\xi = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \left| \frac{U_{jo}^{(n-1)} - U_{jo}^{(n)}}{U_{jo}^{(n)}} \right| \leq \xi_{\text{lim}}, \quad (8)$$

где (n) – верхний индекс, показывающий номер последней итерации; q – число узлов схемы замещения заземлителя; U_{jo} – модуль напряжения j -го узла относительно опорного.

Выводы.

Обоснована необходимость учёта влияния естественных сосредоточенных заземлителей при формировании электрических характеристик сложных неэквипотенциальных ЗУ электроустановок путём их эквивалентирования совокупностью вертикальных и горизонтальных электродов.

Получены расчетные выражения для взаимных и собственных сопротивлений горизонтальных электродов сложных неэквипотенциальных ЗУ, расположенных в нижнем слое двухслойной модели земли, которые охватывают все возможные комбинации их расположения и обеспечивают учет естественных сосредоточенных заземлителей.

Использование в электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» предложенного алгоритма расчёта распределения потенциалов при КЗ на подстанции с учетом влияния проводимости естественных сосредоточенных заземлителей позволило обеспечить оптимальное нормирование параметров ЗУ действующих электроустановок за счёт более точного определения величины напряжения прикосновения.

Определены выражения для расчёта величин падений напряжений на ЗУ при КЗ, которые позволяют оценить уровень напряжений, воздействующих на изоляцию кабелей вторичных цепей, что необходимо для нормирования их параметров по условиям электромагнитной совместимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т.25. – №2. – С. 99-111.
2. Матвеев М.В., Кузнецов М.Б., Луцишин А.Р. Оценка электромагнитной обстановки при проектировании электрических станций и подстанций // Вести в электроэнергетике. – 2005. – №2. – С. 1-8.
3. Katsanou V.N., Papagiannis G.K. Substation grounding system resistance calculations using a FEM approach. – IEEE Bucharest PowerTech, Jun. 2009. doi: 10.1109/PTC.2009.5282044.
4. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
5. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с.
6. Федосенко Е.Н. Минченко А.А. Вариант замещения естественных сосредоточенных заземлителей – арматурных каркасов железобетонных фундаментов (подножников) в виде расчетной совокупности электродов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – №6/3(24). – С. 81-84.
7. Минченко А.А., Федосенко Е.Н. Учет естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных стоек при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок с помощью совокупности вертикальных электродов // Вісник НТУ «ХП». Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – 2006. – №28 – С. 97-100.
8. Федосенко Е.Н. Определение взаимных и собственных сопротивлений вертикальных и горизонтальных электродов сложных заземлителей в двухслойной земле // Вісник НТУ

«ХП». Тем. выпуск: Электроэнергетика і перетворююча техніка. – 2006. – №34 – С. 84-91.

9. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.

REFERENCES

1. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer. *Electronic modeling*, 2003, vol.25, no.2, pp. 99-111. (Rus).
2. Matveev M.V., Kuznetsov M.B., Lushchishin A.R. Evaluation of the electromagnetic environment in the power station and substations engineering. *Vesti v elektroenergetike*, 2005, no.2, pp. 1-8. (Rus).
3. Katsanou V.N., Papagiannis G.K. *Substation grounding system resistance calculations using a FEM approach*. IEEE Bucharest PowerTech, Jun. 2009. doi: 10.1109/PTC.2009.5282044.
4. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
5. *Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7. Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazhennya elektrichnim strumom* [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. (Ukr).
6. Fedoseenko E.N., Minchenko A.A. The substitution option of natural concentrated grounds, such as concrete pole armature, by the calculated set of electrodes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2006, vol.3, no.6(24), pp. 81-84. (Rus).
7. Minchenko A.A., Fedoseenko E.N. Taking into account the natural conductivity of current spreading with concrete pole armature for calculation complicated grounding connections by the set of vertical electrodes. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2006, no.28, pp. 96-100. (Rus).
8. Fedoseenko E.N. Finding of mutual and own resistances of vertical and horizontal electrodes for complicated grounding connections in a double layer ground. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2006, no.34, pp. 84-91. (Rus).
9. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-kh t. Uchebniki dlia vuzov. Tom 2* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols. Vol.2.]. St. Petersburg, Piter Publ, 2003. 576 p. (Rus).

