

ISSN 2074-272X

науково-практичний  
журнал

2017/5



# **EIE** Електротехніка і Електромеханіка

**Electrical Engineering**

**& Electromechanics**

**Електротехніка. Визначні події. Славетні імена  
Електротехнічні комплекси та системи.**

**Силова електроніка**

**Теоретична електротехніка та електрофізика**

**Техніка сильних електричних та магнітних полів.**

**Кабельна техніка**

**Електричні станції, мережі і системи**

**Ювілеї**

**За 2015р. журнал отримав індекс 83.98  
від міжнародної наукометричної бази  
Index Copernicus**



# «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видання засновано Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») 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

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

### НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ\*

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

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

### NATIONAL EDITORIAL BOARD\*

<b>Klymenko B.V.</b>	<b>Editor-in-Chief</b> , professor, NTU "KhPI"
<b>Sokol Ye.I.</b>	<b>Deputy Editor</b> , corresponding member of NAS of Ukraine, rector of NTU "KhPI"
<b>Rozov V.Yu.</b>	<b>Deputy Editor</b> , corresponding member of NAS of Ukraine, Director of SI "ITPM NASU"
<b>Grechko O.M.</b>	<b>Executive Managing Editor</b> , Ph.D., NTU "KhPI"
<b>Baranov M.I.</b>	Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI"
<b>Boev V.M.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Vepryk Yu.M.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Gryb O.G.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Guryn A.G.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Dan'ko V.G.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Zhemerov G.G.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Klepikov V.B.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Kravchenko V.I.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Milykh V.I.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Mikhaylov V.M.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Omel'yanenko V.I.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Puilo G.V.</b>	Professor, Odessa National Polytechnic University
<b>Rezynkin O.L.</b>	Professor, NTU "KhPI"
<b>Soskov A.G.</b>	Professor, O.M. Beketov National University
<b>Tkachuk V.I.</b>	Professor, Lviv Polytechnic National University
<b>Shynkarenko V.F.</b>	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

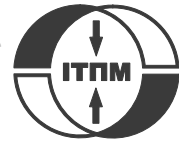
ISSN (online) 2309-3404

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

Підписано до друку 20.10.2017 р. Формат 60 x 90 ¼. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-05-2017. 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 40: Научное открытие метода взрывной имплозии для получения сверхкритической массы ядерного заряда и украинский «след» в американском атомном проекте «Манхэттен» ..... 3

### **Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка**

**Болух В.Ф., Щукин И.С.** Исследование тепловых процессов в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе циклического действия ..... 14

**Ягуп Е.В.** Силовой активный фильтр при работе на несимметричную и нелинейную нагрузки с управлением по оптимизационному алгоритму ..... 23

### **Теоретична електротехніка та електрофізика**

**Кривцун И.В., Пентегов И.В., Сидорец В.Н., Рымар С.В.** Методика обработки экспериментальных данных при моделировании дисперсии импеданса биологических тканей с помощью схемы замещения Фрике ..... 27

**Михайлов В.М., Чунихин К.В.** Об электростатической аналогии магнитостатического поля в неоднородной намагничивающейся среде ..... 38

**Розов В.Ю., Гринченко В.С., Ткаченко А.О.** Расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками ..... 41

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

**Баранов М.И., Князев В.В., Рудаков С.В.** Коаксиальный дисковый шунт для измерения в высоковольтной цепи высоковольтного генератора грозовых разрядов импульсов тока искусственной молнии с интегралом действия до  $15 \cdot 10^6$  Дж/Ом ..... 45

**Беспрозванных А.В., Мирчук И.А.** Оценка возможности нормальной эксплуатации кабелей на основе витых пар в поливинилхлоридной защитной оболочке в условиях повышенной влажности и температуры ..... 51

**Жекул В.Г., Смирнов А.П., Тафтай Э.И., Хвоцан О.В., Швец И.С.** Пьезоэлектрический волноводный датчик для измерения импульсного давления в замкнутых объемах жидкости при высоковольтном электрическом разряде ..... 55

### **Електричні станції, мережі і системи**

**Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Пелевина Е.Д.** Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации ..... 60

**Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Калужный Д.Н.** Особенности выбора батарей конденсаторов в электрических сетях с источниками интергармоник ..... 67

### **Ювілеї**

**Жемеров Георгий Георгиевич** (к 80-летию со дня рождения) ..... 71

**Кравченко Владимир Иванович** (к 70-летию со дня рождения) ..... 72

**Загірняк Михайло Васильович** (до 70-річчя з дня народження) ..... 73

## **TABLE OF CONTENTS**

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

**Baranov M.I.** An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 40: The scientific opening of the method of explosive implosion for the obtaining above critical mass of nuclear charge and Ukrainian «track» in the «Manhattan» American atomic project ..... 3

### **Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics**

**Bolyukh V.F., Schukin I.S.** Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action ..... 14

**Yagup E.V.** An active power filter at operation on the unbalanced and nonlinear loads with control by optimization algorithm ..... 23

### **Theoretical Electrical Engineering and Electrophysics**

**Krivtsun I.V., Pentegov I.V., Sydorets V.M., Ryamar S.V.** A technique for experimental data processing at modeling the dispersion of the biological tissue impedance using the Fricke equivalent circuit ..... 27

**Mikhailov V.M., Chunikhin K.V.** On electrostatic analogy of magnetostatic field in inhomogeneous magnetized medium ..... 38

Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Tkachenko O.O. Calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded cable shields covered by ferromagnetic cores ..... 41

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

Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Coaxial disk shunt for measuring in the heavy-current chain of high-voltage generator of storm discharges of impulses of current of artificial lightning with the integral of action to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm..... 45

Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. The evaluation of possibility of normal operation of cables based on twisted pairs with PVC jacket under the conditions of high humidity and temperature ..... 51

Zhekul V.G., Smirnov O.P., Taftaj E.I., Khvoshchan O.V., Shvets I.S. Piezoelectric waveguide sensor for measuring pulse pressure in closed liquid volumes at high voltage electric discharge ..... 55

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

Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization ..... 60

Sayenko Yu.L., Baranenko T.K., Kalyuzhniy D.N. Features of selection of capacitor banks in electric networks with interharmonic sources ..... 67

### **Anniversaries**

Zhemerov G.G. (on the 80th anniversary of his birth) ..... 71

Kravchenko V.I. (on the 70th anniversary of his birth) ..... 72

Zagirnyak M.V. (on the 70th anniversary of his birth) ..... 73

### **ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!**

*Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2018 рік – 330,18 грн., на два місяці – 55,03 грн., на чотири місяці – 110,06 грн., на шість місяців – 165,09 грн., на вісім місяців – 220,12 грн., на десять місяців – 275,15 грн. Передплатний індекс у каталозі ПАТ «УкрПошта»: 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 – РИИЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, GALE General Science Collection та Academic OneFile, DOAJ та in.*



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

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 40:  
НАУЧНОЕ ОТКРЫТИЕ МЕТОДА ВЗРЫВНОЙ ИМПЛОЗИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ МАССЫ ЯДЕРНОГО ЗАРЯДА И УКРАИНСКИЙ «СЛЕД»  
В АМЕРИКАНСКОМ АТОМНОМ ПРОЕКТЕ «МАНХЭТТЕН»**

*Наведено науково-історичний нарис про видатного американського ученого-хіміка і фізика Джорджа Богдана Кистяковського, що мав українське «коріння» і що вніс величезний внесок до розробки і створення перших атомних бомб США. Завдяки його науковим досягненням в галузі винаходу нових хімічних вибухових речовин і успішному розвитку ним методу вибухової імпульсії в 1945 році була реалізована на практиці теорія ядерного вибуху. Відмічені зусилля цього ученого в останні десятиліття його життя в боротьбі за припинення в світі гонки озброєнь і ядерне роззброєння.* Бібл. 21, рис. 10.

*Ключові слова:* історія створення в США і СРСР перших зразків ядерної зброї, атомна бомба, ядерний вибух, метод вибухової імпульсії і бомба, наукові досягнення, ядерне роззброєння.

*Приведен научно-исторический очерк о выдающемся американском ученом-химике и физике Джордже Богдане Кистяковском, имевшем украинские «корни» и внесшем огромный вклад в разработку и создание первых атомных бомб США. Благодаря его научным достижениям в области изобретения новых химических взрывчатых веществ и успешному развитию им метода взрывной импульсии в 1945 году была реализована на практике теория ядерного взрыва. Отмечены усилия этого ученого в последние десятилетия его жизни в борьбе за прекращение в мире гонки вооружений и ядерное разоружение.* Библ. 21, рис. 10.

*Ключевые слова:* история создания в США и СССР первых образцов ядерного оружия, атомная бомба, ядерный взрыв, метод взрывной импульсии и бомба, научные достижения, ядерное разоружение.

**Введение.** Всемирная история овладения в первой половине 20-го столетия выдающимися учеными и инженерами рода человеческого внутриядерной энергией и ее дальнейшего военно-стратегического использования из-за своей специфики и закрытости содержит еще не одну дюжину малоизвестных, любопытных и интересных для широкого читателя научно-технических фактов. Об одном из таких фактов в 2015 г. сообщила наша столичная газета «Зеркало недели» [1, 2]. Касался он выходца по существу с Украины (тогда в начале 20-го века с Российской империи) Джорджа Богдана (Георгия Богдановича) Кистяковского – выдающегося американского специалиста в области физической химии и твердых взрывчатых веществ (ВВ), внесшего огромный вклад в создание первых атомных бомб США и практическую реализацию теории ядерного взрыва [3]. Что собственно сделал украинец по происхождению Дж. Б. Кистяковский (рис. 1) такого ценного и важного для наступления на нашей планете атомной эры? Постараемся ниже с привлечением исключительно открытых источников и сообщений из всемирной сети Интернет в концентрированной форме краткого научно-исторического очерка проследить основные вехи жизненного и творческого пути этого легендарного ученого США, стоявшего у самых истоков разработки и создания людьми самого страшного оружия в истории человечества.

**1. Начало пути.** Родился Георгий Кистяковский 18 ноября 1900 г. в семье профессора права Киевского университета Богдана Александровича Кистяковского и его жены Марии (урожденной Беренштам) [4]. Среднее образование он получил в частных школах г. Киева. Осенью 1918 г. вступил в ряды Белой армии и до осени 1920 г. участвовал в боевых действиях. После поражения войск Врангеля в Крыму он попал вначале в Турцию, а затем в Германию. В 1921 г. поступил в Берлинский университет на химический

факультет, обучение в котором закончил за 3,5 года. В 1925 г. под научным руководством проф. М. Боденштайна успешно защитил в этом университете докторскую диссертацию на тему, посвященную проблеме разложения оксида хлора с помощью потока светового излучения [3]. В 1926 г. в качестве стипендиата Международного комитета по образованию в области физической химии был направлен в Пристонский университет (США) для научной стажировки [4].



Рис. 1. Выдающийся американский ученый-химик и физик Джордж Богдан Кистяковский (George Bogdan Kistiakowsky, 1900-1982 гг.), один из основных изобретателей и создателей первых атомных бомб США имплозивного типа [3]

По результатам выполненных исследований он в 1928 г. издал в США свою первую научную монографию «Фотохимические процессы», принесящую молодому ученому известность в области фотохимии. С 1930 г. в должности профессора стал преподавать

© М.И. Баранов

химию в Гарвардском университете (г. Бостон, США), с которым был связан до конца своей жизни. В 1933 г. Г.Б. Кистяковский принял гражданство США и стал носить новое имя – Джорджа Богдана Кистяковского. В годы Второй мировой войны занимался исключительно военными научно-техническими вопросами [3, 4]. Имел активную гражданскую позицию и был ярким противником германского фашизма. Поэтому в те военные годы этот ученый сосредоточил все свои физические, моральные и творческие силы на работах, напрямую направленных на победу над Германией. С 1941 г. Дж. Кистяковский стал членом Комитета по атомной энергии при Национальной академии наук США. В эту академию наук США он был избран за научные заслуги в области изучения химических ВВ. В 1942 г. он возглавил отдел по разработкам и испытаниям обычных химических ВВ в Национальном исследовательском комитете США по обороне [3, 4].

**2. Манхэттенский проект США.** Известно, что первооткрывателями атомной эры на планете Земля стали две наиболее могущественные страны мира – США и СССР. Для этого первоначально их наиболее выдающимися учеными-физиками были разработаны теоретические модели ядерно-физических процессов и ядерных боезарядов нового вида оружия огромной разрушительной силы. Их учеными и инженерами были проведены многочисленные эксперименты на физико-технических стендах для определения ряда ядерных констант. Исторически при практическом создании первых образцов ядерного оружия (на этапе работ по производству атомных бомб) на первый план вышли крупномасштабные вопросы, связанные с организацией в этих развитых странах мира принципиально нового вида промышленности – атомной индустрии, требующей огромных капиталовложений и совершенно новых технологий для производства как делящихся ядерных материалов, так и иных необходимых для реализации поставленных невиданных грандиозных научных и военных задач сопутствующих материалов ядерной (сверхвысокой) чистоты [5].

В США для достижения этой цели в кратчайшие сроки (при этом первые лица из политического руководства страны и находившиеся на ее территории выдающиеся физики мира постоянно помнили о проводимых в Германии аналогичных поисковых работах по созданию подобного сверхоружия) после подписания президентом страны Франклином Рузвельтом 19 января 1942 г. Указа о проведении работ по созданию в США атомной бомбы американское правительство в полной секретности запустило теперь ставший широко известным многим из нас Атомный проект США «Манхэттен» («Manhattan Project») [1-6]. С осени 1942 г. для интенсификации всего комплекса закрытых работ и перевода их в практическую плоскость этот научно-технический проект огромного военного назначения был передан в непосредственное ведение американской армии. Его административным руководителем был назначен бригадный генерал инженерных войск США 46-летний Лесли Гровс [5-7]. В качестве научного руководителя работ по указанному проекту с осени 1943 г. по просьбе Л. Гровса стал 39-летний физик-теоретик из Калифорнийского универ-

ситета (г. Беркли, США), профессор Роберт Оппенгеймер (1904-1967 гг.) [5-8]. Этот ученый-физик одновременно был назначен и директором нового Национального ядерного центра США – суперсекретной Лос-Аламосской научной лаборатории, расположенной в пустынном районе штата Нью-Мексико и занимающейся исключительно вопросами разработки и создания первых атомных бомб США [5-8]. В Манхэттенском проекте принимала участие, по сути, интернациональная команда ведущих ученых-физиков и специалистов со всего мира (естественно за исключением ученых-физиков, пребывающих в СССР и Германии), включающая 12 лауреатов Нобелевской премии по физике и химии [7, 9]. В работы данного проекта было задействовано более 130 тыс. человек. Все финансовые затраты по проекту списывались на виртуально существующий Манхэттенский инженерный округ, командующим которого был генерал Л. Гровс (отсюда, очевидно, по разработанной спецслужбами США легенде прикрытия и произошло название этого суперсекретного проекта). Понесенные денежные затраты на выполнение данного суперпроекта за период 1942-1945 гг. составили огромную по тем временам сумму – около 2 млрд. \$USA (в текущих ценах это составляет около 63 млрд. \$USA) [9]. Заметим, что в 1944 г. Всеобщий валовой продукт (ВВП) США составлял около 1499 млрд. \$USA [9]. Для сравнения следует отметить, что в этот период ВВП Германии составлял около 437 млрд. \$USA, ВВП СССР – 362 млрд. \$USA, ВВП Великобритании – 346 млрд. \$USA и Японии – 189 млрд. \$USA [9]. Из этих экономических данных видно, что в 1944 г. ВВП США превышал ВВП Германии, СССР, Великобритании и Японии вместе взятых. К этому необходимо добавить еще то, что США после оккупации немецкими войсками Франции в 1940 г. (до этого события Франция с ее всемирно знаменитой школой физиков-ядерщиков во главе с Фредериком Жолио-Кюри занимала в научном мире лидирующее положение по Урановой проблеме) достался урановый концентрат из Бельгийского Конго (страны в Центральной Африке) в объеме около 1200 т, а также серьезные расчетные наработки Великобритании по ее собственному Атомному проекту «*Tub Alloys*» (научный руководитель работ – профессор физики Дж. Томпсон) [9]. Здесь необходимо указать, что научная группа Дж. Томпсона, в которую входили и французские физики-ядерщики Х. Халбан и Л. Коварски – известные ученики Ф. Жолио-Кюри, уже в июле 1941 г. направила британскому правительству глубоко проработанные материалы по созданию урановой атомной бомбы, включая и расчет критической массы ее ядерной взрывчатки – изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  [9]. Учитывая сложную военную обстановку в Великобритании (постоянные немецкие бомбежки и опасность вторжения Германии) и нехватку на «туманном Альбионе» финансовых средств на дорогостоящие научные проекты, лидеры западных союзников по антигитлеровской коалиции в войне против Германии Ф. Рузвельт и У. Черчилль договорились в те суровые военные годы о взаимном обмене секретной информацией по атомной супербомбе. Гордые британцы, образно говоря «скрепя зубами» и понимая, что доб-

ровольной передачей американцам полученных ими данных по новому супероружию они теряют «ключ» к мировому господству, в конце концов, под давлением внешних и внутренних обстоятельств были вынуждены подарить США собственные атомные наработки.

Что касается Атомного проекта Германии (научный руководитель работ – выдающийся немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1932 г. Вернер Гейзенберг (1901-1976 гг.)), то, несмотря на захват ею в 1940 г. на обогатительной фабрике в г. Оолене при оккупации Бельгии 1200 т. уранового концентрата [9], нехватка высококвалифицированных специалистов (многие поспешно выехали из гитлеровской страны) и крайне недостаточное финансирование этих работ (около 10 млн. \$USA [9]) привели к краху их навязчивых идей по овладению первыми в мире внутриядерной энергией, созданию первыми атомной супербомбы и победе над СССР [7].

Относительно ядерных исследований военного характера в обескровленном тяжелыми людскими и материально-техническими потерями СССР, в этот период уже в течение ряда лет «на смерть» воюющем обычным вооружением против Германии с ее значительными собственными и европейскими ресурсами, следует сказать то, что Атомный проект СССР (научный руководитель работ – профессор Игорь Васильевич Курчатов (1903-1960 гг.)), стартовавший распоряжением ГКО СССР №2352 от 28 сентября 1942 г. «Об организации работ по урану», из-за слабого финансирования и недооценки в полной мере «наверху» стратегической важности этих работ до 20 августа 1945 г. выполнялся медленными темпами. После указанной даты и организации Спецкомитета при СМ СССР (председатель – маршал госбезопасности Л.П. Берия; заместитель председателя – нарком боеприпасов (начальник ПГУ), генерал-полковник Б.Л. Ванников; генерал-полковник А.П. Завенягин (зам. начальника ПГУ); члены – академики АН СССР П.Л. Капица и И.В. Курчатов) атомные работы в СССР приобрели невиданный по размаху и накалу характер [5, 7].

Поэтому принимая во внимание указанные выше и известные автору в общих чертах другие политические, экономические и научно-технические данные, можно вполне определенно заключить, что США в военный период 1942-1945 гг. по сравнению с противоборствующими участниками-сторонами Второй мировой войны имели наиболее благоприятные шансы первыми успешно осуществить разработку и создание первых атомных бомб. Американские ученые и специалисты, как первопроходцы в атомной гонке вооружений, пошли трудным путем: они параллельно создавали две принципиально отличающиеся между собой модели атомных бомб – «урановую» на основе делящегося изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и «плутониевую» на основе делящегося изотопа плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  [2-9].

**2.1. Метод «пушечного выстрела» для подрыва уранового ядерного заряда атомной бомбы.** Принципиальная схема построения урановой атомной бомбы на основе метода «пушечного выстрела» была изложена в английском отчете Комитета «Томпсона», переданном США осенью 1941 г. [9]. Ее автором был физик Уильям Парсонс. Данная схема преду-

сматривала создание критической массы (порядка 60 кг [9]) в делящемся нейтронами изотопе урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  с протеканием в ней цепной ядерной реакции взрывного типа [10]. Для этой цели в урановом заряде использовались две цилиндрические части с подкритическими массами: «снаряд» и «мишень» [6, 11]. Урановый «снаряд» (сплошная сборная из отдельных колец цилиндрическая болванка из обогащенного до 90 % урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) с помощью обычного пушечного ствола и бездымного порохового заряда со скоростью порядка 350 м/с посылался внутрь полой цилиндрической урановой «мишени» (сборной конструкции из отдельных полых цилиндров из обогащенного до 80 % урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) [9, 11]. При полном залете уранового «снаряда» в урановую «мишень» происходило образование надкритической массы ядерной взрывчатки, в которой с помощью нейтронного запала (внешнего источника нейтронов) инициировалась цепная ядерная реакция взрывного характера. Например, в первой американской урановой атомной бомбе «Little Boy» («Мальш») мощностью в тротиловом эквиваленте около 15 кт, взорванной утром (в 09 часов 16 мин.) 6 августа 1945 г. на высоте около 580 м над г. Хиросима (Япония), урановый «снаряд» ядерного заряда (длиной 160 мм и диаметром 100 мм) имел массу около 26 кг (обогащенный до 89 % уран  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ), а урановая «мишень» ядерного заряда (длиной 160 мм, внутренним диаметром 100 мм и наружным диаметром 160 мм) имела массу около 38 кг (обогащенный до 80 % уран  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) [9, 11]. Кстати, нейтронный запал в первой американской урановой атомной бомбе «Little Boy» («Мальш») был выполнен на основе бериллиево-полониевых инициаторов, испускающих поток нейтронов в момент образования в цилиндрическом ядре бомбы надкритической массы делящегося изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  [9, 11]. Для отражения во внутреннюю область бомбы потока нейтронов и удержания на требуемое время (порядка 500 нс [5]) надкритической массы изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  в сжатом состоянии с целью протекания в ней не менее 70-ти цепных звеньев ядерного деления [5] цилиндрическое ядро указанной урановой бомбы снаружи было обхвачено массивными цилиндрическими оболочками, выполненными из карбида вольфрама (для непосредственно прилегающей к ядерной взрывчатке) и упрочненной стали (для наружной бандажной оболочки) [9, 11]. Общая масса таких оболочек составляла около 2300 кг. Пушечный ствол длиной примерно 2000 мм, прочно закрепленный на толстой карбидной оболочке, совместно с казенной частью имел массу около 450 кг. Урановый «снаряд» в таком пушечном стволе бомбы развивал скорость до 300 м/с [9, 11]. В результате первая урановая атомная бомба США «Little Boy» («Мальш») при диаметре 0,7 м и длине 3 м имела общий вес около 4100 кг [5, 9, 11]. Экспериментальные данные США подтвердили, что при взрыве первой урановой атомной бомбы «Little Boy» («Мальш»), уничтожившей за мгновение около 170 тыс. жителей и 62 тыс. строений г. Хиросимы, энергия, выделяющаяся за счет протекания в изотопе урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  цепной ядерной реакции, «раздувает» ядерную сборку бомбы со скоростью около 1000 км/с [7, 11]. Поэтому при ее

подрыве успело прореагировать всего лишь до 1,4 % от 64 кг критической массы обогащенного до не менее чем 80 % урана  $^{235}\text{U}$  [11].

**2.2. Метод «взрывной имплозии» для подрыва плутониевого ядерного заряда атомной бомбы.** Подрыв плутониевой ядерной взрывчатки атомной бомбы на основе оружейного изотопа плутония  $^{239}\text{Pu}$  (рис. 2), синтезированного и выделенного в 1941 г. группой американских ученых-ядерщиков во главе с Гленном Сиборгом (за это важное открытие в 1951 г. он был удостоен Нобелевской премии по химии) [5, 12], с подкритической массой до 6,2 кг с помощью описанного в подразделе 2.1 метода «пушечного выстрела» оказался принципиально невозможным [9, 11].