Поступила (received) 25.04.2017

Старков Константин Александрович¹, к.т.н.,
Федосеенко Елена Николаевна², ст. преподаватель,

¹ АК «Харьковоблэнерго»,
61037, Харьков, ул. Плехановская, 149,
тел/phone +380 57 7401268,
e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua

² Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076977,
e-mail: fedosejenko@gmail.com

K.A. Starkov¹, E.N. Fedoseenko²

¹ JSC «Kharkivoblenergo»,
149, Plekhanovskaia Str., Kharkiv, 61037, Ukraine.

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

Improved algorithm for calculating complex non-equipotential grounding devices of electrical installations taking into account conductivity of natural groundings.

Purpose. The method of natural concentrated groundings substitution by the set of electrodes taking them into account in the algorithm of electric characteristics calculation for complicated grounding connections of electric installation is offered. An equivalent model as a set of linear electrodes is chosen in accordance with two criteria: leakage resistance and potentials on the ground surface. **Methodology.** We have applied induced potential method and methods for computing branched electrical circuits with distributed parameters. **Results.** We have obtained the algorithm for calculating complex non-equipotential grounding connections, which makes it possible to obtain refined values of the potential distribution in the electric stations and substations with outdoor switchgear. **Originality.** For the first time, we have taking into account the conductivity of natural concentrated grounds by a set of vertical and horizontal electrodes based on equivalent electrical characteristics applied to a two-layer ground. **Practical value.** The using of the proposed calculation algorithm in the electric grids of JSC «Kharkivoblenergo» made it possible to determine the values of the potential distribution at short circuit in electrical substation taking into account the influence of the conductivity of natural concentrated groundings. References 9, figures 1.

Key words: natural concentrated groundings, substitution, induced potential method, the potential distribution, a two-layer ground model.



**МІЖНАРОДНИЙ СИМПОЗИУМ
ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ (SIEMA'2017)**

**INTERNATIONAL SYMPOSIUM
PROBLEMS OF ELECTRIC POWER ENGINEERING, ELECTRICAL
ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS (SIEMA'2017)**

Шановні колеги!

Оргкомітет Симпозіуму має честь запросити Вас і зацікавлених співробітників Вашої установи прийняти участь у ювілейному XX Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2017), який відбудеться 26 - 27 жовтня 2017 р. за адресою: НТУ «ХПІ» (електротехнічний корпус) вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

У симпозіумі приймуть участь:

- завідувачі кафедр, що ведуть підготовку фахівців за спеціальністю 141 Електроенергетика, Електротехніка і Електромеханіка, а також провідні викладачі ВНЗ України та інших країн;
- представники науково-дослідних організацій, що займаються проблемами, пов'язаними з електроенергетикою, електротехнікою і електромеханікою;
- представники підприємств – розробників електричних машин, апаратів та інших електротехнічних пристроїв;
- представники підприємств – споживачів електроустаткування;
- представники проектних організацій;
- представники комерційних організацій електротехнічного профілю.

Учасникам симпозіуму надається можливість опублікувати доповіді. Публікації будуть видані як спеціальний випуск Вісника Національного технічного університету «ХПІ» та в журналі «Електротехніка і електромеханіка» (EIE), що входять до Переліку фахових видань ВАК України та індексуються у наукометричних базах (Index Copernicus, PИHЦ, тощо), а журнал EIE, починаючи з 2017 р., індексується у Web of Science Core Collection.

Учасники можуть виступити на пленарному засіданні та на засіданнях секцій.