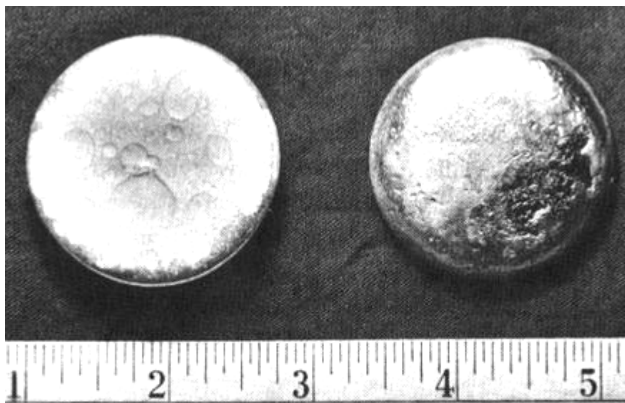


Рис. 2. Редчайший вид двух полусферических отлитых в специальной металлургической печи заготовок серебристо-белого цвета (слева с плоской внутренней частью, а справа с округлой внешней частью) подкритической массы делящегося ядерного материала из оружейного плутония  $^{239}\text{Pu}$ , примененного в первых американских импловивных атомных бомбах «Trinity» («Троица») и «Fat Man» («Толстяк») [6]

Основной причиной тому являлось то, что оружейный плутоний  $^{239}\text{Pu}$ , вырабатываемый ныне в промышленных масштабах в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов в процессе длительного облучения нейтронами содержащегося в них природного изотопа урана  $^{238}\text{U}$  [5, 10], характеризуется существенно большим (примерно в 100 раз [6, 11]) нейтронным фоном (этот делящийся ядерный материал сильно «фонит» или «светится»). Из-за такого относительно большого фонового потока нейтронов еще при подлете плутониевого «снаряда» к плутониевой «мишени» между ними преждевременно начинается цепная ядерная реакция, приводящая к неэффективному выделению в зоне их «встречи» внутриядерной энергии. При этом интересно отметить тот один запомнившийся мне на всю жизнь факт советского периода из собственной научной биографии, когда в свое время автору при пребывании по работе в закрытом научном центре СССР мирового уровня – ВНИИТФ (г. Челябинск-70), который ныне носит название Российского федерального ядерного центра №2 (г. Снежинск), удалось на одной из уникальных ядерных установок воочию увидеть управляемое протекание цепной ядерной реакции между двумя вертикально сближающимися на открытом воздухе внутри толстых свинцовых разъемных кожухов массивными урановыми дисками. Причем, эта реакция сопровож-

далась визуально видимым интенсивным шипящим (ну, прямо как электрическая корона!) свечением голубовато-синего цвета на участке междискового воздушного промежутка длиной до 30 мм (теперь можно только догадываться об интенсивности нейтронного излучения в зоне этого воздушного промежутка). Тогда во избежание нейтронного облучения все наблюдающие это впечатляющее ядерно-физическое явление находились на расстоянии около 10 м от активной зоны за толстым (толщиной более 100 мм) освинцованным стеклом, обеспечивающим нашу радиационную защиту. Возвращаясь снова к научному предмету нашего ядерно-физического рассмотрения, укажем, что из практического применения такой схемы подрыва в атомной бомбе плутониевого ядерного заряда получался, образно говоря, один ядерный «пшик» («fizzle») [11]. Для эффективной ядерной «детонации» плутониевого заряда в атомной бомбе при использовании метода «пушечного выстрела» скорость соединения его (заряда) частей должна была иметь технически недостижимый уровень (более 1 км/с) [11]. При этом не следовало было забывать и о том, что изотоп урана  $^{235}\text{U}$  лучше чем изотоп плутония  $^{239}\text{Pu}$  выдерживал сильные механические нагрузки [11]. Кстати, согласно современным данным для улучшения стабильности физических свойств и повышения сжимаемости (пластичности) изотоп плутония  $^{239}\text{Pu}$  легируется небольшим количеством галлия  $^{70}\text{Ga}$  [11]. Вот поэтому в конце 1943 г. работы по созданию в США плутониевой атомной бомбы зашли в тупик. А как оказалось в дальнейшем, именно плутониевый вид ядерного заряда и определил в мире магистральный путь работ по созданию всего ядерного (атомного) и термоядерного оружия. Ученым требовалось принципиально новое техническое решение для создания и подрыва надкритической массы ядерного заряда атомной бомбы из оружейного плутония  $^{239}\text{Pu}$  [9, 11].

И такое новое научно-техническое решение в Лос-Аламосской лаборатории США в начале 1944 г. было найдено. Его автором оказался американский физик Сет Неддермейер [9]. Он предложил **метод «взрывной имплозии»** (этот термин происходит от англ. слова «implosion» – «взрыв внутрь» [5, 13]), предусматривающий за счет обжатия взрывной сходящейся к центру бомбы волной от подрыва химического ВВ плутониевой ядерной взрывчатки достигать в ней надкритической массы. Согласно такому способу подрыва ядерной взрывчатки из оружейного плутония  $^{239}\text{Pu}$  снаружи по всему периметру этого делящегося ядерного материала бомбы одновременно подрываются равномерно распределенные по нему (периметру) заряды из обычного химического ВВ (например, из тринитротолуола (тротила) или гексагена) [5, 9, 11]. Многочисленные заряды с химическим ВВ в действие приводятся при помощи системы электродетонаторов, срабатывающих от одного пускового устройства. Одно дело было предложить импловивную схему для детонации ядерного заряда атомной бомбы (да, это было тогда, безусловно, революционным шагом в области атомной науки и техники), а другое дело ее реализовать практически. Шли месяцы лабораторных испытаний такой схемы построения



плутониевой атомной бомбы, а приемлемых результатов не было.

И вот тут-то (весной 1944 г.) научный руководитель американского Атомного проекта «Манхэттен» Р. Опенгеймер и привлекает в полном объеме к созданию плутониевой атомной бомбы имплозивного типа ведущего ученого США в области разработки и испытаний обычных химических ВВ, профессора Гарвардского университета Дж. Кистяковского [9]. Отметим, что еще до указанного выше срока, практикующий химик уже выполнял отдельные работы в рамках данного суперпроекта. С весны же 1944 г. Дж. Кистяковский становится штатным руководителем отдела G в Лос-Аламосской лаборатории, занимающимся ВВ и отвечающим за решение проблемы имплозивного обжатия плутониевого ядерного заряда атомной бомбы [4, 9]. На особую важность, научно-технический уровень и объем выполняемых в этом отделе работ может указывать уже то, что к началу 1945 г. в подчинении Дж. Кистяковского находился коллектив напряженно и с полной отдачей работающих единомышленников, включающий около 600 ученых и инженеров [2, 4].

Несмотря на строгую засекреченность во всех странах мира устройства ядерных боеприпасов, благодаря некоторым рассекреченным на сегодня данным по устройству первых атомных бомб США мы можем правильно с позиций физики сверхвысокого давления, атомной и ядерной физики и, как оказалось, электрофизики излагать основные принципы их схемно-конструкционного построения и функционирования [6, 11]. Дж. Кистяковскому и сотрудникам его отдела G предстояло для имплозивного обжатия плутониевого заряда бомбы разработать на основе твердых химических ВВ новую сферическую взрывчатую оболочку и детонационную систему ее подрыва, которые бы обеспечивали получение направленной и растущей к центру бомбы, где размещался сферической формы заряд из оружейного плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  с подкритической массой, сферической ударной газодинамической волны [6]. Расчетные оценки, выполненные Дж. Кистяковским, показали, что для достижения этой цели в разрабатываемой им в Лос-Аламосской лаборатории США взрывчатой оболочке необходимо использовать как «быстрые», так и «медленные» бризантные химические ВВ. Для этого им было создано новое «медленное» бризантное химическое ВВ (смесь тротила (33 %), нитрата бария (66 %) и связующего воска (1 %)), получившее название «баратол» и имеющее стабильную скорость детонации (скорость распространения в ВВ процесса химического разложения [5, 13]) около 4 км/с [3, 6]. В качестве «быстрого» бризантного химического ВВ в плутониевой атомной бомбе предлагалось применение композиции В (смесь гексагена (60 %), тротила (39 %), и связующего воска (1 %)), имеющей скорость детонации до 9 км/с [5, 6]. «Медленное» бризантное химическое ВВ использовалось в наружной части массивной взрывчатой оболочки, а «быстрое» бризантное химическое ВВ – в ее внутренней части, примыкающей к сферическому массивному алюминиевому толкателю (поглотителю нейтронов) [3, 6]. Для полноты решаемой

коллективом Дж. Кистяковского сложной газодинамической задачи из химико-физической области ВВ отметим, что точность сборки между собой отдельных литых бризантных линзовых частей сферической взрывчатой оболочки составляла менее 1 мм. При этом для избежания неоднородностей в направляемой внутрь бомбы ударной волне особые требования предъявлялись к точности выполнения сферических поверхностей в отдельных литых бризантных линзовых частях массой до 100 кг указанной взрывчатой оболочки общей массой до 2600 кг [6, 11]. Массивная взрывчатая оболочка с ее наружной (наружная подоболочка) и внутренними (внутренняя подоболочка) частями совместно со сжимаемыми ею массивным сферическим алюминиевым толкателем и расположенным внутри него массивным сферическим урановым корпусом (отражателем нейтронов, выполненным из природного изотопа урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ) должны были осуществлять строго симметричное обжатие небольшого (диаметром до 100 мм) и выполненного в виде двух разделенных тонким золотым слоем (толщиной до 100 мкм) полусфер ядерного заряда из оружейного плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  с подкритической массой, расположенного внутри такой сферической ядерно-химической «слойки» и содержащего внутри себя миниатюрный нейтронный бериллиево-полониевый инициатор сферической формы [6, 7, 11].

В результате научных изысканий Дж. Кистяковским совместно с сотрудниками его отдела G а Лос-Аламосской лаборатории США в феврале 1945 г. была предложена окончательная конструкция взрывчатой оболочки для первой плутониевой атомной бомбы, формирующей сферическую растущую к ее центру ударную газодинамическую волну. Наружная и внутренние подоболочки этой взрывчатой оболочки были выполнены из 32 взрывных литых линз, 20 из которых были шестиугольные, а 12 – пятиугольные [6, 11]. Указанные линзы, изготовленные точным литьем из расплавленного «медленного» и «быстрого» описанных выше бризантных химических ВВ, между собой соединялись по образцу изготовления кожанной оболочки всем нам известного футбольного мяча, образуя сферическую взрывчатую сборку толщиной до 420 мм и наружным диаметром до 1300 мм [6, 7, 11]. Общий вес такой взрывчатой оболочки плутониевой атомной бомбы составлял около 2500 кг [6, 11]. Полый алюминиевый толкатель с долей бора  ${}_{5}^{11}\text{B}$  (до 40 %), предназначенный для поглощения вылетающих из плутониево-урановой сборки нейтронов и уменьшения снижения давления позади фронта детонационной волны во взрывчатой оболочке (это решение приводило к усилению давления прошедшей к центру газодинамической волны), при наружном диаметре в 460 мм имел толщину около 115 мм и весил до 120 кг [6]. При указанной конструкции взрывчатой оболочки полый урановый корпус плутониевой атомной бомбы из природного изотопа урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , предназначенный для отражения и сохранения в ее центре нейтронов, при толщине стенки в 70 мм имел наружный диаметр 230 мм и массу около 120 кг [6]. Урановый корпус и плутониевый заряд бомбы образовывали ее подкритическую систему. Поэтому при ее

взрыве до 20 % выделяемой внутриядерной энергии приходилось на реакции деления в урановом корпусе бомбы [6, 7]. Отметим, что при импловзивном взрыве оболочки из указанных бризантных химических ВВ, создающем давление в сотни тысяч атмосфер в центральной части бомбы, наступало уменьшение диаметра сферического плутониевого заряда («ядра» бомбы) до 2,5 раз, что приводило к увеличению до пяти раз (с учетом потерь массы на испарение делящегося ядерного материала) плотности оружейного плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  и к появлению в нем за счет соответствующего уменьшения его критической массы в итоге до пяти критических масс [6, 7, 11]. Укажем, что первоначальный диаметр подкритических сферических частей плутониевого заряда бомбы составлял 90 мм, что обеспечивало наличие в нем подкритической массы до 6,2 кг [6, 7, 11]. Для запуска реакций ядерного деления в оружейном плутонии  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  с полученной сверхкритической массой был необходим инициирующий их поток нейтронов. С этой целью внутри полусфер плутониевого заряда была выполнена сферическая полость диаметром 25 мм для размещения в ней нейтронного инициатора, содержащего полу сферическую бериллиевую оболочку диаметром 20 мм с толщиной стенки 6 мм, внутри которой был вложен бериллиевый вкладыш диаметром 8 мм [6, 7, 11]. На наружной поверхности бериллиевого вкладыша и выполненных на внутренней поверхности бериллиевой оболочки клиновидных щелях были вначале нанесены слои никеля и золота, а затем тонкий слой радиоактивного полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  общей массой до 11 мг [6, 7, 11]. Тонкие слои никеля и золота до импловзивного взрыва оболочки из химических ВВ предохраняли полу сферу и вкладыш-сферу из бериллия  ${}_{4}^9\text{Be}$  от действия на них  $\alpha$ -частиц (ядер изотопа гелия  ${}_{2}^4\text{He}$  [10]), испускаемых ядрами полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$ . Нейтронный инициатор активизировался при достижении сходящейся ударной газодинамической волны от импловзивного взрыва снаружи химических ВВ центра плутониевого заряда бомбы. В этот момент происходило сверхбыстрое разрушение нейтронного инициатора и смешивание атомов полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  с бериллием  ${}_{4}^9\text{Be}$ . Испускаемые ядрами полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$   $\alpha$ -частицы поглощались в образовавшейся в центре заряда радиоактивной смеси бериллием  ${}_{4}^9\text{Be}$ , ядра которого начинали активно испускать нейтроны, воздействующие изнутри на делящийся оружейный плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  со сверхкритической массой [6, 7]. В итоге в плутониевом ядерном заряде бомбы начинала протекать цепная ядерная реакция взрывного типа.

**2.3. Применение электрического взрыва тонких проводников для детонации химических ВВ в первых атомных бомбах США.** В первых американских плутониевых атомных бомбах для точной синхронизации подрыва электродетонаторов бризантных ВВ их взрывчатых оболочек (см. подраздел 2.2 ) были применены тонкие электрически взрывающиеся проводники (ЭВП) [6, 7, 11]. Электрический взрыв коротких отрезков тонких ЭВП, осуществляемый с допуском до  $\pm 10$  нс и вызывающий одновременное срабатывание 32 электродетонаторов и соответственно детонацию всех 64 линз из химических ВВ наружной и

внутренней взрывчатых подболочек бомбы, производился за счет подачи по многочисленным электрическим кабелям на ЭВП от одной заряженной высоковольтной конденсаторной батареи импульса большого затухающего синусоидального тока [6, 15]. Вес такого пускового электроустройства вместе с конденсаторной батареей составлял примерно 200 кг [6, 7].

**3. Великий физический эксперимент ученых-ядерщиков США в пустыне Аламогордо.** Учитывая колоссальную научную и технологическую сложность разработки надежных конструкций и производства в «металле» ведущими странами мира ядерного оружия, можно вполне аргументировано говорить о том, что этот вид зловещего (дьявольского) оружия массового уничтожения всего сущего на нашей планете является результатом предшествующего ему мирового развития науки и техники. И вот парадоксальным апофеозом научно-технических успехов человечества в 20-ом веке по воле объективного процесса развития нашей цивилизации и должен быть стать великий физический эксперимент американских ученых и инженеров, впервые демонстрирующий всем ядерный взрыв в пустынном районе Земли первой экспериментальной плутониевой атомной бомбы США «Trinity» («Троица») и соответственно высвобождение огромных запасов энергии, заключенных в микромире вещества.

Безусловно, что эта уникальная демонстрация была не для всех, а лишь для 425 избранных ученых и специалистов, прибывших накануне этого исторического события на военный полигон США в пустыне Аламогордо (штат Нью-Мексико), где на стальной башне (рис. 3) был установлен и подготовлен к взрыву первый прототип плутониевой атомной бомбы под кодовым названием «Trinity» («Троица») [7]. Укажем, что в ряде источников эту бомбу называют еще как «Gadget» («Штучка») [14]. Мы остановимся в своем повествовании на первом названии этой бомбы [5, 9].



Рис. 3. Общий вид эпицентра будущего ядерного взрыва со стальной башней высотой до 30 м, на вершине которой была размещена направляемая туда с помощью грузоподъемных механизмов первая американская плутониевая атомная бомба «Trinity» («Троица») (военный полигон США в пустыне Аламогордо, штат Нью-Мексико, 15 июля 1945 г.) [7]

По-моему мнению, нашего внимания заслуживает царившая атмосфера среди авторов-разработчиков

этой ужасной с общечеловеческих позиций и ценностей американской атомной бомбы, а также собравшихся на испытательном полигоне США ведущих ученых и специалистов. Многие из них интуитивно осознавали, что находятся в шаге то ли от невиданного еще никем научного открытия, то ли от невиданной катастрофы. Например, лауреат Нобелевской премии по физике за 1938 г. Энрико Ферми, работавший в Лос-Аламосской лаборатории над созданием первых атомных бомб США [5], считал, что после взрыва этой атомной бомбы из присутствующих ее разработчиков в железобетонном бункере на расстоянии 10 миль от его эпицентра не выживет никто [9]. Дж. Кистяковский поспорил с Р. Оппенгеймером на свою месячную зарплату (700 \$USA), что разработанный механизм импловзивного взрыва сработает успешно и все останутся живыми [9]. При объявлении 10-ти секундной готовности все находившиеся в командном бункере стали неистово, как в последний раз, молиться и вспоминать слова из Евангелия [9]: «...Верую! Господи, помоги моему неверию!». В этот момент Р. Оппенгеймер никак не мог взять себя в руки: от нервного напряжения его всего трясло [9]. Сразу после того, как прогремел взрыв бомбы и когда над пустыней поднялся огромный, до самого неба, столб газа и дыма, на котором словно парашют раскрылся «ядерный гриб» (рис. 4), Р. Оппенгеймер, нарушив «гробовое» молчание, воскликнул [8, 9]: «Работает!». Большинство из присутствующих с ним в бункере были просто подавлены и ошемлены этим грандиозным взрывом и просто молчали. Тогда же быстро пришедший в себя Дж. Кистяковский громко сказал [9]: «Я уверен, что когда настанет конец света, в последнюю миллисекунду существования Земли человечество увидит именно то, свидетелями чего мы только что стали».



Рис. 4. Внешний вид «ядерного гриба» от взрыва первой экспериментальной плутониевой атомной бомбы США «Trinity» («Троица») (военный полигон США в Аламогордо, штат Нью-Мексико, 05 часов 30 мин., 16 июля 1945 г.) [7]

На рис. 4, слева от «ядерного гриба», отчетливо видны извилистые «дорожки» многочисленных каналов воздушных электрических разрядов, сопровождающих указанный первый в современной истории человечества ядерный взрыв (ЯВ). Образование в воздушной атмосфере подобных электрических разрядов связано с интенсивным разделением в ней в зоне ЯВ электрических зарядов обеих полярностей, приводя-

щим к возникновению в прилегающей к «ядерному грибу» высокоионизированной газовой среде мощного электромагнитного импульса ЯВ, являющегося наряду с проникающим радиационным излучением, световым излучением и ударной волной одним из основных поражающих факторов ядерного оружия [11].

После ядерного взрыва 16 июля 1945 г. первой американской экспериментальной импловзивной атомной бомбы «Trinity» («Троица») с плутониевой «начинкой» подкритической массой до 6,2 кг мощностью в тротиловом эквиваленте около 18 кг от стальной башни (см. рис. 3) осталась лишь только часть ее оплавленного железобетонного основания (рис. 5). [2, 5].



Рис. 5. Научный и административный руководители американского Атомного проекта «Манхэттен» Роберт Оппенгеймер (слева) и Лесли Гровс (справа) на месте ядерного взрыва первой импловзивной плутониевой атомной бомбы «Trinity» («Троица») (военный полигон США в 400 км на юг от г. Лос-Аламос, штат Нью-Мексико, сентябрь 1945 г.) [7]

Из воспоминаний свидетеля того первого в современной истории человечества испытания в безлюдном районе Земли ядерного оружия, генерала американской армии Т. Фаррелла [7, 9]: «... Это было нечто никем доселе невиданное. При взрыве была потрясающе красивая и страшная игра золотого, пурпурного, фиолетового, серого и голубого цветов. Мы чувствовали себя маленькими богохульными созданиями, замахнувшимися на укрощение сил, до этого подвластных только Всевышнему». В радиусе 1,5 км от эпицентра взрыва первой импловзивной плутониевой атомной бомбы «Trinity» («Троица») расплавился верхний слой песка, превратившись на поверхности в стеклообразное вещество зеленоватого цвета – тринитит (это название впервые искусственно полученного на Земле вещества, наверное, произошло от названия американской бомбы, «породившей» его) [5-7]. Деструктивная сила осуществленного американцами ядерного взрыва настолько повлияла на людскую психику, что по случаю успешного испытания первой плутониевой атомной бомбы в Национальном ядерном центре США (г. Лос-Аламос) не стали устраивать никаких праздничных мероприятий и даже вечеринок [9].

#### 4. Устрашающие атомные бомбардировки США в 1945 г. японских городов.

12 апреля 1945 г. умер Франклин Рузвельт и новым президентом США стал Гарри Трумэн. На следующий день 13 апреля 1945 г. министр обороны США Генри Стимсон был вынужден доложить новому американскому президенту и главнокомандующему армии США о супер-проекте «Манхэттен» (удивительно, но, будучи вице-президентом, Г. Трумэн ничего не знал о нем!) [6, 16]. Именно на долю этого президента США судьбою выпало право принимать важное политическое решение о первом военном применении ядерного оружия. Для демонстрации всему миру своей военной силы и устрашения не только своего противника во Второй мировой войне – Японии, но и своего союзника – СССР 11 мая 1945 г. руководство Пентагона с одобрения своего главнокомандующего – президента США Г. Трумэна приняло решение о нанесении первых боевых ядерных ударов по мирным японским городам – Хиросиме, Кокуре и Нагасаки [16]. Обязательным условием проведения атомных бомбардировок указанных объектов было наличие чистого неба над ними (во-первых, для лучшего прицеливания с большой высоты полета самолета (10-12 км), а, во-вторых, для проведения фотосъемки результатов уникальных бомбардировок). Эти бомбардировки должны были состояться, начиная с 4 августа 1945 г. Однако, из-за плохой погоды первая из них (ядерный удар по г. Хиросима) была перенесена на 6 августа 1945 г. [9, 16]. О трагических последствиях атомной бомбардировки 6 августа 1945 г. г. Хиросимы, когда была использована первая урановая атомная бомба «Little Boy» («Малыш») мощностью в тротиловом эквиваленте около 15 кг, было указано выше в подразделе 2.1 и [17]. В сброшенной 9 августа 1945 г. с американского стратегического бомбардировщика B-29 (рис. 6) на японский г. Нагасаки плутониевой атомной бомбе «Fat Man» («Толстяк») мощностью в тротиловом эквиваленте около 21 кг из-за разлета во все стороны со скоростью до 1000 км/с ее плутониево-урановой сборки успело прореагировать (поделиться ядерным образом) только 20 % от примерно 6,2 кг первоначальной массы заряда в ней оружейного плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  [6, 18].



Рис. 6. Американский стратегический бомбардировщик B-29, использовавшийся США в 1945 г. для нанесения устрашающих ядерных ударов по мирным городам Японии [7, 18]

Из-за того, что плутониевая атомная бомба «Fat Man» («Толстяк»), имеющая длину 3,25 м, диаметр 1,5 м и общий вес до 4600 кг, была взорвана на высоте около 500 м на окраине г. Нагасаки (ядерный удар по

первоначальной цели – г. Кокуре был отменен из-за большой облачности над ним) число погибших жителей этого мирного города сразу после ядерного взрыва над ним этой бомбы (рис. 7) составило лишь около 90 тыс. человек [6, 18]. Население и правительство Японии после этих двух исторических случаев первого боевого применения США ядерного оружия с ужасающими людскими потерями и разрушительными последствиями были в непередаваемом шоке. 14 августа 1945 г. (напомним, что 9 августа 1945 г. СССР объявил Японии войну и своими победоносными молниеносными боевыми операциями на Дальнем Востоке практически принудил сухопутную Квантунскую армию Японии численностью до 1 млн. солдат и офицеров к капитуляции) император Японии Хирохито после посещения мест атомных бомбардировок США японских городов взмолился о мире и заявил [9, 18]: «...Япония вынуждена принять условия Потсдамской декларации». После этого 2 сентября 1945 г. на американском линкоре «Миссури» уполномоченными представителями СССР, США и Японии был подписан Акт об ее безоговорочной капитуляции и поставлена «жирная точка» во Второй мировой войне [9, 18].



Рис. 7. Уникальный фотоснимок японского фотолобителя-очевидца, запечатлевшего для истории взрыв американской плутониевой атомной бомбы «Fat Man» («Толстяк») (11 часов 02 мин., 9 августа 1945 г., г. Нагасаки, Япония) [7, 18]

**5. Некоторые новейшие сведения об «утечке» атомных секретов США в СССР.** Всем работам по Атомному проекту США «Манхэттен» был присвоен высший гриф секретности [5, 6, 9]. СССР с самого начала этих работ стал создавать вокруг данного супер-проекта разветвленную разведывательную сеть [9, 11]. На СССР «работали» не только советские агенты, но и американские, британские и итальянские ученые и специалисты, участвующие в выполнении ряда работ по этому проекту [5, 9]. Считается, что благодаря активным усилиям агентуры внешняя разведка СССР добыла по Атомному проекту США «Манхэттен» около 12 тыс. листов формата А4 подробной информации, касающейся конструкций первых атомных бомб США, сведений по свойствам применяемых в них делящихся и иных радиоактивных материалов, а также технологий получения делящегося изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и делящегося изотопа плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  [5]. Поэтому, безуслов-

но, недаром в 1950-х годах в США проходили судебные процессы против супругов Джулиуса и Этель Розенберг, Дэвида Грингласса (брата Э. Розенберг) и Дональда Маклауда, передававших СССР секретные сведения по Атомному проекту США «Манхэттен» [9]. США установили, что важным завербованным советскими спецслужбами агентом был английский физик-теоретик Клаус Фукс, ставший с сентября 1944 г. непосредственным участником разработки и создания первых американских атомных бомб [5, 9]. Со временем на беспоконную «поверхность» шпионажа в пользу СССР «всплыли» новые имена: Джона Керн-росса (из знаменитой «Кембриджской пятерки») и Тэда Холла, «сливавших» атомные секреты США советской разведке [9]. Недавно (весной 2007 г.) президент России В.В. Путин присвоил звание Героя России (посмертно) советскому патриоту-химику Жоржу Ковалю, закончившему до войны Московский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева, работавшему с 1940-х годов легально в США по специальности и передававшему в СССР ценные сведения о проводимых в закрытых атомных городах США Ок-Ридже и Хэнфорде работах по производству делящихся изотопов урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  [5, 9]. Принято считать, что именно данные Ж. Ковалю помогли научному руководителю Атомного проекта СССР, академику АН СССР И.В. Курчатову в начале 1945 г. принять стратегически правильное решение о разработке и создании в СССР первой плутониевой атомной бомбы под рабочим кодовым названием «Первая молния» [9, 11]. СССР в то время «потянуть» создание сразу двух типов атомной бомбы (урановой и плутониевой) был в экономическом плане просто не в состоянии. Дальнейшие события в мировой гонке ядерных вооружений подтвердили полную правоту такого ответственного решения волевого и мудрого советского физика-ядерщика. 29 августа 1949 г. (в 10 часов 05 мин.) на Семипалатинском ядерном полигоне (Юго-восточный Казахстан) СССР успешно осуществил в пустынном районе своей территории испытание первой советской плутониевой атомной бомбы мощностью около 22 кт в тротиловом эквиваленте (рис. 8). По большому счету советская плутониевая атомная бомба под окончательным кодовым названием РДС-1 (эта аббревиатура по легенде прикрытия советских спецслужб происходила от словосочетания «Реактивный Двигатель Сталина» [19]) являлась в целом определенным образом доработанной нашими физиками-ядерщиками копией американской плутониевой атомной бомбы «Fat Man» («Толстяк») [5, 20]. Перепроверив в научных лабораториях основные добытые советской внешней разведкой данные об устройстве первых атомных бомб США и убедившись в их достоверности, политическое руководство советской страны в лице его лидера, председателя СМ СССР И.В. Сталина и научно-административное руководство Атомного проекта СССР (в лице Л.П. Берия и И.В. Курчатова) в узком кругу приняли строго закрытое решение о следовании при создании первой советской атомной бомбы уже апробированным физиками-ядерщиками и специалистами по обычным ВВ американским путем [19-21].

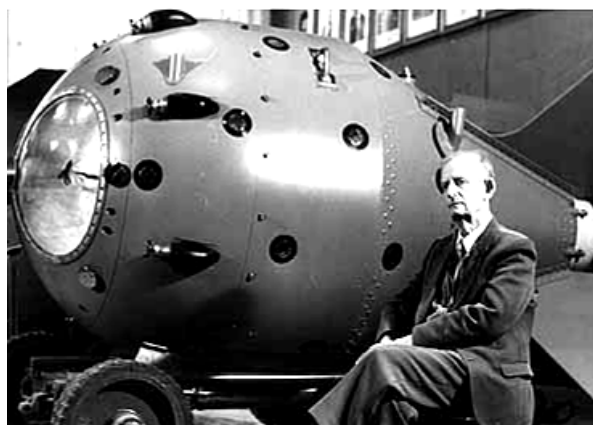


Рис. 8. Внешний вид первой плутониевой атомной бомбы СССР под кодовым названием РДС-1 мощностью до 22 кт в тротиловом эквиваленте, разработанной и созданной под руководством рядом сидящего с полномасштабным макетом этой бомбы академика АН СССР Юлия Борисовича Харитона (1904-1996 гг.) (музей ВНИИЭФ, ныне носящего название Российского федерального ядерного центра №1; г. Арзамас-16, называемого сейчас г. Саров; 1984 г., РФ) [5, 16]

Для СССР тогда было жизненно необходимым в целях обеспечения собственной безопасности любым путем «выиграть» время и побыстрее покончить с монополией США в области ядерного оружия. Поэтому и по прошествии более чем 70 лет с момента начала в СССР невиданной по финансовым затратам и предельно форсированной по временным срокам военной промышленной эпопеи по созданию собственной атомной бомбы объективно правильно выглядит вышеуказанное стратегическое решение СССР в области советских ядерных исследований и изготовления в сжатые сроки первых образцов атомной бомбы.

**6. Научная, учебная и политическая деятельность Дж. Кистяковского после атомного проекта США «Манхэттен».** Сразу после успешного завершения работ в Лос-Аламосской лаборатории по созданию первых атомных бомб США Дж. Кистяковский вернулся к научно-преподавательской деятельности в Гарвардском университете (рис. 9) [2-4]. С 1947 г. по 1950 г. он заведовал кафедрой химии в этом университете США. В период 1953-1958 гг. Дж. Кистяковский был членом Консультативного комитета Минобороны США по баллистическим ракетам [2-4]. В 1957 г. он как известный ученый в области физической химии и прекрасно зарекомендовавший себя менеджер при выполнении ответственных в высшей мере работ по Атомному проекту США получил приглашение президента США Д. Эйзенхауэра (рис. 10) войти в президентский Совет по вопросам науки и техники. На данной работе он не оставался долго в «тени» и уже в 1959 г. возглавил этот Совет в администрации президента США. В период 1959-1961 гг. Дж. Кистяковский возглавлял также в администрации президента США Управление по научно-технической политике. Пребывая в Белом Доме, этот ученый активно проводил и внедрял в сознание политической элиты страны политику ядерного разоружения [2, 3, 9].

Находясь в должности советника президента США по науке и технике до 1961 г., Дж. Кистяковский осуществлял консультации первого лица американского государства по вопросам координации среди

различных учреждений страны комплекса научно-исследовательских работ и подготовки научных кадров. В 1965 г. за научные заслуги он был избран вице-президентом Национальной академии наук США. Эту почетную должность он занимал вплоть до 1972 г. [9].



Рис. 9. Профессор Гарвардского университета Дж. Кистяковский после успешного завершения исследований в Лос-Аламосской лаборатории США по атомной проблематике вновь за своей любимой научно-педагогической работой [3]



Рис. 10. Президент США Д. Эйзенхауэр (справа) и его специальный помощник по вопросам науки и техники Дж. Кистяковский (слева) (г. Вашингтон, Белый Дом, 1958 г.) [3, 4]

Выйдя на пенсию, Дж. Кистяковский активно включился в борьбу против распространения в мире ядерного оружия. В 1977 г. он возглавил американский Совет «За сохранение жизни» [3, 4]. Считается, что Дж. Кистяковский оказался в США одним из самых успешных ученых-украинцев. В свое время его главные научные разработки в области физической химии и химических ВВ сравнивали с известными изобретениями шведского инженера и бизнесмена Альфреда Нобеля (1833-1896 гг.) [3-5, 12]. За выдающиеся научные достижения Дж. Кистяковский в США был удостоен премии Уилларда Гиббса (1960 г.), Национальной научной медали США (1967 г.), медали Пристли (1972 г.) и медали Франклина (1972 г.) [2-4]. В 1982 г. его документы готовили на Нобелевскую премию мира [9]. Скончался известный американский ученый-химик и физик (этот знаменитый выходец

с Украины), добившийся упорным трудом значительных результатов в развитии физической химии, в теории и практике химических ВВ, в также в разработке и создании первых образцов ядерного оружия и в борьбе за мир во всем мире, 7 декабря 1982 г. [2-4, 9].

**Выводы.** Американский ученый-химик и физик Джордж Богдан Кистяковский (George Bogdan Kistiakowsky, 1900-1982 гг.) украинского происхождения оставил после себя заметный научный «след» не только в области физической химии при разработке новых химических взрывчатых веществ, но и в области физики сверхвысоких давлений и ядерной физики при разработке и создании в военный период 1942-1945 гг. в США в рамках американского Атомного проекта «Манхэттен» первых атомных бомб имплозивного типа на основе изотопа плутония  $^{239}\text{Pu}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джордж Богдан Кистяковский и проект «Манхэттен» // Газета «Зеркало недели». – 14.08.2015. – №28-29.
2. <http://gazeta.zn.ua/personalities/dzhordzh-bogdan-kistyakovskiy-i-proekt-manhetten>.
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Кистяковский,\\_Георгий\\_Богданович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Кистяковский,_Георгий_Богданович).
4. <http://www.pseudology.org/science/KistyakovskyGB.htm>.
5. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
6. [http://ruatom.ru/milit/fm\\_at\\_tinian.jpg](http://ruatom.ru/milit/fm_at_tinian.jpg).
7. [www.infozoom.ru/pervaya-atomnaya-bomba.html](http://www.infozoom.ru/pervaya-atomnaya-bomba.html).
8. Рузе М. Роберт Оппенгеймер и атомная бомба / Пер. с франц. – М.: Атомиздат, 1965. – 150 с.
9. [http://frazza.ua/analytics/26.09.15/230879/manhettenskiy-proekt-ukrainskiy-sled-chast\\_1\\_.html](http://frazza.ua/analytics/26.09.15/230879/manhettenskiy-proekt-ukrainskiy-sled-chast_1_.html).
10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
11. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерное\\_оружие](http://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерное_оружие).
12. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
13. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
14. [http://www.2000.ua/v-nomere/aspekty/persona\\_aspekty/smog-vzorvat-atomnuju-bombu.htm](http://www.2000.ua/v-nomere/aspekty/persona_aspekty/smog-vzorvat-atomnuju-bombu.htm).
15. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.
16. [www.dominating.ru/atombomb/teory/history.htm](http://www.dominating.ru/atombomb/teory/history.htm).
17. Юнг Р. Ярче тысячи звезд. – М.: Госатомиздат, 1961. – 224 с.
18. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Атомные\\_бомбардировки\\_Хиросимы\\_и\\_Нагасаки](http://ru.wikipedia.org/wiki/Атомные_бомбардировки_Хиросимы_и_Нагасаки).
19. Харитон Ю.Б., Смирнов Ю.Н. Мифы и реальность советского атомного проекта. – Арзамас-16: Изд-во ВНИИЭФ, 1994. – 72 с.
20. Создание первой советской ядерной бомбы / Под ред. В.Н. Михайлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 448 с.
21. Атомный проект СССР. Документы и материалы: В 3 Томах / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – Т. 1, 1938-1945: в 2 Частях. Ч. 1 / М-во РФ по атомной энергии; Отв. сост. Л.И. Кудинова. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 432 с.; Ч. 2: М.: Изд-во МФТИ, 2002. – 800 с.; Т. 2 в 7 Книгах. Атомная бомба. 1945-1954: Кн. 1, 1999. – 719 с.; Кн. 2, 2000. – 640 с.; Кн. 3, 2003. – 896 с.; Кн. 4, 2003. – 816 с.; Кн. 5, 2005. – 976 с.; Кн. 6, 2006. – 896 с.; Кн. 7, 2007. – 696 с. / Федеральное агентство РФ по атомной энергии; Отв. сост. Г.А. Гончаров. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, М.: Физматлит.

## REFERENCES

1. George Bogdan Kistyakovskiy and the project «Manhattan». *Newspaper «Zerkalo nedeli»*, 2015, no.28-29. (Rus).
2. Available at: <http://gazeta.zn.ua/personalities/dzhordzh-bogdan-kistyakovskiy-i-proekt-manhetten> (accessed 10 April 2014). (Rus).
3. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/George\\_Kistiakowsky](https://en.wikipedia.org/wiki/George_Kistiakowsky) (accessed 10 May 2012).
4. Available at: <http://www.pseudology.org/science/KistyakovskyGB.htm> (accessed 23 March 2013). (Rus).
5. Baranov M.I. *Antologiya vydaishchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiya 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).
6. Available at: [http://ruatom.ru/milit/fm\\_at\\_tinian.jpg](http://ruatom.ru/milit/fm_at_tinian.jpg) (accessed 03 October 2013). (Rus).
7. Available at: [www.infozoom.ru/pervaya-atomnaya-bomba.html](http://www.infozoom.ru/pervaya-atomnaya-bomba.html) (accessed 11 May 2013). (Rus).
8. Ruze M. *Robert Oppengeymer i atomnaya bomba* [Robert Oppenheimer and the atomic bomb]. Moscow, Atomizdat Publ., 1965, 150 p. (Rus).
9. Available at: <http://frazua.com/analitics/26.09.15/230879/manhettenskiy-proekt-ukrainskiy-sled-chast-1.html> (accessed 12 June 2013). (Rus).
10. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
11. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_weapon](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapon) (accessed 13 October 2010).
12. Khranov Yu.A. *Istoriya fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
13. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
14. Available at: [http://www.2000.ua/v-nomere/aspekty/persona\\_aspekty/smog-vzorvat-atomnuju-bombu.htm](http://www.2000.ua/v-nomere/aspekty/persona_aspekty/smog-vzorvat-atomnuju-bombu.htm) (accessed 31 May 2013). (Rus).
15. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektorov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).
16. Available at: [www.dominating.ru/atombomb/teory/history.htm](http://www.dominating.ru/atombomb/teory/history.htm) (accessed 23 October 2014). (Rus).
17. Jung R. *Yarche tysyachi zvezd* [Brighter thousands stars]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1961. 224 p. (Rus).
18. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_bombings\\_of\\_Hiroshima\\_and\\_Nagasaki](https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_bombings_of_Hiroshima_and_Nagasaki) (accessed 14 June 2009).
19. Khariton Ju.B., Smirnov Ju.N. *Mify i real'nost' sovetskogo atomnogo proekta* [Myths and reality of the soviet atomic project]. Arzamas-16, USRIEP Publ., 1994. 72 p. (Rus).
20. Mikhailov V.N. *Sozdanye pervoy sovetskoy yadernoy bomby* [Creation of the first soviet nuclear bomb]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 448 p. (Rus).
21. *The USSR Atomic Project. Documents and materials: In 3 Vol.* Ed. L.D. Ryabev. Vol. 1, 1938-1945: in 2 parts. Part 1. Min. of the RF for Atomic Energy; Ans. comp. L.I. Kudinova. Moscow, Science Publ., Fizmatlit Publ., 1998, 432 p.; Part 2: Moscow, Publishing House of MPhTI, 2002, 800 p.; Vol. 2 in 7 Books. Atomic bomb. 1945-1954: Book 1, 1999, 719 p.; Book 2, 2000, 640 p.; Book 3, 2003, 896 p.; Book 4, 2003, 816 p.; Book 5, 2005, 976 p.; Book 6, 2006, 896 p.; Book 7, 2007, 696 p. Russian Federal Atomic Energy Agency; Ans. comp. G.A. Goncharov. Sarov, RFNC-USRIEP, Moscow, Fizmatlit Publ. (Rus).

Поступила (received) 29.06.2016

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,  
НИПКИ «Молния»  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841,  
e-mail: baranovmi@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 40: The scientific opening of the method of explosive implosion for the obtaining above critical mass of nuclear charge and Ukrainian «track» in the «Manhattan» American atomic project.**

**Purpose.** Preparation of short scientifically-historical essay about the prominent American scientist-chemist and physicist George Bogdan Kistiakowsky, having the Ukrainian «roots» and bringing in a considerable scientific and technical contribution to development and creation of the first atomic bombs in the USA. **Methodology.** Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of the opened scientific and technical information of world level in area of atomic and nuclear physics, physics of hyperpressure, applied electrophysics, modern experimental physics, atomic science and technology. **Results.** The state-of-the-art review of the state of basic scientific and technical problems, arising up before scientists and engineers at development and creation within the framework of the «Manhattan» American atomic project of the first standards of atomic bombs of the USA is resulted. Two basic methods of receipt in the a-bomb of above critical mass of the divided nuclear material of military load are described: method of «cannon-shot» and method of «explosive implosion». Basic information is resulted about the declassified scheme and construction decisions, applied scientists and specialists in the first atomic bombs of the USA. Technical information is indicated about basic ordinary hard chemical explosive matters (EM), atomic bombs of the USA of implosend type utilized in the first. **Originality.** Systematization of the scientific and technical materials devoted the basic results of pioneer nuclear researches in the USA and USSR in the period of 1940-th on a capture above all things for soldiery aims by intranuclear energy and to the offensive on a planet Earth of nuclear era known from the opened sources is executed. The important role of the scientific ukrainian origin of G.B. Kistiakowsky in development and creation in the National nuclear center of the USA – Los-Alamos of laboratory of the first implosend atomic bombs of the USA. The large deposit of the American scientist is marked in area of physical chemistry, of theory and practice chemical EM G.B. Kistiakowsky in a fight for stopping in the world of race of armaments and nuclear disarmament. **Practical value.** Popularization and deepening for students, engineer and technical specialists and research workers of scientific and technical knowledges in area of nuclear physics, modern experimental physics, atomic science and technology, extending their scientific range of interests and further development of scientific and technical progress in human society. References 21, figures 10.

**Key words:** history of creation in the USA and USSR of the first standards of nuclear weapon, atomic bomb, critical mass of nuclear explosive, nuclear explosion, methods of «cannon-shot» and «explosive implosion» for an atomic bomb, chemical explosive matter, scientific achievements, nuclear disarmament.

В.Ф. Болюх, И.С. Щукин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОМ ИМПУЛЬСНО-ИНДУКЦИОННОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

*Розроблена математична модель лінійного імпульсно-індукційного електромеханічного перетворювача (ЛІЕП) циклічної дії, система рівнянь якої враховує комплекс взаємопов'язаних електромагнітних, електромеханічних та теплових процесів. Рішення цих рівнянь представлені в рекурентному вигляді. Досліджені процеси ЛІЕП, що протікають при прямому ході робочого циклу. Показано, що в кінці робочого циклу значна частина енергії зберігається в ємнісному накопичувачі енергії, а також перетворюється в теплову енергію якоря та індуктора. При значному числі робочих циклів виникає недопустимий нагрів активних елементів ЛІЕП. Для рішення цієї проблеми використовується інтенсивне охолодження обмотки індуктора, рухомого якоря або їх обох, а також збільшення періоду слідування імпульсів. Встановлено, що при роботі ЛІЕП в циклічному режимі експериментальні залежності температури нагріву обмотки індуктора з точністю до 6 % співпадають з розрахунковими результатами. Розроблена конструктивна схема ЛІЕП циклічної дії з інтенсивним водяним охолодженням обмотки індуктора. Бібл. 13, табл. 1, рис. 12.*

*Ключові слова:* лінійний імпульсно-індукційний електромеханічний перетворювач, циклічна дія, тепловий стан, математична модель, електромеханічні і енергетичні процеси, інтенсивне охолодження, експериментальні дослідження, конструктивна схема.

*Разработана математическая модель линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя (ЛИИЭП) циклического действия, система уравнений которой учитывает комплекс взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов. Решения этих уравнений представлены в рекуррентном виде. Исследованы процессы ЛИИЭП, протекающие при прямом ходе рабочего цикла. Показано, что к концу рабочего цикла значительная часть энергии сохраняется в емкостном накопителе энергии, а также преобразуется в тепловую энергию якоря и индуктора. При значительном числе рабочих циклов происходит недопустимый нагрев активных элементов ЛИИЭП. Для решения этой проблемы используется интенсивное охлаждение обмотки индуктора, подвижного якоря или их обоих, а также увеличение периода следования импульсов. Установлено, что при работе ЛИИЭП в циклическом режиме экспериментальные зависимости температуры нагрева обмотки индуктора с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами. Разработана конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора. Библ. 13, табл. 1, рис. 12.*

*Ключевые слова:* линейный импульсно-индукционный электромеханический преобразователь, циклическое действие, тепловое состояние, математическая модель, электромеханические и энергетические процессы, интенсивное охлаждение, экспериментальные исследования, конструктивная схема.

**Введение.** Линейные импульсно-индукционные электромеханические преобразователи (ЛИИЭП) находят применение во многих отраслях науки, техники и технологии. Они используются для очистки технологического оборудования и бункеров от остатков сыпучих грузов, испытаний ответственных изделий и устройств на ударные воздействия, обработки и формовки металлических конструкций. Такие преобразователи применяются в горнодобывающей промышленности и геологоразведке, в машиностроении при магнитно-импульсной сварке, штамповке, перфорации, в различных измерительных приборах, электромеханических ускорителях и др. [1-4].