СЕКЦІЇ СИМПОЗИУМУ

1. Теоретична електротехніка.
2. Електричні машини.
3. Електричні апарати.
4. Сильні електричні і магнітні поля.
5. Електроізоляційна і кабельна техніка.
6. Передача електричної енергії.
7. Електромагнітна сумісність.
8. Автоматизація та кібербезпека енергетичних систем

Детальнішу інформацію стосовно Симпозіуму та умов участі у ньому можна отримати на сайті кафедри «Електричні апарати»: web.kpi.kharkov.ua/ea

З повагою до Вас

Голова оргкомітету Ректор НТУ «ХПІ»

Професор Є.І. Сокол

Координатор симпозіуму

Професор Б.В. Клименко

Телефони для довідок:

(057) 707 62 81, 050 653 49 82, 096 987 20 85

Факс: (057) 707 66 01.

E-Mail: varshamova.i.s@gmail.com,
korolelgn@gmail.com

Dear Colleagues,

the Organizing Committee of the Symposium has the honor to invite you and interested employees of your institution to participate in the anniversary XX International Symposium «Problems of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics» (SIEMA'2017) which will take place on 26th – 27th of October, 2017 at the NTU «KhPI» (Electrical Engineering Building), Kyrpychova Str. 2, Kharkiv, UA-61002.

In the Symposium will take part:

- Heads of Departments conducting training in the specialty 141 Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics as well as leading University Professors from Ukraine and other countries;
- representatives of research institutions dealing with problems related to Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics;
- representatives of enterprises - developers of electric machines, apparatus and other electrical equipment;
- representatives of enterprises - consumers of electrical equipment;
- representatives of design institutions;
- representatives of commercial institutions of electrical engineering profile.

Participants of the Symposium will have the opportunity to publish their papers. Papers will be published as a special issue of the Bulletin of the NTU «KhPI» and in the Journal «Electrical Engineering & Electromechanics» (E&E) which are included in the list of professional editions of the Higher Attestation Commission of Ukraine and indexed in scientometric databases (Index Copernicus, RSCl, etc.), and the E&E Journal since 2017 is indexed in the Web of Science Core Collection.

Participants can make presentations at the plenary and sectional sessions.

SYMPOSIUM SECTIONS

1. Theoretical electrical engineering.
2. Electric machines.
3. Electrical apparatus.
4. High electric and magnetic fields.
5. Electrical insulating and cable engineering.
6. Transmission of electric energy.
7. Electromagnetic compatibility.
8. Automation and cybersecurity of power systems.

More detailed information regarding the Symposium and conditions of participation can be found on the site of the Department for Electric Apparatus: web.kpi.kharkov.ua/ea

Sincerely yours,

Head of the Organizing Committee

Rector of the NTU «KhPI» Professor Ye.I. Sokol

Symposium Coordinator

Professor B.V. Klymenko

Contact:

phone (+380) 57 707 62 81, (+380) 50 653 49 82,

(+380) 96 987 20 85, fax: (+380) 57 707 66 01.

E-Mail: varshamova.i.s@gmail.com,
korolelgn@gmail.com

ПУЙЛО ГЛЕБ ВАСИЛЬЕВИЧ

(к 85-летию со дня рождения)

Исполнилось 85 лет Глебу Васильевичу Пуйло – доктору технических наук, профессору, крупному ученому, известному специалисту в области электрических машин и трансформаторов.

Глеб Васильевич родился 25 июля 1932 года в с. Келеберда Кременчугского района Полтавской области. В 1950 году окончил с золотой медалью Одесскую среднюю школу № 118 и поступил на электротехнический факультет Одесского политехнического института (ОПИ), а в 1955 г. также с отличием окончил электротехнический факультет Одесского политехнического института. После окончания ОПИ работал по направлению на Челябинском заводе электрических машин, где занимался испытаниями и наладкой электрических машин для бронетанковой техники.