Во многих технических системах ЛИИЭП должен обеспечивать непрерывную последовательность силовых импульсов с заданным периодом следования. В таком преобразователе в каждом рабочем цикле реализуется кратковременный период нагрузки (активный режим работы), при которой в активных элементах (индуктор и якорь) возбуждаются интенсивные токовые импульсы, и совершается прямой ход якоря с исполнительным элементом (ИЭ), и продолжительная пауза (пассивный режим работы). Во время пассивного режима осуществляется обратный ход якоря с ИЭ под действием, например возвратной пружины, и следующий за этим режим покоя якоря, при котором происходит заряд емкостного накопителя

энергии (ЕНЭ). Хотя такой режим напоминает повторно-кратковременный с малой продолжительностью включения для традиционных электрических машин, он обладает существенными особенностями [5, 6]. Это связано с тем, что импульсная нагрузка столь непродолжительна, что нарастание температуры в активных элементах ЛИИЭП происходит практически в адиабатических условиях.

При циклическом режиме работы подлежат исследованию:

- допустимые превышения температур активных элементов при заданном количестве рабочих циклов;
- период следования силовых импульсов, в пассивном режиме которого активные элементы ЛИИЭП охлаждаются до заданного теплового состояния;
- допустимое число циклов при заданном периоде следования импульсов и интенсивности охлаждения.

В ЛИИЭП при прямом ходе неподвижный индуктор, возбуждаемый от ЕНЭ, посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в электропроводящем якоре, который под действием электродинамических сил обеспечивает стремительное перемещение ИЭ при прямом ходе, оказывающего, например, ударно-силовое воздействие на объект. При обратном ходе якорь с ИЭ возвращается в первоначальное положение в зону максимальной магнит-



ной связи с индуктором, после чего следует пауза, во время которой осуществляется заряд ЕНЭ для последующего рабочего цикла. Таким образом, в рассматриваемых преобразователях с возвратно-поступательным движением якоря с ИЭ протекают сложные пространственно-временные, зависящие друг от друга импульсные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы [7].

Поскольку импульсные токовые нагрузки в ЛИИЭП многократно превышают аналогичные показатели электромеханических устройств продолжительного действия, то в циклическом режиме работы особую роль приобретают тепловые процессы, которые в значительной степени определяют условия и время работы преобразователя. В свою очередь, тепловое состояние ЛИИЭП существенно зависит от [6]:

- параметров и конструктивного выполнения индуктора, якоря и ЕНЭ;
- формы тока обмотки индуктора, определяемой электронной схемой возбуждения;
- частоты (периода) следования импульсов;
- характера движения якоря;
- интенсивности охлаждения активных элементов.

Однако до настоящего времени указанные тепловые процессы практически не исследованы, что можно объяснить сложным и взаимосвязанным характером процессов различной физической природы, которые, к тому же, зависят от конструктивного выполнения, назначения и условий работы ЛИИЭП. Особую актуальность приобретает вопрос о влиянии интенсивности охлаждения активных элементов преобразователя и длительности периода следования силовых импульсов на их тепловое состояние.

**Целью статьи** является исследования влияния интенсивности охлаждения активных элементов и периода следования силовых импульсов на тепловое состояние ЛИИЭП в циклическом режиме работы.

**Конструкция ЛИИЭП.** В качестве объекта исследования выбран ЛИИЭП циклического действия, ИЭ которого содержит подпружиненный боек, совершающий силовые импульсы по исследуемой плите, установленной снизу (рис. 1) [7].

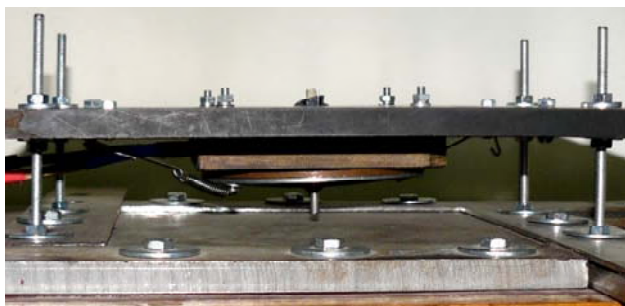


Рис. 1. Общий вид ЛИИЭП циклического действия

ЛИИЭП работает в условиях окружающей среды с естественным охлаждением. Электронная схема возбуждения индуктора обеспечивает серию однополярных токовых импульсов, что позволяет сохранять часть энергии в ЕНЭ к концу рабочего цикла [5].

ЛИИЭП коаксиальной конфигурации содержит неподвижный индуктор с двухслойной обмоткой

дисковой формы, которая намотана прямоугольной медной шиной, замонтирована эпоксидной смолой и уложена либо в толстостенный изоляционный (стеклотекстолитовый), либо в тонкостенный (1 мм) стальной каркас [8] (рис. 2). Особенность стального каркаса состоит в том, что через него можно обеспечить интенсивное воздушное или водяное охлаждением обмотки индуктора.

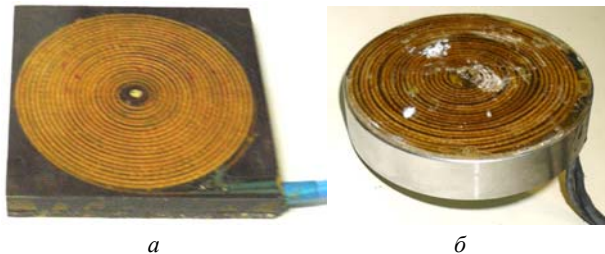


Рис. 2. Индукторы ЛИИЭП со стеклотекстолитовым (а) и стальным (б) каркасами

Коаксиально с индуктором установлен медный дисковый якорь, который соединен с силовым диском, обеспечивающим перемещение бойка в сторону объекта воздействия. Таким образом, ИЭ состоит из силового диска и бойка, которые выполнены из нержавеющей немагнитной стали.

К силовому диску присоединены возвратные пружины, обеспечивающие плотное прижатие якоря к индуктору до и после силового импульса. Основные параметры ЛИИЭП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ЛИИЭП

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр обмотки индуктора, мм	$D_{ex1}$	100
Внутренний диаметр обмотки индуктора, мм	$D_{in1}$	10
Высота обмотки индуктора, мм	$h_1$	10
Внешний диаметр якоря, мм	$D_{ex2}$	100
Внутренний диаметр якоря, мм	$D_{in2}$	10
Высота якоря, мм	$h_2$	2,5
Толщина изоляции между обмоткой индуктора и якорем, мм	$\Delta Z_0$	0,5
Число витков обмотки индуктора, шт	$w_1$	42
Сечение витка обмотки индуктора, мм <sup>2</sup>	$a \times b$	1,8×4,8
Коэффициент упругости возвратной пружины, кН/м	$K_p$	25,0
Масса ИЭ, кг	$m_a$	0,35
Емкость ЕНЭ, мкФ	$C$	3000
Зарядное напряжение ЕНЭ, В	$U_0$	310

**Математическая модель ЛИИЭП.** Математическая модель ЛИИЭП циклического действия должна в каждом рабочем цикле оперативно рассчитывать комплекс взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов, учитывать изменяемую магнитную связь между якорем и обмоткой индуктора при прямом ходе, изменение сопротивления обмотки индуктора и якоря из-за нагрева импульсными токами, комплекс сил, действующих на якорь, условия охлаждения и теплового взаимодейст-

вия активных элементов. При этом необходимо учитывать, что по сечению активных элементов наблюдаются незначительные температурные градиенты [6]. Полевые методы расчета целесообразно применять для исследования процессов ЛИИЭП при однократном режиме работы [9, 10].

В циклическом режиме работы целесообразно использовать цепную модель ЛИИЭП с сосредоточенными параметрами [11], а решения уравнений представить в рекуррентном виде, считая все параметры на интервале  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  неизменными [12].

**Электромагнитные процессы**, возникающие в ЛИИЭП при подключении к ЕНЭ, можно описать системой уравнений:

$$[R_1(T_1) + R_0] \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} +$$

$$+ v(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz} = 0, \quad \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt = U_0, \quad (1)$$

$$R_2(T_2) \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + i_1 v(t) \frac{dM_{12}}{dz} = 0, \quad (2)$$

где  $n = 1, 2$  – индексы обмотки индуктора и якоря соответственно;  $R_n, L_n, T_n, i_n$  – активное сопротивление, индуктивность, температура и ток  $n$ -го элемента соответственно;  $C$  – емкость ЕНЭ, заряженного до напряжения  $U_0$ ;  $M_{12}(z) = M_{21}(z)$  – взаимная индуктивность между индуктором и якорем, перемещаемым вдоль оси  $z$  со скоростью  $v$ .

Обозначим

$$R_1 = R_1(T_1) + R_0; R_2 = R_2(T_2); M = M_{12}(z) = M_{21}(z).$$

Система уравнений (1) – (2) после ряда преобразований приводится к уравнению:

$$a_3 \frac{d^3 i_1}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + a_1 \frac{di_1}{dt} + a_0 i_1 = 0, \quad (3)$$

где

$$a_3 = v; a_2 = \chi - 2Mv \frac{dM}{dz}; a_1 = R_1 R_2 + \frac{L_2}{C} - v^2 \left( \frac{dM}{dz} \right)^2;$$

$$a_0 = \frac{R_2}{C}; v = L_1 L_2 - M^2; \chi = R_1 L_2 + L_1 R_2.$$

Если дискриминант его характеристического уравнения меньше нуля, то все корни действительны и решение для токов после ряда преобразований представляется в рекуррентном виде [5]

$$i_n(t_{k+1}) = \delta^{-1} \left[ 1 - \frac{v^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right]^{-1} \left\{ \left[ i_n(t_k) - \frac{i_m(t_k) v^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] \times \right.$$

где  $m = 2, 1$  при  $n = 1, 2$ ;

$$\delta = x_1 x_2 (x_2 - x_1) + x_1 x_3 (x_1 - x_3) + x_2 x_3 (x_3 - x_2);$$

$$\alpha_1 = (x_3 - x_2) \exp(x_1 \Delta t); \alpha_2 = (x_1 - x_3) \exp(x_2 \Delta t);$$

$$\alpha_3 = (x_2 - x_1) \exp(x_3 \Delta t);$$

$$x_p = \left\{ 2(a_2^2 - 3a_1 a_3) \right\}^{0,5} \cos[2\pi(p-1)/3 + \zeta] - a_2 \Big/ 3a_3;$$

$$p = 1, 2, 3;$$

$$\zeta = \arccos \left[ (a_2^2 - 3a_1 a_3)^{-1,5} (4,5a_1 a_2 a_3 - a_2^3 - 13,5a_0 a_3^2) \right];$$

$$\Omega_n = B_n + \frac{B_m v}{R_n} \frac{dM}{dz}; A_n = E_n + \frac{E_m v}{R_n} \frac{dM}{dz};$$

$$\gamma_1 = L_2; \gamma_2 = -M;$$

$$B_n = v^{-1} \left[ i_n(t_k) \left( Mv \frac{dM}{dz} - R_n L_m \right) + i_m(t_k) \times \right.;$$

$$\left. \times \left( R_m M - L_m v \frac{dM}{dz} \right) - \gamma_k u_c(t_k) \right];$$

$$E_1 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[ R_1 (R_2 M^2 + R_1 L_2^2 - C^{-1} L_2 v) - v M \times \right. \right.$$

$$\left. \times \frac{dM}{dz} (\chi + 2R_1 L_2) + v^2 (L_1 L_2 + M^2) \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right\} +$$

$$+ i_2(t_k) \left[ v (L_2 \chi + 2R_2 M^2) \frac{dM}{dz} - M R_2 \chi - v^2 M L_2 \times \right.$$

$$\left. \times \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left( R_2 M^2 + L_2^2 R_1 - 2L_2 v M \frac{dM}{dz} \right);$$

$$E_2 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[ M (C^{-1} v - R_1 \chi) + v (2R_1 M^2 + L_1 \chi) \times \right. \right.$$

$$\left. \times \frac{dM}{dz} - 2v^2 L_1 M \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[ R_2 (R_1 M^2 + R_2 L_1^2) - \right.$$

$$\left. \left[ -Mv (2L_1 R_2 + \chi) \frac{dM}{dz} + (L_1 L_2 + M^2) v^2 \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] + \right.$$

$$\left. + u_c(t_k) \left[ v (L_1 L_2 + M^2) \frac{dM}{dz} - M \chi \right] \right\};$$

$u_c$  – напряжение ЕНЭ.

Если дискриминант характеристического уравнения для уравнения (3) больше нуля, то один из его корней действителен  $x_1 = d$ , а два других – комплексно сопряженные  $x_{2,3} = f \pm jg$ , и решение для токов приобретает вид:

$$i_n(t_{k+1}) = \left( \xi_n - \frac{\xi_m v}{R_n} \frac{dM}{dz} \right) \Big/ \left[ 1 - \frac{v^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где

$$\xi_n = g^{-1} \left[ g^2 + (f-d)^2 \right]^{-1} \left\{ g \cdot \exp(d \Delta t) \left[ (g^2 + f^2) \Theta_n - 2f \Omega_n + A_n \right] + \right.$$

$$\left. + \exp(f \Delta t) \left\{ \sin(g \Delta t) \left[ d(f^2 - g^2 - fd) \Theta_n + (g^2 + d^2 - f^2) \Omega_n + (f-d) A_n \right] + \right. \right.$$

**Механические процессы** ЛИИЭП в общем случае можно описать уравнением:

$$i_1(t) i_2(t) \frac{dM}{dz}(z) = (m_a + m_2) \frac{dv}{dt} + K_P \Delta z(t) + K_T v(t) +$$

$$+ 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v^2(t), \quad (6)$$

где  $m_2$ ,  $m_a$  – масса якоря и ИЭ соответственно;  $K_P$  – коэффициент упругости возвратной пружины;  $\Delta z(t)$  – величина перемещения якоря с ИЭ;  $K_T$  – коэффициент динамического трения;  $\gamma_a$  – плотность среды перемещения;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  – наружный диаметр ИЭ.

На основании уравнения (6) величину перемещения якоря с ИЭ можно представить в виде рекуррентного соотношения [5]:

$$\Delta z(t_{k+1}) = \Delta z(t_k) + v(t_k)\Delta t + \mathcal{G} \cdot \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (7)$$

где  $v(t_{k+1}) = v(t_k) + \mathcal{G} \cdot \Delta t / (m_a + m_2)$  – скорость якоря с ИЭ;

$$\mathcal{G} = i_1(t_k)i_2(t_k) \frac{dM}{dz}(z) - K_P \Delta z(t_k) - K_T v(t_k) - 0,125\pi\gamma_a\beta_a D_{2m}^2 v^2(t_k).$$

**Тепловые процессы** во многом определяются периодом работы ЛИИЭП в течение рабочего цикла. Так при отсутствии перемещения якоря, что происходит либо до начала прямого хода, либо после обратного хода, между активными элементами существует тепловой контакт через изоляционную прокладку. Температуры  $n$ -ых активных элементов ЛИИЭП при этом можно описать рекуррентным соотношением [6]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k)\xi + (1 - \xi) \left[ \pi^{-1} i_n(t_k) R_n(T_n) (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} + 0,25\pi T_0 D_{en} H_n \alpha_{Tn} + T_m(t_k) \lambda_a(T) d_a^{-1} \right] \left\{ 0,25\pi \alpha_{Tn} D_{en} H_n + \lambda_a(T) d_a^{-1} \right\}^{-1}, \quad (8)$$

где  $\xi = \exp \left\{ - \frac{\Delta t}{c_n(T_n) \gamma_n} \left( 0,25 D_{en} \alpha_{Tn} + \frac{\lambda_a(T)}{d_a H_n} \right) \right\}$ ;  $\lambda_a(T)$  –

коэффициент теплопроводности изоляционной прокладки;  $d_a$  – толщина прокладки;  $D_{en}$ ,  $D_{in}$  – внешний и внутренний диаметры активных элементов соответственно;  $\alpha_{Tn}$  – коэффициент теплоотдачи  $n$ -ого активного элемента;  $c_n$  – теплоемкость  $n$ -ого активного элемента

Температуры  $n$ -ых активных элементов при перемещении якоря и отсутствии теплового контакта между якорем и индуктором можно описать рекуррентным соотношением:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k)\chi + (1 - \chi) \left[ T_0 + 4\pi^{-2} i_n(t_k) R_n(T_n) \alpha_{Tn}^{-1} \times D_{en}^{-1} H_n^{-1} (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} \right], \quad (9)$$

где  $\chi = \exp \left\{ - 0,25 \Delta t D_{en} \alpha_{Tn} c_n^{-1} (T_n) \gamma_n^{-1} \right\}$ .

Начальные условия системы уравнений (1) – (9):

$T_n(0) = T_0$  – температура  $n$ -ого активного элемента;

$i_n(0) = 0$  – ток  $n$ -ого активного элемента;

$\Delta z(0) = \Delta z_0$  – исходное осевое расстояние между якорем и обмоткой индуктора;

$u_c(0) = U_0$  – напряжение ЕНЭ;

$v(0) = 0$  – скорость якоря.

**Функционирование ЛИИЭП при естественном охлаждении.** Электромеханические процессы ЛИИЭП при прямом ходе рабочего цикла с естественным охлаждением ( $\alpha_{Tn} = 20$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>) представлены на рис. 3. Плотность тока в обмотке индуктора  $j_1$  имеет форму полярного импульса с более длинным фронтом затухания по сравнению с фронтом нарастания. Максимальная величина индуцированной плот-

ности тока якоря  $j_2$  противоположной полярности более чем в 2 раза превышает величину плотности тока обмотки индуктора. Поскольку индуцированный ток якоря затухает быстрее, то через 0,8 мс он меняет полярность, возрастая до момента прекращения тока в обмотке индуктора. После этого ток якоря плавно затухает. Вследствие такой закономерности токовых импульсов электродинамическая сила вначале имеет характер отталкивания, а после 0,8 мс – характер незначительного притяжения между якорем и индуктором. После указанного времени результирующая сила  $f_z$ , действующая на якорь, становится тормозной. Последующее изменение тормозной силы обусловлено упругой деформацией возвратной пружины. Под действием указанных сил якорь с ИЭ совершает перемещение  $\Delta z$  со скоростью  $v$ , которая после 0,8 мс уменьшается под воздействием результирующей тормозной силы  $f_z$ .

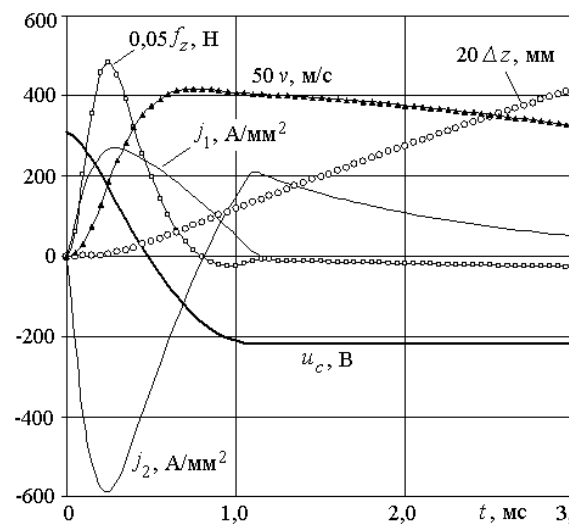


Рис. 3. Электромеханические характеристики ЛИИЭП

Рассмотрим энергетические процессы при прямом ходе рабочего цикла ЛИИЭП. При этом имеют место следующие энергетические составляющие:

$W_{p1} = \int i_1^2(t) R_1(T_1) dt$  – потери в индукторе;

$W_{p2} = \int i_2^2(t) R_2(T_2) dt$  – потери в якорю;

$W_{mag} = 0,5 \sum_{n=1}^2 L_n i_n^2(t) + M(z) \cdot i_1(t) \cdot i_2(t)$  – магнитная энергия;

$W_{kin} = 0,5(m_2 + m_a)v^2(t)$  – кинетическая энергия;

$W_c = 0,5 \cdot C \cdot u_c^2(t)$  – энергия ЕНЭ;

$W_{pr} = 0,5 \cdot K_P \Delta z^2(t)$  – энергия сжатой пружины.

Эффективность ЛИИЭП оценивается соотношением [5]

$$\eta = 100 \frac{(m_a + m_e)v^2 + K_P \Delta z^2}{C(U_0^2 - u_c^2)} \% \quad (10)$$

в конце прямого хода рабочего цикла.

На рис. 4 представлены относительные значения (помечены \*) энергетических составляющих при прямом ходе рабочего цикла ЛИИЭП.

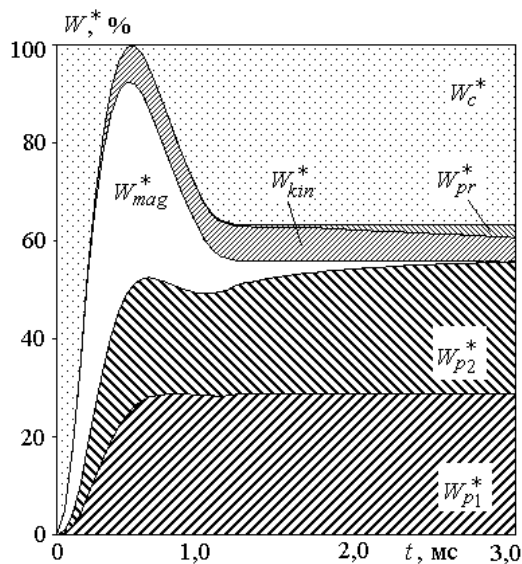


Рис. 4. Относительные значения энергетических составляющих при прямом ходе рабочего цикла ЛИИЭП

Как следует из представленных результатов, к концу рабочего цикла значительная часть энергии преобразуется в тепловую энергию якоря ( $W_{p2}^* = 26,8\%$ ) и индуктора ( $W_{p1}^* = 28,7\%$ ). Именно этим и объясняется низкая эффективность ЛИИЭП, составляющая в конце прямого хода  $\eta = 19,5\%$ . Отметим, что значительная часть энергии сохраняется в ЕНЭ ( $W_c^* = 36,7\%$ ).

Тепловая энергия приводит к росту превышений температур индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$ . При этом необходимо учитывать, что в активном режиме при прямом ходе якоря с ИЭ отсутствует тепловая связь между якорем и индуктором. А в пассивном режиме после того, как якорь под действием возвратной пружины занимает исходное положение, происходит тепловое взаимодействие между активными элементами ЛИИЭП. Такое тепловое взаимодействие особенно проявляет свое влияние при работе ЛИИЭП в циклическом режиме.

На рис. 5 представлены превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе ЛИИЭП с естественным охлаждением в циклическом режиме работы. Рассмотрены первые четыре рабочих цикла с периодом следования импульсов  $T_{imp} = 1$  с. На данном рисунке показан короткий (5 мс) активный режим работы ЛИИЭП, при котором осуществляется прямой ход якоря, и длительный (995 мс) пассивный режим работы, при котором якорь в основном находится в тепловом контакте с обмоткой индуктора.

В активном режиме работы ЛИИЭП происходит рост превышений температур индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$ . При этом превышение температуры индуктора  $\theta_1$  меньше, чем у якоря  $\theta_2$  на первоначальных рабочих циклах. В пассивном режиме из-за теплового контакта происходит рост превышения температуры обмотки индуктора и снижение превышения температуры якоря. Причем с увеличением числа рабочих циклов указанная закономерность проявляется сильнее из-за возрастающей разности между температурами якоря и обмотки индуктора.

При значительном числе рабочих циклов наблюдаются недопустимо высокие превышения темпера-

тур, при которых происходит размягчение эпоксидной смолы обмотки индуктора: после 400 циклов превышение температуры обмотки индуктора составляет  $\theta_1 = 110^\circ\text{C}$ , а после 800 циклов  $\theta_1 = 170^\circ\text{C}$ . При этом превышения температур обмотки индуктора и якоря практически выравниваются.

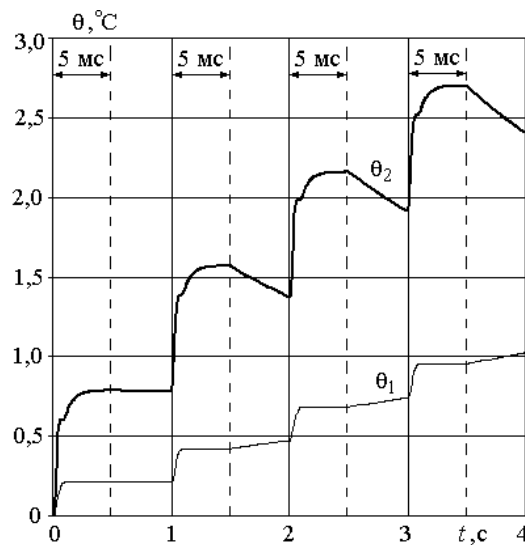


Рис. 5. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе в циклическом режиме ( $T_{imp} = 1$  с)

**Пути уменьшения нагрева ЛИИЭП.** Одним из путей решения проблемы недопустимо высокого нагрева, что особенно важно для компаундированной эпоксидной смолой обмотки индуктора, является интенсивное охлаждение ее или якоря.

Рассмотрим влияние на тепловое состояние ЛИИЭП интенсивного водяного ( $\alpha_{Tn} = 2 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) охлаждения одного или обоих активных элементов. На рис. 6 показана динамика превышений температуры обмотки индуктора и якоря при интенсивном охлаждении индуктора (режим охлаждения I), якоря (режим охлаждения II) и их совместном охлаждении (режим охлаждения III) за первые 4 цикла с периодом следования импульсов  $T_{imp} = 1$  с.

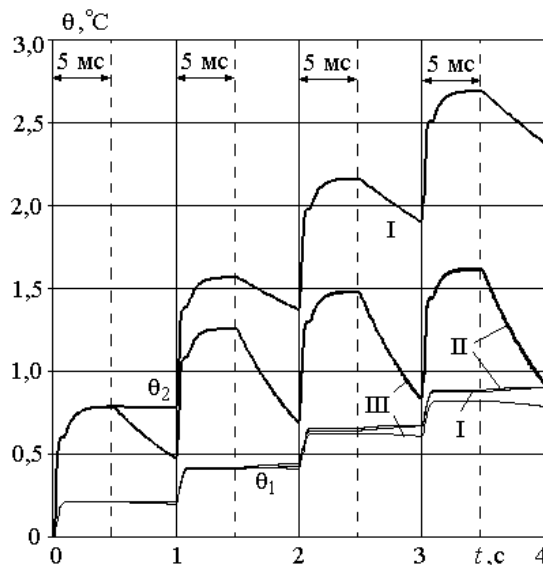


Рис. 6. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе в циклическом режиме ( $T_{imp} = 1$  с) в режимах охлаждения I, II и III

При использовании режима охлаждения I превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  уменьшается за первые 4 цикла на 12 %, в то время как превышение температуры якоря  $\theta_2$  практически не изменяется. В режиме охлаждения II превышение температуры якоря снижается на 61%, в то время как обмотки индуктора – только на 12 %. В режиме охлаждения III наименьшее превышение возникает как в обмотке индуктора (23 %), так и в якоре (62 %). При этом в пассивном режиме превышение температуры якоря  $\theta_2$  существенно уменьшается, а  $\theta_1$  обмотки индуктора практически не изменяется. Нагрев активных элементов заметно меняется при длительной работе ЛИИЭП. На рис. 7 показана динамика превышений температуры активных элементов ЛИИЭП при работе в течение 100 с ( $T_{imp}=1$  с).

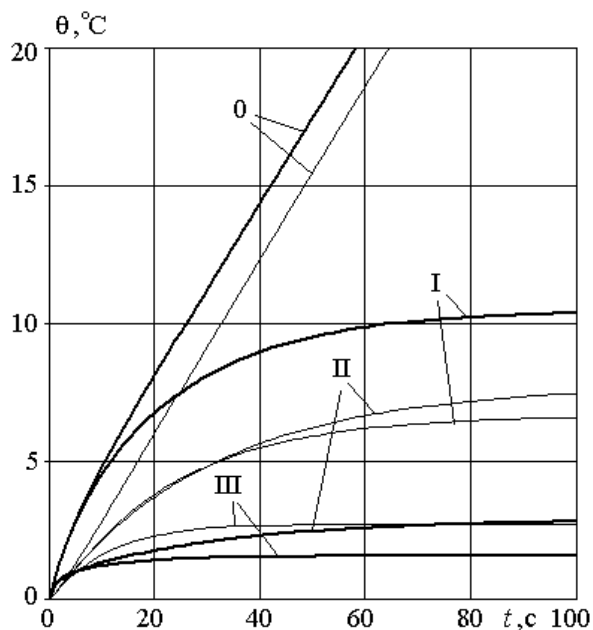


Рис. 7. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  (тонкие линии) и якоря  $\theta_2$  (жирные линии) при работе в циклическом режиме ( $T_{imp}=1$  с) в режимах охлаждения I, II и III

Как следует из представленных зависимостей, интенсивное охлаждение хотя бы одного из активных элементов практически предотвращает недопустимый нагрев обоих элементов. Превышения температур активных элементов достигают некоторых значений, после которых практически не меняются. Таким образом, интенсивное охлаждение одного из активных элементов ЛИИЭП уменьшает температуру нагрева и другого элемента. Так за 100 рабочих циклов при использовании режима охлаждения I превышение температуры якоря составляет  $\theta_2 = 10,4$   $^\circ\text{C}$ , а в режиме охлаждения II – превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1 = 7,5$   $^\circ\text{C}$ .

Другим путем уменьшения нагрева активных элементов ЛИИЭП является увеличение периода следования импульсов, при котором увеличивается пассивный период, а значит и время взаимодействия индуктора и якоря.

На рис. 8 показана динамика превышений температур активных элементов ЛИИЭП для четырех начальных рабочих циклов при периоде следования

$T_{imp}=5$  с. С увеличением периода следования импульсов происходит заметное снижение превышений температур активных элементов.

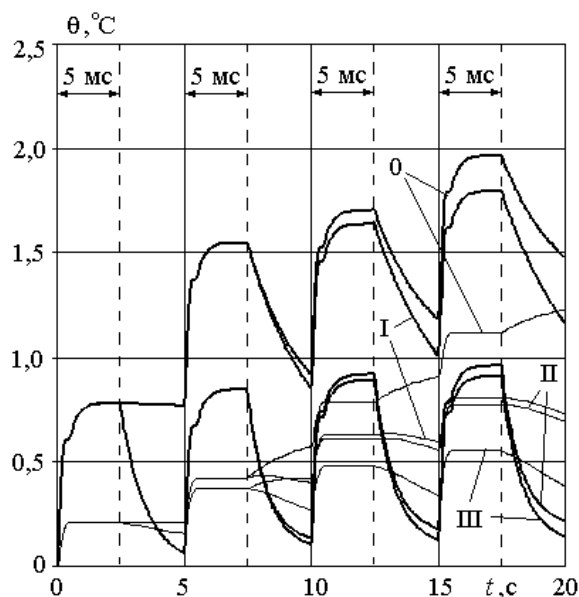


Рис. 8. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  (тонкие линии) и якоря  $\theta_2$  (жирные линии) при работе в циклическом режиме ( $T_{imp}=5$  с) с естественным охлаждением (0) и в режимах охлаждения I, II и III

При периоде следования импульсов  $T_{imp}=5$  с наблюдается существенное снижение превышений температур якоря  $\theta_2$  в пассивном режиме работы ЛИИЭП, в том числе при естественном охлаждении (0). Превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  в пассивном режиме работы ЛИИЭП происходит только при естественном охлаждении (0). В режимах охлаждения I, II и III превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  также уменьшается.

На рис. 9 показана динамика относительного превышения температур индуктора  $\theta_1^*$  и якоря  $\theta_2^*$  при естественном и интенсивном охлаждении индуктора, якоря и их обоих в зависимости от величины  $T_{imp}$  за 100 импульсов. Значения превышений температур нормированы соответствующими значениями при  $T_{imp}=1$  с. Как следует из представленных значений, увеличение периода следования импульсов  $T_{imp}$  приводит к уменьшению превышений температур как индуктора  $\theta_1$ , так и якоря  $\theta_2$  при любом способе охлаждения. Однако при работе с естественным охлаждением превышения температур обмотки индуктора и якоря при увеличении периода следования импульсов уменьшаются практически линейно и незначительно. Так при  $T_{imp}=5$  с по сравнению с  $T_{imp}=1$  с превышение температуры индуктора  $\theta_1$  уменьшается на 23 %, а  $\theta_2$  якоря – на 28 %.

При интенсивном охлаждении, по крайней мере, одного из активных элементов ЛИИЭП, при аналогичном увеличении периода следования импульсов превышения температур активных элементов уменьшается на 80-90 %. Отметим, что наиболее сильное снижение (на 67-77 %) превышений температур происходит при увеличении  $T_{imp}$  от 1 с до 2 с. При дальнейшем увеличении периода следования импульсов

уменьшение превышений температур происходит намного медленнее.

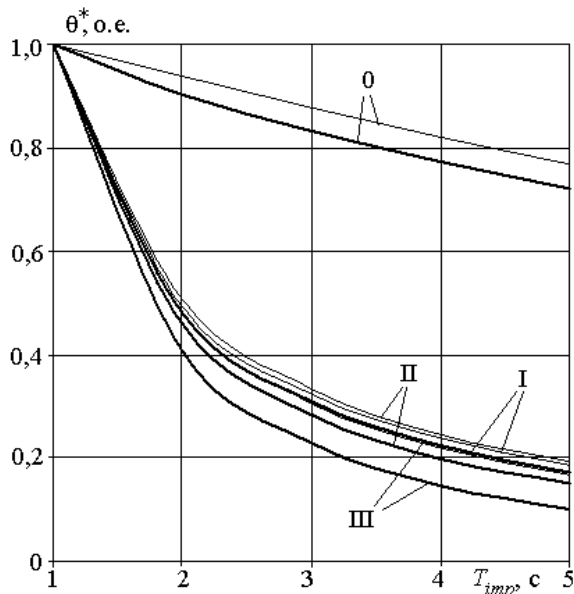


Рис. 9. Динамика относительных превышений температур обмотки индуктора  $\theta_1^*$  (тонкие линии) и якоря  $\theta_2^*$  (жирные линии) при естественном охлаждении (0) и режимах охлаждения I, II и III за 100 импульсов в зависимости от  $T_{imp}$

Таким образом, интенсивное охлаждение одного из активных элементов ЛИИЭП позволяет существенно уменьшить превышения температур обоих активных элементов.

**Экспериментальные исследования.** Для проверки основных теоретических результатов была изготовлена экспериментальная установка, представленная на рис. 10,а.

Экспериментальный образец ЛИИЭП содержит неподвижный индуктор с двухслойной обмоткой дисковой формы, которая намотана прямоугольной медной шиной, замоноличена эпоксидной смолой и уложена либо в толстостенный стеклотекстолитовый каркас, либо в тонкостенный стальной каркас с возможностью интенсивного охлаждения (рис. 2).



Рис. 10. Экспериментальная установка для исследования ЛИИЭП с тонкостенным стальным каркасом (а) и процесс измерения температуры (б)

Интенсивное охлаждение создавалось направленным потоком холодного воздуха на стальной каркас. Были проведены измерения температуры на поверхности обмотки индуктора ЛИИЭП при работе в циклическом режиме с периодом следования импульсов  $T_{imp}=1$  с. Измерение температуры обмотки проводилось при помощи термопары прибора М 890G. При

измерениях датчик с термопарой устанавливался в наиболее напряженном в тепловом отношении участке – на середине открытой стороны обмотки.

Было установлено, что обмотка индуктора со стальным каркасом, обдуваемым воздухом, нагревается слабее, чем обмотка с изоляционным каркасом (рис. 11). Заметим, что за время 270 с температура обмотки с изоляционным каркасом увеличивалась так, что ее эпоксидная смола размягчалась. Было установлено, что экспериментальные зависимости с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами.

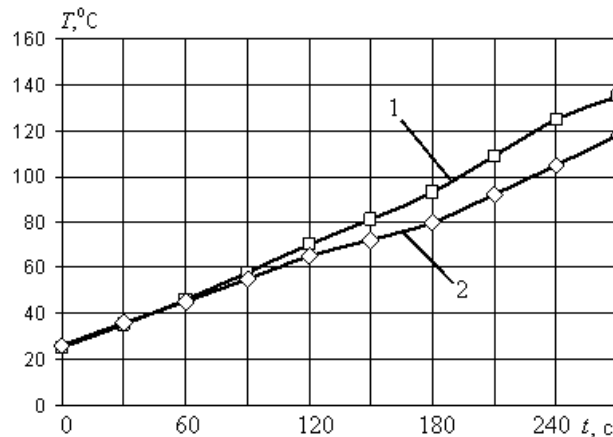


Рис. 11. Экспериментальные зависимости температуры на поверхности обмотки индуктора с изоляционным (1) и стальным (2) каркасами ЛИИЭП при работе с  $T_{imp}=1$  с

### Конструктивная схема ЛИИЭП с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора.

Поскольку применение интенсивного водяного охлаждения для подвижного якоря сопряжено с целым рядом конструктивных трудностей, то указанное охлаждение целесообразно применить только для неподвижной обмотки индуктора. Исходя из этого, разработана конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия, которая представлена на рис. 12 [13].

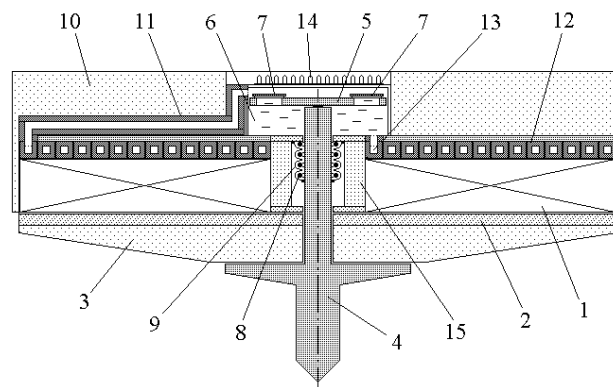


Рис. 12. Конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора

В ЛИИЭП циклического действия при возбуждении обмотки 1 индуктора от ЕНЭ магнитное поле индуцирует токи в электропроводящем якоре 2 вихревые токи. Возникающая между ними электродинамическая сила перемещает якорь 2 вместе с ударным диском 3 и бойком 4. Направляющая часть бойка соединена с плоским поршнем 5, расположенным

внутри охлаждающей камеры 6 с водой. Упорядочено расположенные на плоском поршне 5 односторонние клапаны 7 при прямом ходе якоря свободно пропускают воду. При этом возвратная пружина 8 и охватывающий ее упругий гидроизоляционный сильфон 9 растягиваются. Охлаждающая камера 6 расположена в изоляционном корпусе 10.

После совершения прямого хода под действием пружины 8 якорь 2 с бойком 4 совершают обратный ход, и односторонние клапаны 7 закрываются. Поршень 5 толкает воду, которая выдавливается из камеры 6. Она поступает во входной конец 11 намотанной в форме диска трубки 12, проходит по ее внутреннему каналу и через выходной конец 13 поступает в камеру 6. Циркулирующая таким образом в трубке 12 вода отводит тепловую энергию, выделяемую в обмотке 1, предотвращая нагрев обоих активных элементов, поскольку между ними происходит тепловое взаимодействие в пассивном режиме работы ЛИИЭП. Тепло нагретой воды отводится из охлаждающей камеры 6 в окружающее пространство через установленные на ее внешней стороне радиаторы 14. Направляющая втулка 15 служит технологическим каркасом для обмотки 1 индуктора и защищает гидроизоляционный сильфон 9 от механических воздействий. Поскольку поршень 5 при обратном ходе подвергается действию силы сопротивления, вызванной, в основном, гидравлическим сопротивлением воды во внутреннем канале 13 многовитковой трубки 12, то происходит плавное движение бойка 4 в сторону обмотки 1 индуктора. Таким образом, осуществляется безударное контактирование якоря 2 с обмоткой 1 индуктора.

#### Выводы.

1. Разработана математическая модель ЛИИЭП циклического действия, учитывающая комплекс взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов.

2. Исследованы электромагнитные, электромеханические и энергетические процессы ЛИИЭП, возникающие при прямом ходе рабочего цикла. Показано, что к концу рабочего цикла значительная часть энергии преобразуется в тепловую энергию якоря (26,8 %) и индуктора (28,7 %).

3. При значительном числе рабочих циклов с периодом следования импульсов  $T_{imp}=1$  с наблюдаются недопустимо высокие превышения температур активных элементов ЛИИЭП.

4. Одним из путей решения проблемы нагрева обмотки индуктора является интенсивное охлаждение ее, подвижного якоря или их обоих. При этом превышения температур активных элементов достигают определенных значений, после которых практически не изменяются.

5. Увеличение периода следования импульсов приводит к снижению превышений температур активных элементов ЛИИЭП. С увеличением указанного периода при естественном охлаждении превышения температур активных элементов уменьшаются практически линейно и незначительно. При интенсивном охлаждении, по крайней мере, одного из активных элементов превышения температур активных элементов уменьшаются на 80-90 %.

6. Проведены измерения температуры на поверхности обмотки индуктора ЛИИЭП при работе в циклическом режиме с периодом следования импульсов  $T_{imp}=1$  с. Установлено, что обмотка индуктора со стальным каркасом, обдуваемым воздухом, нагревается медленнее, чем обмотка с изоляционным каркасом. Экспериментальные зависимости с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами.

7. Разработана конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical. – Stockholm, Sweden. – 2013. – 120 p.
2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – №3. – С. 44-52.
3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. – 2014. – vol.56. – iss.10. – pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.
4. Наумов И.В., Болюх В.Ф., Бреславский Д.В. Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником // Механіка та машинобудування. – 2010. – №1. – С. 207-216.
5. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
6. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – vol.83. – no.10. – pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
7. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol.86. – no.7. – pp. 425-431. doi: 10.3103/s1068371215070044.
9. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – vol.49. – no.12. – pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.
10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
11. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – vol.39. – no.1. – pp. 382-389. doi: 10.1109/tps.2010.2047276.
12. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering. – 2004. – vol.75. – no.12. – pp. 1-11.
13. Пат РФ № 2467455. Индукционно-динамический электродвигатель циклического действия / Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка №. 2011107038/07– Заявл. 24.02.2011. – Опубл. 20.11.2012.

#### REFERENCES

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical. Stockholm, Sweden. 2013. 120 p.
2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Artillery and small arms*, 2008, no.3, pp. 44-52.

3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, iss.10, pp. 1098-1104. doi: **10.1007/s11018-014-0337-z**.
4. Naumov I.V., Bolyukh V.F., Breslavskiy D.V. Deformation and fracture of the plates during loading cylindrical drummer. *Mechanics and engineer*, 2010, no.1, pp. 207-216. (Rus).
5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
6. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*, 2012, vol.83, no.10, pp. 571-576. doi: **10.3103/s1068371212100045**.
7. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: **10.3103/s1068371211020027**.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol.86, no.7, pp. 425-431. doi: **10.3103/s1068371215070044**.
9. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol.49, no.12, pp. 5749-5755. doi: **10.1109/tmag.2013.2272561**.
10. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. *Mul'tifizicheskoe modelirovanie v elektrotekhnike* [Multiphysical modeling in electrical engineering]. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus).
11. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol.39, no.1, pp. 382-389. doi: **10.1109/tps.2010.2047276**.
12. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2004, vol.75, no.12, pp. 1-11.
13. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Induktsionno-dinamicheskii elektrodvigatel' tsiklicheskogo deistviia* [Induction-dynamic electric motor of cyclic action]. Patent Russian Federation, no. 2467455, 2012. (Rus).

Поступила (received) 28.06.2017

Болюх Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Шукин Игорь Сергеевич<sup>1,2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

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

V.F. Bolyukh<sup>1</sup>, I.S. Schukin<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Firm Tetra, LTD,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action.

**Purpose.** Investigation of the influence of the intensity of cooling of active elements and the period of succession of power pulses

on the thermal processes of linear pulse-induction electromechanical converter (LPIEC) operating in a cyclic mode. **Methodology.** The electromechanical and energy processes of LPIEC, which arise during the direct course of the working cycle, are investigated. It is shown that by the end of the operating cycle, a significant part of the energy is stored in the capacitive energy storage device, and is also converted into thermal energy of the armature and inductor. With a significant number of operating cycles, an unacceptably high temperature rise of LPIEC active elements occurs. To solve this problem, intensive cooling of the winding of the inductor, the movable armature or both of them, as well as an increase in the pulse repetition period are used. It has been experimentally established that when the LPIEC is operating in a cyclic mode, the inductor winding with a steel frame blown with air is heated more slowly than the winding with an insulating frame. The experimental dependences with an accuracy of 6 % coincide with the calculated results. A constructive scheme of the LPIEC of cyclic action with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. **Results.** A mathematical model of the LPIEC of cyclic action is developed, taking into account a complex of interrelated electromechanical and thermal processes. The solutions of its equations are represented in a recurrent form. The electromechanical and energy processes of LPIEC, which arise during the direct course of the working cycle, are investigated. It is shown that for a considerable number of operating cycles, unacceptably high temperature excesses of active elements of the LPIEC are observed. It is shown that intensive cooling of the winding of the inductor, the movable armature or both of them, and also the increase in the pulse repetition period ensure the temperature stabilization of the LPIEC. Measurements of the temperature on the surface of the winding of the inductor LPIEC during cyclic operation are carried out. A constructive scheme of the LPIEC of cyclic action with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. **Originality.** A mathematical model of the LPIEC of cyclic action is developed, taking into account a complex of interrelated electromechanical and thermal processes. The solutions of its equations are represented in a recurrent form. It is shown that by the end of the working cycle a significant part of the energy is converted into thermal energy of the armature and inductor. It is determined that for a significant number of operating cycles, unacceptably high temperature excesses of active elements of the LPIEC are observed. It is shown that intense cooling of active elements, as well as an increase in the pulse repetition period, ensure the temperature stabilization of the LPIEC. A design scheme of the LPIEC with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. **Practical value.** It is shown that by thermal cooling of at least one of the active elements and by increasing the pulse repetition period, the temperature stabilization of the LPIEC is ensured. A constructive scheme of the LPIEC of cyclic action with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. References 13, tables 1, figures 12.

**Key words:** linear pulse-induction electromechanical converter, cyclic action, thermal state, mathematical model, electromechanical and energy processes, intensive cooling, experimental studies, constructive scheme.