Кандидатскую диссертацию по теме: «Некоторые возможности оптимизации и исследования мощных силовых трансформаторов на ЦВМ» защитил в 1966 г. в ученом совете при Одесском политехническом институте. В 1992 г. в Специализированном ученом совете при Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию «Математическое моделирование и автоматизированный проектный синтез специальных трансформаторов».

Воспитанник и последователь научной школы доктора технических наук, профессора К.К. Балашова по технико-экономическим основам проектирования трансформаторов и электрических машин. Он основал научную школу и научное направление: автоматизированный оптимальный проектный синтез и исследования электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии.

С 1973 по 1983 год Глеб Васильевич заведовал кафедрой электрических машин. В этот период он организовал создание ряда новых учебных лабораторий – электрических микромашин, технологии машиностроения, электрических аппаратов, а также научно-исследовательскую лабораторию электрических машин и кафедральную механическую мастерскую для изготовления разрабатываемых на кафедре новых видов машин.

За время работы на кафедре электрических машин Г.В. Пуйло читал многие лекционные курсы и в настоящее время читает лекции по дисциплинам: «Электрические машины», «Основы автоматизированного проектирования электрических машин», «Методы оптимизации электрических машин и оборудования», руководил аспирантами и является консультантом докторантов.

В течение многих лет профессор Г.В. Пуйло руководил научно-исследовательскими работами по договорам с различными научными учреждениями и промышленными предприятиями. Заказчиками его разработок были: Всесоюзный институт трансформаторостроения (г. Запорожье), Институт сварки им. Е.О. Патона (г. Киев), НИИ «Уралэлектрораппарат» (г. Екатеринбург),

ПО «Электромаш» (г. Тирасполь), СКВ СВПО «Трансформатор» (г. Тольятти) и другие.

Профессор Г.В. Пуйло имеет 12 изобретений, 4 из которых – по измерительным трансформаторам тока с повышенной точностью и силовым специальным трансформаторам были внедрены. Он является автором более 150 научных статей по проблемам математического моделирования и автоматизированного проектного синтеза электромеханических и электромагнитных устройств, монографий, четырех учебных пособий с пакетом прикладных программ и большого количества методических разработок. Под научным руководством профессора Г.В. Пуйло защищены 2 докторские и 6 кандидатских диссертаций. Активно принимает участие в защитах докторских и кандидатских диссертаций в качестве официального оппонента. Является членом специализированного ученого совета К 41.052.05 при Одесском национальном политехническом университете.

С 2000 г. по 2006 г. работал членом экспертного совета «Электротехника и электроэнергетика» ВАК Украины. Руководит семинаром научного совета НАН Украины «Электромагнитные процессы и проектный синтез электрических машин и трансформаторов» по комплексной проблеме «Научные основы энергетики». Был организатором проведения и руководителем двух Всесоюзных научно-технических конференций по проблемам САПР электрических машин (1977, 1983 г.). Глеб Васильевич является членом редакционных коллегий специализированных журналов «Электротехніка і Електромеханіка», «Электротехника и электроэнергетика», «Електротехнічні та комп'ютерні системи». Член редакционного совета научно-технического сборника «Труды Одесского национального политехнического университета». Он является членом методического совета Министерства образования и науки Украины по направлению «Электромеханика». Профессор Г.В. Пуйло активно участвует во Всеукраинских и международных научных конференциях по проблемам электромеханики.

В 1993 г. награжден медалью «Ветеран труда» и Почетной грамотой Министерства образования и науки Украины за успешную работу в деле обучения и воспитания студенческой молодежи, чему в немалой степени способствуют его увлечения – художественная и политическая литература, изобразительное искусство, спорт (спортивная гимнастика).

Среди коллег по кафедре и электротехнической общечеловечности Украины Глеб Васильевич пользуется заслуженным уважением и авторитетом.

Редакционная коллегия журнала «Электротехніка і електромеханіка», друзья, коллеги и многочисленные ученики поздравляют Глеба Васильевича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов.