Е.В. Ягуп

## СИЛОВОЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ПРИ РАБОТЕ НА НЕСИММЕТРИЧНУЮ И НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКИ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ

*Стаття присвячена дослідженню трифазної чотирипровідної системи електропостачання, що живить несиметричне трифазне і нелінійне однофазне навантаження. Силовий активний фільтр являє собою чотириплечовий мостовий інвертор на IGBT транзисторах. Інвертор живиться від енергообмінного конденсатора і інжектуює коригувальні струми через буферні реактори. На відміну від класичної системи управління, заснованої на перетвореннях Кларк для напруг і струмів, в даному варіанті запропоновано управління джерелами еталонних сигналів, які апіорі мають синусоїдальну форму і збігаються з фазами живильних джерел електричної енергії. Визначення необхідних амплітуд еталонних сигналів становить сутність пошукової оптимізації. Оптимізація здійснюється шляхом деформованого багатогранника з використанням візуальної моделі системи електропостачання з силовим активним фільтром. По завершенні оптимізації система приходить до оптимального режиму, що характеризується повною компенсацією всіх складових реактивної потужності. Бібл. 9, рис. 4.*

*Ключові слова:* пошукова оптимізація, візуальна модель, трифазна система електропостачання, реактивна потужність, силовий активний фільтр.

*Статья посвящена исследованию трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения, питающей несимметричную трехфазную и однофазную нелинейную нагрузку. Силовой активный фильтр представляет собой четырехплечевой мостовой инвертор на IGBT транзисторах. Инвертор питается от энергообменного конденсатора и инжектирует корректирующие токи через буферные реакторы. В отличие от классической системы управления, основанной на преобразованиях Кларк для напряжений и токов, в рассматриваемом варианте предложено управление источниками эталонных сигналов, априори имеющими синусоидальную форму и совпадающими с фазами питающих источников электрической энергии. Определение необходимых амплитуд эталонных сигналов составляет сущность задачи поисковой оптимизации. Оптимизация осуществляется методом деформируемого многогранника с использованием визуальной модели системы электроснабжения с силовым активным фильтром. По завершении оптимизации система приходит к оптимальному режиму, характеризующемуся полной компенсацией всех составляющих реактивной мощности. Библ. 9, рис. 4.*

*Ключевые слова:* поисковая оптимизация, визуальная модель, трехфазная система электроснабжения, реактивная мощность, силовой активный фильтр.

**Введение.** Несимметричные и нелинейные нагрузки в трехфазных системах электроснабжения порождают ряд проблем, связанных, в конечном счете, с реактивной мощностью. Циркуляция реактивной мощности в системе в свою очередь приводит к возрастанию токов в линиях электропередач, увеличению необратимых тепловых потерь в проводах, перегреву и преждевременному выходу из строя изоляции электротехнических устройств [1]. В связи с этим вопросы симметрирования и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения представляют собой большой и неослабевающий интерес в течение последних десятилетий. Ряд работ в этом направлении связаны с исследованиями физической природы реактивной мощности и математическими трактовками ее поведения в зависимости от причин ее появления [2]. В этом плане характерен отход от традиционных представлений, сложившихся в 20-50 годы прошлого столетия и выявление слабых сторон этих теорий [3, 4]. Необходимость применения новых теорий, основанных, в частности, на использовании понятия мгновенной мощности, диктуется разработкой систем управления силовыми активными фильтрами [4-8], которые позволяют коренным образом решить проблемы, связанные с несимметричностью и несинусоидальностью напряжений и токов в трехфазных системах электроснабжения. Силовые схемы активных фильтров строятся на основе трехфазных инверторов на IGBT транзисторах с энергообменным конденсатором, заряжаемым через шунтирующие обратные диоды. Генерируемые корректирующие токи через буферные реакторы инжектируются в систему

электроснабжения в точках подключения нагрузок для случая параллельного активного фильтра. Ответственным элементом силового активного фильтра является система управления транзисторами, которая является интеллектуальным устройством, содержащим достаточно сложные вычислительные блоки, реализуемые с помощью микроконтроллеров. Уже установилась традиция проектирования систем управления на основе использования преобразований Кларк и теории мгновенной мощности [5-7]. В то же время не прекращаются попытки применить другие подходы для управления силовыми активными фильтрами, в частности, на основе применения алгоритмов поисковой оптимизации [9]. Эти алгоритмы предполагают нахождение квазиустановившегося режима системы электроснабжения с активным фильтром при помощи программных средств оптимизации, тем самым позволяя исключить указанные традиционные преобразования и получить оптимальные решения для искомого режима.

**Цель работы** заключается в применении методов поисковой оптимизации для нахождения квазиустановившегося режима трехфазной системы электроснабжения с силовым активным фильтром параллельного типа при одновременном питании трехфазной несимметричной активно-индуктивной нагрузки и нелинейной вентильной нагрузки.

**Основной материал исследования.** Визуальная модель исследуемой системы электроснабжения приведена на рис. 1.

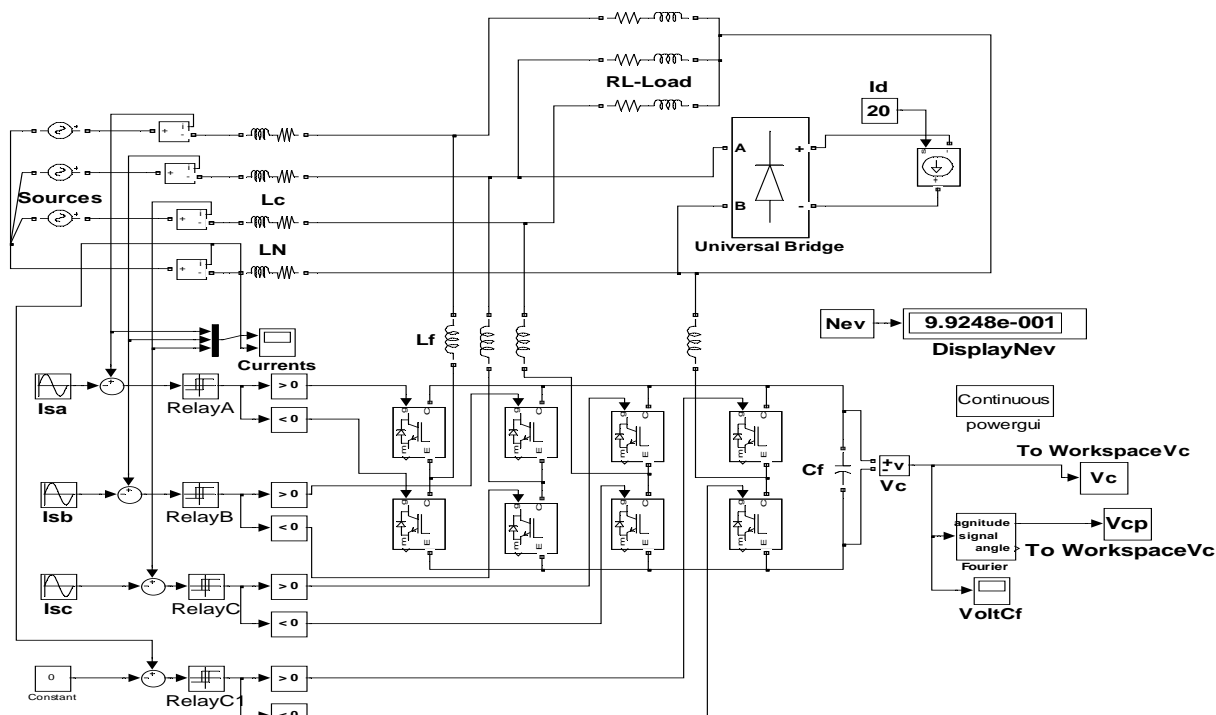


Рис. 1. Визуальная модель исследуемой системы

Здесь питающая трехфазная симметричная сеть бесконечной мощности представлена источниками напряжения Sources, имеющих нормированную амплитуду 100 В и частоту 50 Гц. Линии электропередачи, в отличие от [2], не внесены в нагрузку, а рассматриваются отдельно и, таким образом, не охватываются силовым активным фильтром. Они представлены активно-индуктивными элементами Lc, сопротивления резисторов которых приняты равными 0,1 Ом, а индуктивности – 0.001 Гн. Сопротивление и индуктивность нейтрального провода LN в три раза превышают соответствующие величины параметров линий электропередачи. Трехфазная несимметричная линейная нагрузка RL-Load по схеме звезды, соединенной с нейтральным проводом, имеет следующие величины параметров по фазам: Ra=1,5 Ом, La=0,025 Гн, Rb=1,0 Ом, Lb=0,01 Гн, Rc=2,0 Ом, Lc=0,04 Гн. Нелинейная нагрузка представлена однофазным мостовым выпрямителем Universal Bridge. Он присоединен к фазе В в точке подключения линейной нагрузки и к нейтральному проводу, таким образом, выпрямитель питается фазным напряжением. Нагрузка выпрямителя осуществляется управляемым источником постоянного тока фиксированной величины Id=20 А. Силовой блок активного фильтра представлен в виде инвертора четырьмя плечами IGBT транзисторов, каждый из которых шунтирован обратным диодом. Через обратные диоды заряжается энергообменный конденсатор Cf, который фактически питает активный фильтр, для чего необходимо обеспечить заряд этого конденсатора до напряжения, превышающего амплитуду линейного напряжения сети в точках подключения нагрузок. К этим точкам через буферные реакторы Lf подводятся корректирующие токи, снимаемые с диагоналей мостов инвертора. Эти токи должны обеспечить в линиях электропередачи синусоидальные токи, совпадающие по фазе с напряжениями фаз соответствующих источников питания.

Система управления активным фильтром построена по релейному принципу. Она реализуется при помощи четырех релейных элементов Relay, с выходов которых сигналы разделяются на два канала при помощи элементов сравнения с нулем. Получаемые пары импульсных сигналов подаются на транзисторы верхнего и нижнего плеча соответствующей фазы. Таким образом осуществляется широтно-импульсная модуляция, благодаря которой и формируются корректирующие токи активного фильтра. Для формирования сигналов по релейному принципу с помощью измерителей токов снимаются токи в линиях электропередачи и нейтральном проводе. Далее из полученных сигналов вычитаются эталонные сигналы, форму которых должны повторить в результате воздействия корректирующих токов фильтра токи в линиях нагрузки и нейтральном проводе. Поэтому эталонные сигналы Isa, Isb, Isc для фаз А, В, С соответственно заданы в виде трехфазной симметричной системы синусоид подобными синусоидам питающих напряжений системы электроснабжения. Поскольку нейтральный провод должен быть совершенно разгружен, эталонный сигнал для него задан источником нулевой константы. При таких условиях для выхода на квазиустановившийся режим остается неизвестной лишь амплитуда эталонных сигналов, обеспечивающая этот режим.

Нескомпенсированный режим при отключенном силовом активном фильтре характеризуется несинусоидальностью и нелинейностью токов и напряжений в системе и перегрузкой нейтрального провода по току. На рис. 2 приведены три тока в линиях электропередачи (верхние диаграммы) и ток в нейтральном проводе. Здесь видно, что ток в фазе В, которая подгружена выпрямителем, достигает амплитуды 40 А, а ток в нейтральном проводе – 25 А, что в два раза превышает амплитуды линейных токов фаз А и С. Все токи имеют явно выраженную несинусоидальную форму, что означает присутствие в системе токов высших гармоник и реактивной мощности искажений.

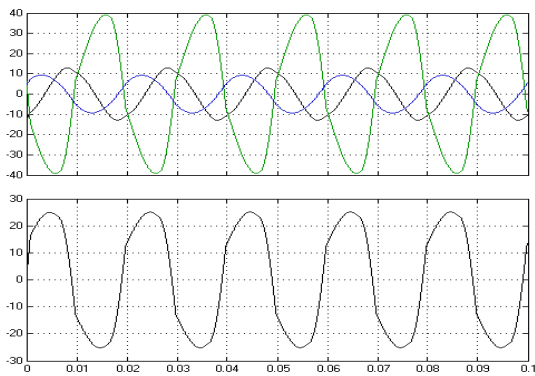


Рис. 2. Токи в нескомпенсированном режиме

Оптимизация режима осуществляется при подключенном силовом активном фильтре программными средствами Matlab с использованием представленной визуальной модели. Оптимизация основана на требовании задания такого единственного значения амплитуд эталонных сигналов для фаз, при котором в системе имеет место квазиустановившийся режим. Он характеризуется установлением периодических токов и напряжений на всех элементах системы. В частности, напряжение на энергообменном конденсаторе должно представлять сумму постоянной и переменной составляющих. Постоянная составляющая напряжения на конденсаторе, как указано ранее, должна превосходить амплитуду линейного напряжения. Пульсации напряжения на конденсаторе, представляющие переменную составляющую, зависят от нагрузки и величины емкости энергообменного конденсатора. С точки зрения работоспособности фильтра можно считать, что эта емкость бесконечна, и в этом случае играет роль источника напряжения. В этом случае пульсации будут отсутствовать. Однако на практике емкость энергообменного конденсатора конечна (в модели ее величина принята равной 600 мкФ). При конечной величине емкости конденсатора напряжение на нем отражает отличие амплитуды эталонного сигнала от оптимальной величины. При превышении этой величины в систему поступает избыточная энергия и напряжение на энергообменном конденсаторе стремится нарастать, достигая в асимптотике некоторого весьма большого значения, соответствующего условиям баланса активных мощностей. При недостатке амплитуды эталонного сигнала напряжение на энергообменном конденсаторе стремится убывать из-за недостатка поступающей в систему энергии, достигая в асимптотике нулевого значения, что отнюдь не соответствует нормальным условиям работы силового активного фильтра. Таким образом, напряжение на энергообменном конденсаторе фильтра при условии конечной величины его емкости является своего рода индикатором достижения оптимального скомпенсированного режима в системе.

Программные средства оптимизации взяты из стандартной библиотеки Matlab, где имеются такие программы нелинейной оптимизации, как `fminsearch()`, реализующая алгоритм деформируемого многогранника, и `fminunc()`, использующая метод сопряженных градиентов. Обе программы легко взаимозаменяемы изменением имени, по которому они вызываются, аргументы у обеих функций могут совпадать. В качестве переменных оптимизации используются амплитуда эталонного сигнала системы управления и начальное напряжение на энергообменном конденсаторе. Целевая функция формируется из

дискретных значений напряжения на энергообменном конденсаторе. Эти значения выдаются на интервале прогона визуальной модели в течение пяти периодов питающего напряжения с интервалом дискретизации, равным периоду питающего напряжения. Для формирования целевой функции составляются разности смежных дискретных значений, из которых формируется шаровая метрика. Дополнительно введено также условие достижения дискретными значениями заданного уровня (в работе он принимался равным 400 В). Таким образом, при прогоне модели дискретные значения передаются в рабочую область Matlab, где они подхватываются дополнительной функцией, осуществляющей прогон визуальной модели с последующим вычислением значения целевой функции, которое далее передается в головную программу, вызывающую функцию оптимизации. На рис. 1 показано состояние модели по достижении минимума, где можно видеть значение целевой функции в виде глобальной константы  $Nev = 0,99248$ , что достаточно точно определяет скомпенсированный режим в системе. Амплитуды эталонных сигналов при этом составили величины  $I_{sm} = 12,369$  А. Из этого значения 4,243 А приходится, как это показано в [10], на питание несимметричной линейной нагрузки, а остальная доля 8,126 А приходится на обеспечение питания нелинейной нагрузки выпрямителя. Справедливость этого распределения иллюстрируется простым оценочным расчетом доли активной мощности, потребляемой выпрямителем. На рис. 3 приведены диаграммы токов в линиях нейтрального провода в скомпенсированном режиме (аналогичные диаграммам на рис. 2). Здесь видно, что амплитуды линейных токов уравнились, а их фазы совпадают с фазами питающих напряжений. Ток в нейтральном проводе практически исчез. Это свидетельствует о полном симметрировании и уравнивании режима в системе электроснабжения.

На рис. 4 приведена диаграмма напряжения на энергообменном конденсаторе. Оно начинается с найденного в ходе поисковой оптимизации напряжения в нулевой моменте  $V_{co} = 401,562$  В и образует вектор дискретных величин  $V_c = [400,099; 399,878; 399,885; 399,356; 399,179]$ , свидетельствующих об обеспечении заданного стабильного напряжения на энергообменном конденсаторе в пределах заданной погрешности.

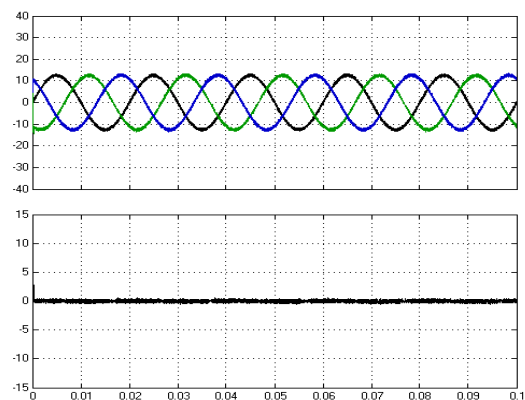


Рис. 3. Токи в скомпенсированном режиме

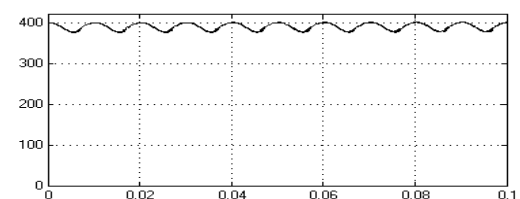


Рис. 4. Напряжение на конденсаторе

**Выводы.** Проведенное исследование показывает, что предложенный алгоритм управления активным фильтром, основанный на применении поисковой оптимизации совместно с визуальной моделью системы электроснабжения, позволяет определить квазиустановившийся режим системы и выйти на оптимальный режим полной компенсации всех составляющих реактивной мощности при питании несимметричной линейной и нелинейной нагрузок. При этом представляется возможным сформировать целевую функцию из дискретных значений напряжения на энергообменном конденсаторе, а в качестве переменных оптимизации использовать амплитуду эталонного синусоидального сигнала для предложенной системы управления и начальное значение напряжения на энергообменном конденсаторе. Введение в выражение для целевой функции параметра стабилизации напряжения на энергообменном конденсаторе позволяет также задать должный уровень превышения напряжения на конденсаторе над амплитудой линейного напряжения сети, обеспечив тем самым нужное направление потока энергии от фильтра к сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. – Bodmin, MPG Books Ltd, Cornwall. – 2002. – 443 p. ISBN 0 7506 5126 1.
2. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии в пространственных PQR координатах // *Электротехника і електромеханіка*. – 2016. – №2. – С. 11-20. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.02.
3. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1987. – vol.IM-36. – no.3. – pp. 834-837. doi: 10.1109/TIM.1987.6312797.
4. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1996. – vol.11. – no.3. – pp. 1238-1243. doi: 10.1109/61.517477.
5. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits // *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan. – 1983. – pp. 1375-1386.
7. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1984. – vol.IA-20. – no.3. – pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
8. Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 1998. – vol.13. – no.6. – pp. 1174-1181. doi: 10.1109/63.728344.
9. Ягуп Е.В. Оптимизация режима несимметричной трехфазной системы с использованием активного фильтра и модифицированного алгоритма управления // *Вісник НТУ «ХПІ»*, серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2016. – №42(1214). – С. 124-128. doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.20.

#### REFERENCES

1. Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Bodmin, MPG Books Ltd, Cornwall, 2002. 443 p. ISBN 0 7506 5126 1.
2. Zhemerov G.G., Tugay D.V. Components of total electric energy losses power in PQR spatial coordinates. *Electrical*

*engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp. 11-20. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.02.

3. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1987, vol.IM-36, no.3, pp. 834-837. doi: 10.1109/TIM.1987.6312797.
4. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol.11, no.3, pp. 1238-1243. doi: 10.1109/61.517477.
5. Akagi H., Watanabe E. H. and Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, April 2007. 379 p. ISBN: 978-0-470-10761-4.
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits. *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.
7. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol.IA-20, no.3, pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
8. Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, vol.13, no.6, pp. 1174-1181. doi: 10.1109/63.728344.
9. Yagup E.V. Optimization of the mode of asymmetric three-phase system using an active filter and a modified control algorithm. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies*, 2016, no.42(1214), pp. 124-128. (Rus). doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.20.

Ягуп Екатерина Валериевна, к.т.н., доц.,  
Харьковский национальный университет  
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17,  
тел/phone +380 57 7073114, e-mail: kata3140@gmail.com

E.V. Yagup

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,  
17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### An active power filter at operation on the unbalanced and nonlinear loads with control by optimization algorithm.

**Purpose** is to develop a method for controlling a power active filter based on search optimization using software of Matlab package and applying this method for balancing and compensating for all components of reactive power in a three-phase system feeding unbalanced linear and nonlinear loads simultaneously. **Methodology** consists in the development of a visual model of the power supply system that supplies unbalanced and non-linear loads, to the connection points of which a power active filter on IGBT transistors is connected according to a parallel type scheme. We propose an algorithm for calculating the chosen optimization criterion using a visual model, linking the visual model with an optimizing program, and performing a search engine optimization process using an embedded program that implements the deformable polyhedron algorithm. **Results** lead to an optimal mode, which is characterized by the amplitudes of the control signals of the power active filter control system determined by the search, as well as the initial value of the voltage on the filter energy exchange capacitor. **Originality** lies in the fact that the proposed method of controlling the operation of the power filter makes it possible to dispense with the construction of a relatively complex filter control system based on Clark's mathematical transformations. **Practical value** lies in the fact that finding a quasi-steady-state optimal mode of the power supply system with a power active filter is performed automatically in the process of search optimization with a simplified control system. The above principles can be implemented in the microprocessor control system for power active filters. References 9, figures 4

**Key words:** search optimization, visual model, three-phase power supply system, reactive power, power active filter.

И.В. Кривцун, И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец, С.В. Рымар

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИСПЕРСИИ ИМПЕДАНСА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ПОМОЩЬЮ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ФРИКЕ

*Розроблено методику обробки експериментальних даних для визначення коефіцієнтів апроксимації імпедансу біологічних тканин рослинного й тваринного походження при моделюванні дисперсії імпедансу з допомогою схеми заміщення Фріке. Проведено аналіз властивостей схеми заміщення Фріке, її можливостей і особливостей при моделюванні дисперсії імпедансу, резистансу й реактансу. Показано, що при нормуванні дисперсії активні складові імпедансу для тканин рослинного й тваринного походження подібні. Бібл. 15, табл. 3, рис. 16.*

**Ключові слова:** біологічна тканина, електричні властивості, моделювання, дисперсія імпедансу, схема заміщення Фріке, методика, коефіцієнти апроксимації.

*Разработана методика обработки экспериментальных данных для определения коэффициентов аппроксимации импеданса биологических тканей растительного и животного происхождения при моделировании дисперсии импеданса с помощью схемы замещения Фрике. Проведен анализ свойств схемы замещения Фрике, ее возможностей и особенностей при моделировании дисперсии импеданса, резистанса и реактанса. Показано, что при нормировании дисперсии активные составляющие импеданса для тканей растительного и животного происхождения подобны. Библ. 15, табл. 3, рис. 16.*

**Ключевые слова:** биологическая ткань, электрические свойства, моделирование, дисперсия импеданса, схема замещения Фрике, методика, коэффициенты аппроксимации.

**Введение.** Дисперсия, то есть частотная зависимость, импеданса (полного или комплексного сопротивления) и его составляющих – резистанса (активного сопротивления) и реактанса (реактивного сопротивления) биологических тканей важна при исследовании воздействия на них электрического тока. Это касается электрической безопасности, диагностики и лечения человека и животных, контроля показателей качества сельскохозяйственной продукции. Сейчас этот вопрос стал весьма актуальным в связи с созданием специального хирургического оборудования для сварки живых тканей токами высокой частоты [1].

**Целью статьи** является: моделирование дисперсии импеданса биологических тканей растительного и животного происхождения с помощью схемы замещения Фрике [2, 3]; создание методики обработки экспериментальных данных для определения коэффициентов аппроксимации дисперсии импеданса биологических тканей для схемы замещения Фрике; изучение особенностей этой схемы замещения при моделировании дисперсии импеданса, резистанса и реактанса; определение области частот, в которой использование схемы замещения корректно; выявление и обобщение основных закономерностей дисперсии импеданса биологических тканей растительного и животного происхождения.

Исследования основаны на экспериментальных данных разных авторов. Приведенные в статье примеры обработки данных представлены в виде, который предназначен для использования в пакете MathCAD [4].

Результаты решения этой задачи **актуальны** для специалистов, создающих диагностическую и контрольно-измерительную аппаратуру для определения свойств тканей животного и растительного происхождения. Также они будут востребованы при создании медицинской аппаратуры для сварки живых тканей.

**Структура биологической ткани.** Биологическая ткань состоит из клеток и межклеточного вещества. Сами клетки – это сложные образования, состоящие из многих элементов, находящихся в белковой субстанции, ограниченной клеточными мембранами (см. рис. 1).

С точки зрения электротехники нас будет интересовать изменение импеданса биологической ткани от частоты при прохождении через нее переменного электрического тока (АС), который подводится к ткани электродами площадью  $S$ , отстоящими друг от друга на расстоянии  $l$ .

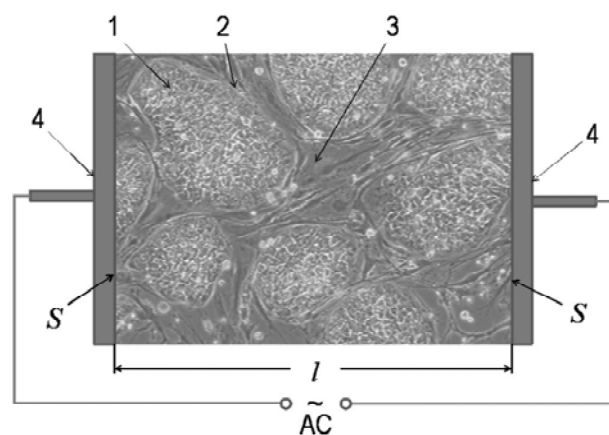


Рис. 1. Структура биологической ткани состоящей из клеток 1, ограниченных клеточными мембранами 2, и межклеточным веществом 3 (при измерении импеданса она размещается между двумя электродами 4)

Электромагнитные свойства биологических тканей обусловлены характеристиками органического материала, заполненного электролитом. В биологических тканях электролитом является межклеточное вещество и клеточное содержимое [5, 6].

© И.В. Кривцун, И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец, С.В. Рымар

Из-за наличия мембран и пленок, обладающих емкостью, сопротивление клетки имеет в основном емкостной характер.

При измерении электрических параметров биологических тканей на границе между измерительными электродами и тканью (электролитом), при прохождении электрического тока, возникает двойной электрический слой, так же имеющий емкостной характер. Двойной электрический слой приближенно описывается адсорбционной теорией Штерна [7]. Влияние двойного электрического слоя особенно выражено при постоянном токе и низких частотах. Именно здесь вносится наибольшая погрешность в измерения электрических параметров биологических тканей. С увеличением частоты, влияние двойного электрического слоя уменьшается.

Для уменьшения влияния двойного электрического слоя при измерении электрических параметров биологических тканей, как правило, используется две пары электродов. Одной парой подводят электрический ток, а измерения производят другой парой электродов [8].

**Диэлектрическая проницаемость биологической ткани.** Диэлектрическая проницаемость  $\underline{\epsilon}$  [9, 10] (здесь и далее подчеркивание обозначает комплексную величину) биологической ткани содержит вещественную  $\epsilon'$  и мнимую части  $\epsilon''$ , обе из которых зависят от частоты  $f$ :  $\underline{\epsilon}(f) = \epsilon'(f) - j \cdot \epsilon''(f)$ , где  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица. На рис. 2 приведена типичная зависимость значений модуля диэлектрической проницаемости  $|\underline{\epsilon}|$  биологической ткани (в данном случае мышечной [3, 5, 6]) от частоты в диапазоне частот от  $10^1$  до  $10^{12}$  Гц. Зависимость имеет три характерных участка  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

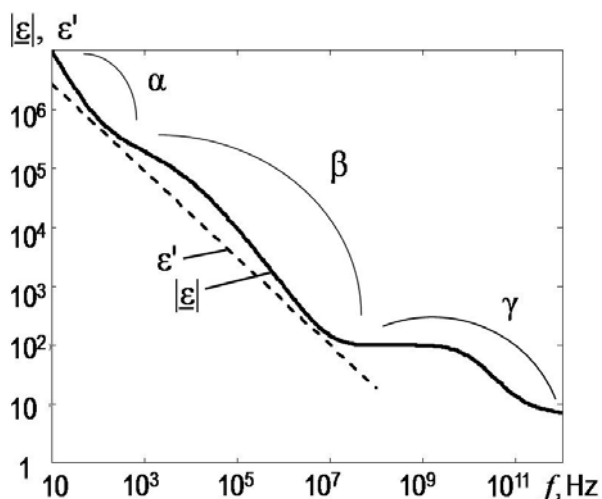


Рис. 2. Зависимость модуля диэлектрической проницаемости  $|\underline{\epsilon}|$  биологической ткани [3, 5, 6] и наибольших расчетных значений ее вещественной части  $\epsilon'$  от частоты  $f$

Наличие диапазонов участков обусловлено [5, 6]:

- $\alpha$ : ( $f < 10^3$  Гц) – протеканием тока по межклеточному веществу, когда сопротивление клеток для тока низкой частоты еще велико и диэлектрическая проницаемость определяется поляризацией внутриклеточных компартментов и инерцией движения молекул с большой молекулярной массой при резонансных

явлениях, и явлениями в двойном электрическом слое;

- $\beta$ : ( $10^3$  Гц  $< f < 10^8$  Гц) – протеканием тока по межклеточному веществу, клеточным мембранам и клеточному содержимому и отражает релаксационную поляризацию полярных макромолекул, и определяется их эффективными радиусами и вязкостью среды, а так же диэлектрическими потерями в клеточных мембранах – тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ , служащим количественной мерой относительной доли вклада электропроводящих и диэлектрических свойств среды при взаимодействии с ней электромагнитного поля [5, 10]. Заметим, что величины  $\text{tg}\delta$ ,  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  лишь частично моделируют реакцию ткани на прохождение через нее электромагнитного поля и не отражают все физические процессы, происходящие в ткани;

- $\gamma$ : ( $f > 10^8$  Гц) – явлениями резонанса молекул воды межклеточного вещества и клеточного содержимого, и ориентационной поляризацией молекул воды.

Границы диапазонов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и значения  $|\underline{\epsilon}|$  могут отличаться от указанных на рис. 2, в зависимости от вида биологической ткани.

Одним из методов моделирования в электротехнике является создание электрических схем замещения [11]. При моделировании электрических процессов в биологической ткани будем придерживаться этого метода.

**Электрическая схема замещения биологических тканей Фрике.** При моделировании дисперсии импеданса биологических тканей часто применяется схема замещения [2] (рис. 3), предложенная в начале 20-х годов XX столетия датско-американским физиком Уго Фрике (Hugo Fricke, 1892-1972). Схема моделирует электрические процессы в биологической ткани при частотах от  $10^1$  до  $10^6$  Гц, то есть на участках  $\alpha$  (за исключением очень низких частот) и  $\beta$ .

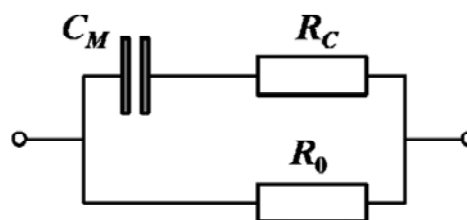


Рис. 3. Электрическая схема замещения биологической ткани Фрике

Схема замещения содержит:  $C_M$  – частотно зависимую эквивалентную электрическую емкость клеточных мембран; частотно независимые эквивалентные активные электрические сопротивления (резистансы) содержимого клеток  $R_C$  и межклеточного вещества  $R_0$ .

Если же рассматривать удельные сопротивления и емкости с размерностью соответственно [Ом·м] и [Ф/м], то элементы схемы замещения на рис. 3 следует считать удельными.

В простейшем случае, показанном на рис. 1, связь между удельным полным электрическим сопро-

тивлением и полным электрическим сопротивлением (импедансами) имеет вид:

$$\underline{Z}_s(f) = \underline{Z}(f) \cdot S/l;$$

связь между активными удельными электрическими сопротивлениями и активными электрическими сопротивлениями:

$$R_{s,c}(f) = R_c \cdot S/l; R_{s,0}(f) = R_0 \cdot S/l;$$

эквивалентная удельная электрическая емкость клеточных мембран  $C_{s,M}$  определяется из выражения:

$$C_{s,M}(f) = C_M(f) \cdot l/S.$$

Удельная электрическая емкость прямо пропорциональна произведению диэлектрической постоянной  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м и вещественной части  $\epsilon'$  комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\underline{\epsilon}$ :

$$C_{s,M}(f) = C_M(f) \cdot l/S = \epsilon_0 \cdot \epsilon'(f).$$

Полное электрическое сопротивление схемы замещения Фрике в зависимости от частоты равно:

$$\underline{Z}(f) = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_c + \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_M(f)}}}. \quad (1)$$

Разделив правую и левую части формулы (1) на сопротивление  $R_0$ , получим выражение для полного сопротивления  $\underline{Z}_*(f) = \underline{Z}(f)/R_0$  схемы замещения в безразмерном виде (величины обозначенные звездочкой «\*» безразмерны) при нормировке на единицу [12] в области низких частот:

$$\underline{Z}_*(f) = \frac{1}{1 + \frac{R_c}{R_0} + \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_M(f) \cdot R_0}}. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение безразмерные коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  и степенную функцию:

$$R_0/R_c = a_1; \quad (3)$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_M(f) \cdot R_0 = \frac{R_0}{X(f)} = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{a_2} \cdot a_3. \quad (4)$$

Здесь  $X$  – реактивное сопротивление (реактанс):

$$X(f) = [2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_M(f)]^{-1}; \quad (5)$$

$f_0$  – базовая частота, которую можно принять равной 1 Гц. Она введена потому, что возведение размерной величины  $f$  в иррациональную степень  $a_2$  не корректно. Обозначим отношение  $f/f_0$  безразмерной величиной  $f_*$ .

В результате запишем выражение для нормированного на единицу полного сопротивления схемы замещения Фрике (1) в виде аппроксимационной функции:

$$\underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3) = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{j \cdot f_*^{a_2} \cdot a_3}}}. \quad (6)$$

При такой форме записи получаем  $\underline{Z}_*(0, a_1, a_2, a_3) = 1$ ;  $\underline{Z}_*(\infty, a_1, a_2, a_3) = 1/(1 + a_1)$  при любых значениях  $a_i$ , где  $i$  – номер индекса при коэффициенте  $a$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Аппроксимационные безразмерные коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  будем находить по опытным данным.

Мы рассмотрели случай, когда в выражениях (1) – (4) сопротивления имеют размерность [Ом], а емкости – [Ф]. Если же опытные данные получены для удельных сопротивлений и емкостей с размерностью соответственно [Ом·м] и [Ф/м], то и элементы схемы замещения на рис. 3 будут удельными.

При анализе можно применять величины либо в [Ом] и [Ф], либо в [Ом·м] и [Ф/м], поскольку при использовании в выражении (2) удельных величин вместо абсолютных величины  $l$  и  $S$  сокращаются, и результат остается прежним.

При переходе в выражении (6) от безразмерных величин к размерным необходимо умножить  $\underline{Z}_*(f, a_1, a_2, a_3)$  на  $R_0$  при расчете абсолютных сопротивлений в [Ом], либо на  $R_{s,0}$  при расчете удельных сопротивлений в [Ом·м]. Величины  $R_0$  и  $R_{s,0}$  для получения минимальной погрешности должны определяться при частоте до 50 Гц.

Поясним выбор степенной функции  $(f/f_0)^{a_2} \cdot a_3$  в выражении (4) при определении отношения величин  $R_0/X(f)$ .

Поскольку комплексная относительная диэлектрическая проницаемость  $\underline{\epsilon}$  содержит так же и мнимую часть  $\epsilon''$ , ее модуль определяется из выражения:

$$|\underline{\epsilon}| = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2},$$

из чего следует, что всегда выполняется условие  $\epsilon' \leq |\underline{\epsilon}|$ . В связи с этим, значения  $\epsilon'(f)$ , которые могут определяться степенной функцией  $(f/f_0)^{a_2} \cdot a_3$  (в логарифмическом масштабе это прямая линия  $\epsilon'$  на рис. 2), должны лежать ниже значений кривой  $|\underline{\epsilon}|$ . В этом случае данной степенной функции соответствует выражение (4).

**Частотные зависимости импеданса биологических тканей.** В публикациях [6, 13] содержатся сведения по частотным зависимостям модуля импеданса  $|\underline{Z}_s|$ , активной и реактивной составляющим импеданса – удельного активного сопротивления  $R_s$  и удельного реактивного сопротивления  $X_s$  тканей растительного происхождения – яблока, моркови и картофеля в диапазоне частот от 25 Гц до 1 МГц. Частотные зависимости активного сопротивления  $R$  биологических тканей животного происхождения (крысы) – печени, сердца, почки, молочной железы и щитовидной железы в диапазоне частот от 0,5...1,5 кГц до 1,0...1,5 МГц приведены в работе [14].

На рис. 4 точками показаны экспериментальные значения удельных электрических сопротивлений яблока, моркови и картофеля от частоты [6, 13], линиями показаны аппроксимации, полученные с помощью функций lspline и interp пакета MathCAD, а на рис. 5 – экспериментальные значения активных электрических сопротивлений от частоты [14]: печени, сердца (вдоль волокон), почки, молочной железы, щитовидной железы.

**Минимизация среднеквадратичных отклонений для нахождения значений коэффициентов аппроксимации импеданса схемы замещения Фрике.** Для нахождения коэффициентов  $a_i$ , аппроксимационной функции полного сопротивления схемы замещения Фрике (6) воспользуемся функцией genfit пакета

MathCAD, реализующей численный метод Левенберга-Марквардта [15]. Для этой функции формируется вектор  $V(f, a_1, a_2, a_3)$  из уравнения (6) и уравнений его частных производных по искомым коэффициентам  $a_i$ .

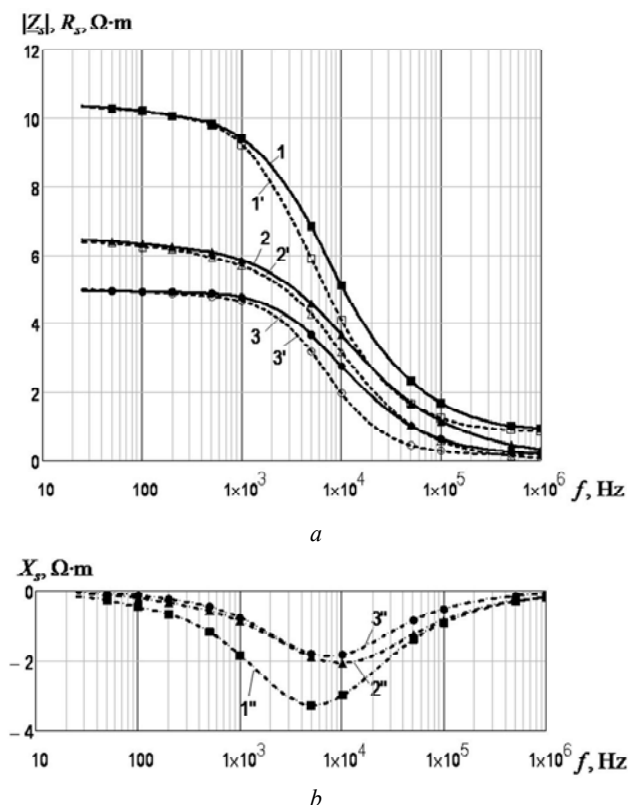


Рис. 4. Частотные зависимости экспериментальных значений электрических сопротивлений биологических тканей растительного происхождения [6, 13]: (а) – модуля полного удельного сопротивления  $|Z_s(f)|$  (цифры без штриха), активной  $R_s(f)$  (цифры со штрихом) и (б) – реактивной  $X_s(f)$  (цифры с двумя штрихами) – составляющих импеданса соответственно для тканей: 1, 1', 1'' – яблока, 2, 2', 2'' – моркови и 3, 3', 3'' – картофеля

При известных экспериментальных зависимостях сопротивлений:  $|Z_*| = |Z_s|/R_{s,0}$  или  $|Z_*| = |Z|/R_0$ ;  $R_* = R_s/R_{s,0}$  или  $R_* = R/R_0$ ;  $X_* = X_s/R_{s,0}$  или  $X_* = X/R_0$  от частоты  $f$  для биологической ткани, например для яблока, моркови или картофеля (рис. 4), можно составить векторы  $V_Z$ ,  $V_R$ , и  $V_X$  соответственно для модуля полного сопротивления, активной и реактивной составляющих полного сопротивления, см. приложение.

Зададим произвольный вектор значений частот при нормировании на единицу

$$f_{*n} = 10^n, \quad (7)$$

где  $n$  – индекс при частоте  $f_*$ , определяющий порядковый номер числа в векторе  $f_{*n}$ , например,  $n = 1 \dots 6$  (заметим, что чем больше членов в  $n$ , тем точнее будет аппроксимационная зависимость).

При задании некоторых начальных значений коэффициентам  $a_i$ , минимизация с использованием функции `genfit`, записываемой в виде:

$$\begin{aligned} a_{Z,i} &= \text{genfit}(f_*, |Z_*|, a_1, a_2, a_3, V_Z); \\ a_{R,i} &= \text{genfit}(f_*, R_*, a_1, a_2, a_3, V_R); \\ a_{X,i} &= \text{genfit}(f_*, X_*, a_1, a_2, a_3, V_X), \end{aligned}$$

происходит при определении значений коэффициентов  $a_{Z,i}$ ,  $a_{R,i}$  и  $a_{X,i}$ , наилучшим образом приближающих аппроксимационные кривые

$$\begin{aligned} |Z_*(f_*)| &= |Z_*(f_*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3})|; \\ R_*(f_*) &= \text{Re}[Z_*(f_*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})]; \\ X_*(f_*) &= \text{Im}[Z_*(f_*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3})] \end{aligned}$$

(с использованием формулы (6)) к соответствующим им опытным значениям, нормированным на единицу.

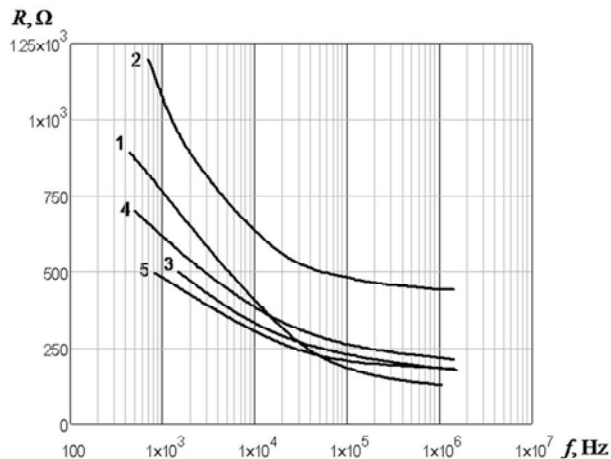


Рис. 5 Частотные зависимости экспериментальных значений активных электрических сопротивлений  $R(f)$  биологических тканей животного происхождения (крысы) [14]: 1 – печени; 2 – сердца (вдоль волокон); 3 – почки; 4 – молочной железы; 5 – щитовидной железы

Для биологических тканей растительного происхождения – яблока, моркови и картофеля [6, 13] на рис. 6, 8 и 10 построены опытные и расчетные значения частотных зависимостей модуля полного сопротивления  $|Z_*(f_*)|$  схемы замещения Фрике, активной  $R_*(f_*)$  и реактивной  $X_*(f_*)$  составляющих полного сопротивления. Для биологических тканей животного происхождения – печени, сердца, почки, молочной железы и щитовидной железы [14] на рис. 12 построены графики частотных зависимостей значений активных составляющих  $R_*(f_*)$  импеданса схемы замещения Фрике для тканей: 1 – печени; 2 – сердца (вдоль волокон); 3 – почки; 4 – молочной железы; 5 – щитовидной железы.

Из рассмотрения графиков видно, что расчетные кривые на всем своем протяжении совпадают с опытными значениями.

На рис. 7, 9 и 11 приведены графики частотных зависимостей относительных отклонений  $\Delta_Z$ ,  $\Delta_R$  и  $\Delta_X$  [%] расчетных значений величин соответственно  $|Z_*(f_*)|$ ,  $R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$  от их опытных значений для тканей растительного происхождения, а на рис. 13 графики частотных зависимостей относительных отклонений  $\Delta_R$  [%] расчетных значений величин  $R_*(f_*)$  от их опытных значений для тканей животного происхождения.

В диапазоне изменения частот, широко применяемых при анализе импеданса биологических тканей [3] в диапазоне  $f = 10^3 \dots 10^6$  Гц для яблока отклонения  $|\Delta|$  не превышают 1,9%, для моркови 2,3%, для картофеля –2,5%, для печени 3,0%, для сердца 1,8%, для почки –2,0%, для молочной железы 1,0%, для



щитовидной железы 1,5%. Это приемлемо для практических целей совпадение расчетных значений с опытными данными в указанном диапазоне частот.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов  $a_i$  и наибольшее отклонение  $|\Delta|$  расчетных значений  $|Z_*|$ ,  $R_*$  и  $X_*$  от их опытных значений в диапазоне частот  $f_* = 10^3 \dots 10^6$  для биологических тканей растительного происхождения: яблока, моркови и картофеля, а в табл. 2 даны значения коэффициентов  $a_i$  и наибольшее отклонение  $|\Delta|$  расчетных значений  $R_*$  от их опытных значений для биологических тканей животного происхождения: печени, сердца (вдоль волокон), почки, молочной железы и щитовидной железы. В табл. 3 приведены расчетные значения  $R_{s,0}$  и  $R_0$  для различных биологических тканей растительного и животного происхождения.

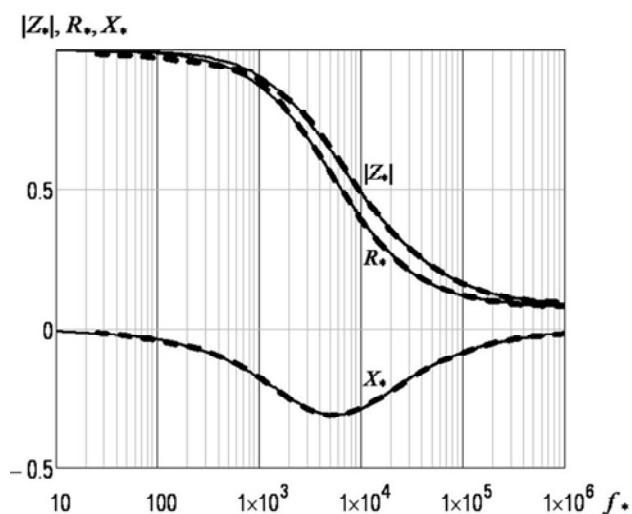


Рис. 6. Частотные зависимости значений модуля импеданса  $|Z_*(f_*)|$  схемы замещения Фрике, активной  $R_*(f_*)$  и реактивной  $X_*(f_*)$  составляющих импеданса для ткани яблока. Утолщенные пунктирные кривые – опытные значения [6, 13], тонкие сплошные кривые – расчетные значения

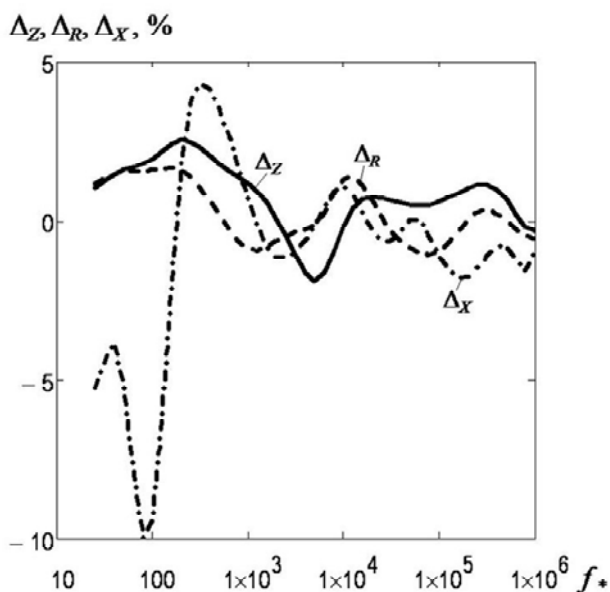


Рис. 7. Частотные зависимости относительных отклонений  $\Delta_Z, \Delta_R$  и  $\Delta_X$  расчетных значений величин соответственно  $|Z_*(f_*)|, R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$  от их опытных значений для ткани яблока

Для тканей растительного происхождения расчетные величины  $R_{s,0}$  были ориентировочно определены из графиков на рис. 4,а, интерполяцией опытных кривых  $R_s(f)$  от значений частоты 25 Гц до малых значений частот.

При полученных значениях  $R_{s,0}$  аппроксимационные кривые  $|Z_*(f_*)|, R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$  имеют небольшое отклонение от опытных кривых. Хотя здесь нужно понимать, что полученные значения  $R_{s,0}$  для тканей растительного происхождения могут несколько отклоняться от реальных значений  $R_{s,0}$  при малой частоте из-за эффекта двойного электрического слоя в приэлектродных областях. Так же возможно явление изменения сопротивления клеточных мембран при близком расположении клеток и затрудненном прохождении тока по межклеточному веществу из-за наличия слабо проводящих ток малых перемычек между касающихся друг друга клеточных мембран. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

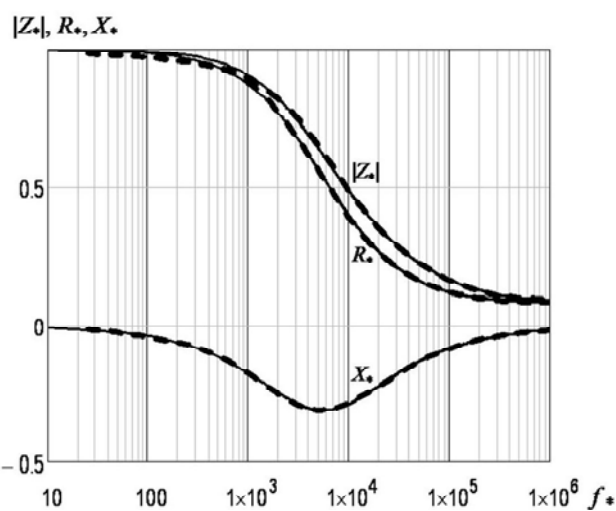


Рис. 8. Ткань моркови (обозначения соответствуют рис. 6)

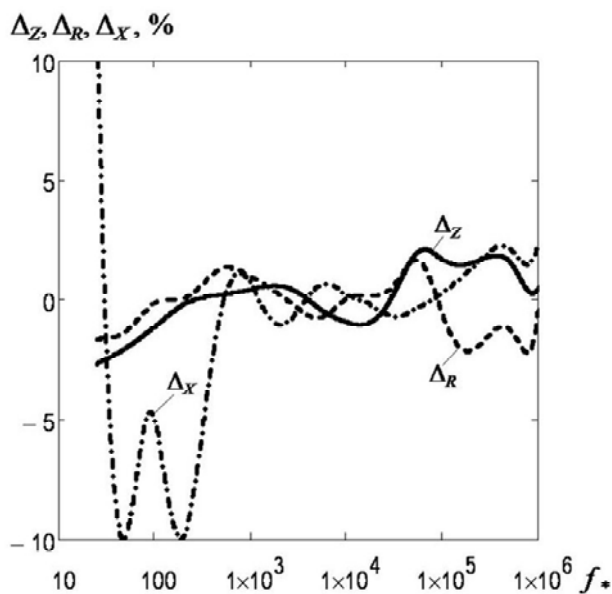


Рис. 9. Ткань моркови (обозначения соответствуют рис. 7)

При выборе расчетных значений  $R_0$  биологических тканей животного происхождения возникли трудности из-за того, что опытные значения кривых

на рис. 5 построены при минимальных значениях частот 0,5...1,5 кГц и здесь не было возможности корректно интерполировать зависимости  $R(f)$  к оси ординат для определения значений  $R$  при малых частотах. Поэтому расчетные значения  $R_0$  взяты весьма приближенно и такими, чтобы аппроксимационные кривые  $R_*(f)$  имели совпадение с опытными кривыми во всем диапазоне имеющихся опытных данных. Таким образом, расчетные значения  $R_0$  тканей животного происхождения в табл. 3 могут отличаться от реальных значений. Но при определении значений  $R(f)$  в диапазоне частот  $10^3 \dots 10^6$  Гц по полученным аппроксимационным зависимостям  $R_*(f)$  с учетом значений  $R_0$ , полученный результат совпадает с данными на рис. 4, что доказано полученными зависимостями  $\Delta_R$  на рис. 13.

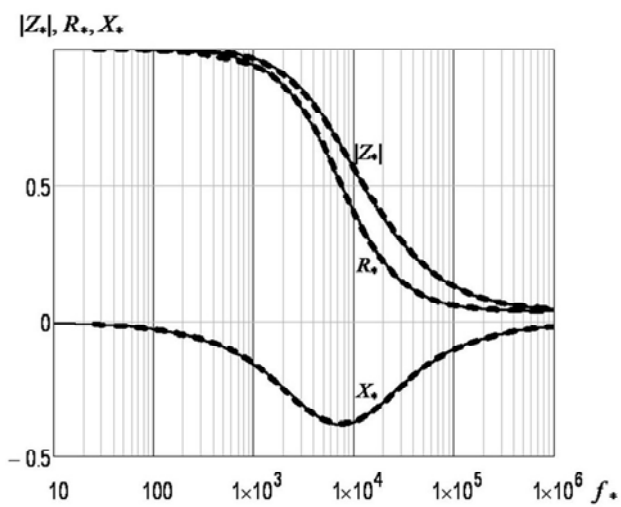


Рис. 10. Ткань картофеля (обозначения соответствуют рис. 6)

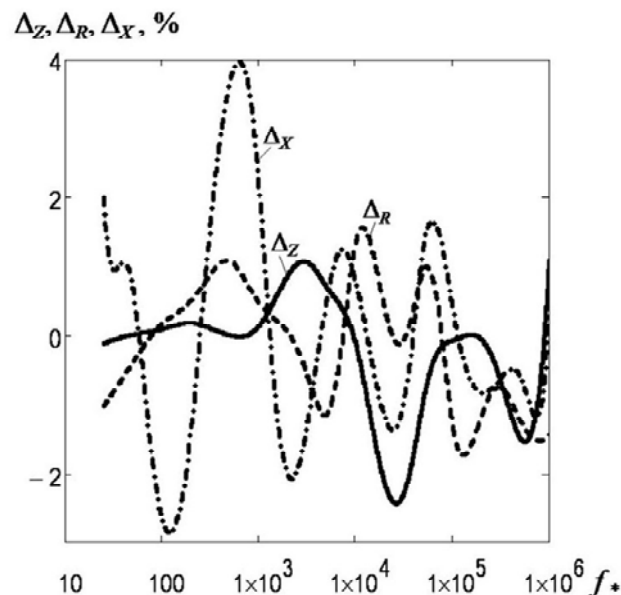


Рис. 11. Ткань картофеля (обозначения соответствуют рис. 7)

После нахождения неизвестных переменных  $a_i$ ,  $a_{R,i}$  и  $a_{X,i}$  можно определить значения полного удельного сопротивления схемы замещения Фрике, активных и реактивных составляющих полного удельного

сопротивления в абсолютных значениях в зависимости от частоты:

$$|Z_s(f)| = R_{s,0} \cdot |Z_*(f^*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3})|;$$

$$R_s(f) = R_{s,0} \cdot \text{Re}[Z_*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})];$$

$$X_s(f) = R_{s,0} \cdot \text{Im}[Z_*(f^*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3})],$$

а для тканей животного происхождения – активную составляющую импеданса:

$$R(f) = R_0 \cdot \text{Re}[Z_*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})].$$

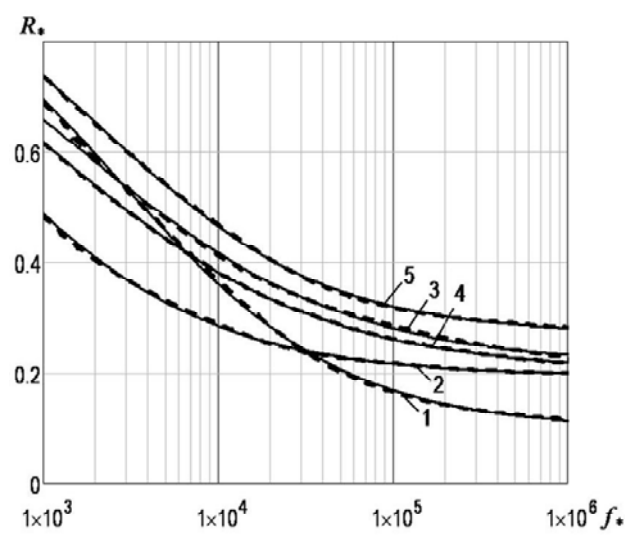


Рис. 12. Частотные зависимости значений активных составляющих  $R_*(f^*)$  импеданса  $Z_*(f^*)$  схемы замещения Фрике для тканей: 1 – печени; 2 – сердца (вдоль волокон); 3 – почки; 4 – молочной железы; 5 – щитовидной железы. Утолщенные пунктирные кривые – опытные значения [14], тонкие сплошные кривые – расчетные значения

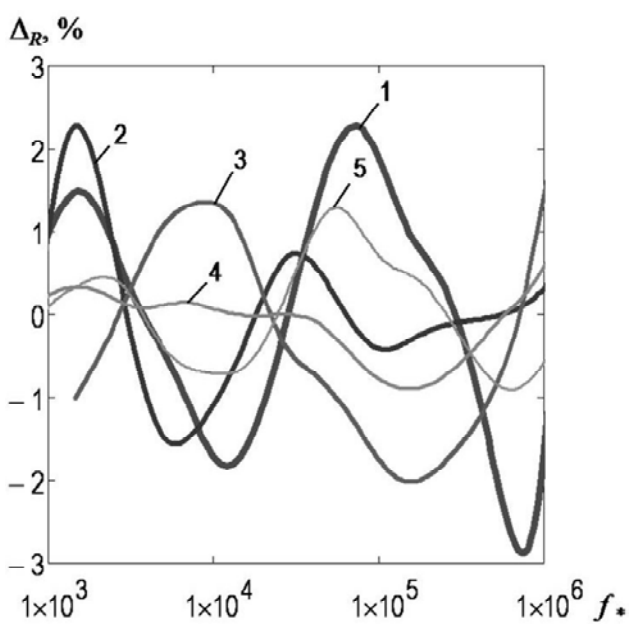


Рис. 13. Частотные зависимости относительных отклонений  $\Delta_R$  расчетных значений величин  $R_*(f^*)$  от их опытных значений для тканей: 1 – печени; 2 – сердца (вдоль волокон); 3 – почки; 4 – молочной железы; 5 – щитовидной железы

Имея пары зависимостей величин  $|Z_*(f^*)|$ ,  $R_*(f^*)$  или  $X_*(f^*)$ , можно определить третью величину по формулам:

$$|Z_*(f_*)| = \left\{ \left[ R_*(f_*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3}) \right]^2 + \left[ X_*(f_*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (8)$$

$$R_*(f_*) = \left\{ \left[ Z_*(f_*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3}) \right]^2 - \left[ X_*(f_*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (9)$$

$$X_*(f_*) = \left\{ \left[ Z_*(f_*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3}) \right]^2 - \left[ R_*(f_*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Таблица 1

Коэффициенты  $a_i$  и наибольшее отклонение  $|\Delta|$  расчетных значений  $|Z_*|$ ,  $R_*$  и  $X_*$  от их опытных значений в диапазоне частот  $f_* = 10^3 \dots 10^6$  для различных биологических тканей растительного происхождения

Коэффициенты для $ Z_* $				
Ткань	$a_{Z,1}$	$a_{Z,2}$	$a_{Z,3}$	$ \Delta , \%$
Яблоко	11,2	0,588	$7,413 \cdot 10^{-3}$	1,9
Морковь	444,0	0,570	$7,395 \cdot 10^{-3}$	2,1
Картофель	26,2	0,740	$1,556 \cdot 10^{-3}$	2,5
Коэффициенты для $R_*$				
Ткань	$a_{R,1}$	$a_{R,2}$	$a_{R,3}$	$ \Delta , \%$
Яблоко	11,7	0,536	$9,131 \cdot 10^{-3}$	1,4
Морковь	443,3	0,506	$9,369 \cdot 10^{-3}$	2,2
Картофель	28,1	0,710	$1,775 \cdot 10^{-3}$	1,7
Коэффициенты для $X_*$				
Ткань	$a_{X,1}$	$a_{X,2}$	$a_{X,3}$	$ \Delta , \%$
Яблоко	1,646	0,681	$1,748 \cdot 10^{-3}$	1,6
Морковь	1,911	0,665	$1,476 \cdot 10^{-3}$	2,3
Картофель	3,200	0,760	$8,684 \cdot 10^{-3}$	2,2

Таблица 2

Коэффициенты  $a_i$  и наибольшее отклонение  $\Delta$  расчетных значений  $R_*$  от их опытных значений в диапазоне частот  $f_* = 10^3 \dots 10^6$  для различных биологических тканей животного происхождения

Коэффициенты для $R_*$				
Ткань	$a_{R,1}$	$a_{R,2}$	$a_{R,3}$	$ \Delta , \%$
Печень	9,265	0,339	0,062	3,0
Сердце	4,084	0,330	0,109	1,8
Почки	3,679	0,286	0,095	2,0
Молочная железа	3,899	0,285	0,107	1,0
Щитовидная железа	2,701	0,344	0,051	1,5

Таблица 3

Расчетные значения  $R_0$  и  $R_{s,0}$  для различных биологических тканей растительного и животного происхождения

Ткань	
$R_{s,0}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	
Яблоко	10,50
Морковь	6,30
Картофель	4,95
$R_0, \text{Ом}$	
Печень	1100
Сердце	2200
Почки	800
Молочная железа	1000
Щитовидная железа	650

На рис. 14 при нормированных на единицу значений совместно построены аппроксимационные зависимости активных составляющих  $R_*$  полной сопротивлений схемы замещения Фрике для биологических тканей растительного [6, 13] и животного [14] происхождения от частоты  $f_*$ . Видно, что поведение кривых для тканей растительного и животного происхождения подобны.

Использование коэффициентов аппроксимации  $a_{Z,i}$ ,  $a_{R,i}$  или  $a_{X,i}$  в выражении импеданса схемы замещения Фрике для всех зависимостей  $|Z_*(f_*)|$ ,  $R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$ . Покажем, что использование коэффициентов аппроксимации  $a_{Z,i}$  для построения кривых  $R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$ , как и коэффициентов  $a_{R,i}$  для построения кривых  $|Z_*(f_*)|$  и  $X_*(f_*)$ , так и коэффициентов  $a_{X,i}$  для построения кривых  $|Z_*(f_*)|$  и  $R_*(f_*)$  не приводит к совпадению расчетных и опытных данных. Покажем это на примере коэффициентов аппроксимации  $a_{Z,i}$ ,  $a_{R,i}$  и  $a_{X,i}$  для яблока.

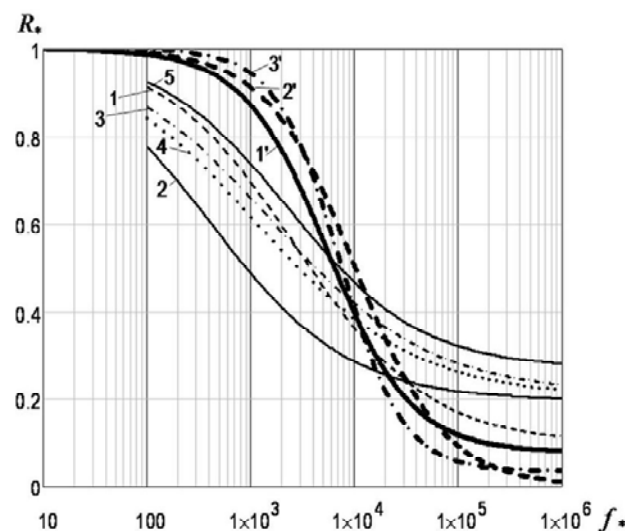


Рис. 14. Нормированные на единицу аппроксимационные частотные зависимости значений активных составляющих  $R_*(f_*)$  импеданса схемы замещения Фрике для биологических тканей растительного [6, 13] и животного [14] происхождения: 1 – печени; 2 – сердца (вдоль волокон); 3 – почки; 4 – молочной железы; 5 – щитовидной железы; 1' – яблока; 2' – моркови; 3' – картофеля

Воспользуемся формулой (6). Возьмем значения  $a_{Z,i}$  из табл. 1 для яблока. На рис. 15 тонкими сплошными линиями построим зависимости

$$\begin{aligned} |Z_*(f_*)| &= |Z_*(f_*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3})|; \\ R_*(f_*) &= \text{Re}[Z_*(f_*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3})]; \\ X_*(f_*) &= \text{Im}[Z_*(f_*, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3})], \end{aligned}$$

а утолщенными пунктирными линиями – их опытные значения  $|Z_*(f_*)|$ ,  $R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$ . Посмотрим, как полученные кривые соотносятся с опытными данными.

Видно, что кривые  $|Z_*(f_*)|$  и  $|Z_*(f_*)|$  практически совпали, так как коэффициенты аппроксимации  $a_{Z,i}$  были рассчитаны именно по опытным значениям этой кривой. Кривые зависимости  $R_*(f_*)$  ложатся ниже опытных значений  $R_*(f_*)$ , как и кривые зависимостей  $X_*(f_*)$  от опытных значений  $X_*(f_*)$ .

Возьмем теперь значения  $a_{R,i}$  для яблока и так же подставим их в формулу (6). На рис. 15 тонкими пунктирными линиями построим зависимости:

$$\begin{aligned} |Z_{R^*}(f^*)| &= |Z^*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})|; \\ R_{R^*}(f^*) &= \text{Re}[Z^*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})]; \\ X_{R^*}(f^*) &= \text{Im}[Z^*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})]. \end{aligned}$$

В этом случае кривая  $R_{R^*}(f^*)$  совпала с кривой  $R^*(f^*)$ , кривая  $|Z_{R^*}(f^*)|$  прошла выше кривой с опытными значениями  $|Z^*(f^*)|$ , а кривая  $X_{R^*}(f^*)$  прошла ниже кривой с опытными значениями  $X^*(f^*)$ .

Если взять значения  $a_{X,i}$  для яблока, то на рис. 15 тонкими штрихпунктирными линиями можно построить зависимости

$$\begin{aligned} |Z_{X^*}(f^*)| &= |Z^*(f^*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3})|; \\ R_{X^*}(f^*) &= \text{Re}[Z^*(f^*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3})]; \\ X_{X^*}(f^*) &= \text{Im}[Z^*(f^*, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3})]. \end{aligned}$$

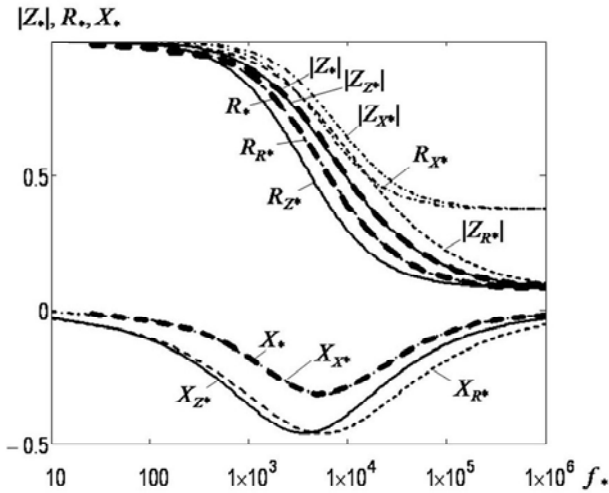


Рис. 15. Частотные зависимости значений модуля импеданса  $|Z^*|$  схемы замещения Фрике, активной  $R^*$  и реактивной  $X^*$  составляющих импеданса для ткани яблока. Утолщенные пунктирные кривые – опытные значения  $|Z^*|$ ,  $R^*$  и  $X^*$ ; тонкие сплошные кривые – расчетные значения при коэффициентах  $a_{Z,i}$  – кривые  $|Z_{Z^*}|$ ,  $R_{Z^*}$  и  $X_{Z^*}$ ; тонкие пунктирные кривые – расчетные значения при коэффициентах  $a_{R,i}$  – кривые  $|Z_{R^*}|$ ,  $R_{R^*}$  и  $X_{R^*}$ ; тонкие штрихпунктирные кривые – расчетные значения при коэффициентах  $a_{X,i}$  – кривые  $|Z_{X^*}|$ ,  $R_{X^*}$  и  $X_{X^*}$ .

Кривая  $X_{X^*}(f^*)$  совпала с кривой  $X^*(f^*)$ , кривые  $|Z_{X^*}(f^*)|$  и  $R_{X^*}(f^*)$ , особенно при высоких частотах, прошли существенно выше соответствующих кривых опытных значений  $|Z^*(f^*)|$  и  $R^*(f^*)$ .

Таким образом, коэффициенты  $a_{Z,i}$ ,  $a_{R,i}$  и  $a_{X,i}$  можно использовать только для аппроксимации соответствующих им кривым  $|Z^*(f^*)|$ ,  $R^*(f^*)$  и  $X^*(f^*)$ , по значениям которых они были получены и для которых расчетные кривые совпадают с опытными кривыми.

Значит, имея значения коэффициентов аппроксимации  $a_{R,i}$  в выражении импеданса схемы замещения Фрике (6) для опытных зависимостей

$$R^*(f^*) = \text{Re}[Z^*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})]$$

тканей животного происхождения [14], см. табл. 2, нельзя получить зависимости

$$\begin{aligned} |Z^*(f^*)| &= |Z^*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})|; \\ X^*(f^*) &= \text{Im}[Z^*(f^*, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})]. \end{aligned}$$

Это основной недостаток схемы замещения Фрике.

**Нахождение общих коэффициентов  $a_i$  в выражении импеданса схемы замещения Фрике для всех зависимостей  $|Z^*(f^*)|$ ,  $R^*(f^*)$  и  $X^*(f^*)$ .** Проверим возможность нахождения коэффициентов  $a_i$  в выра-

жении полного комплексного сопротивления (6) схемы замещения Фрике, которые удовлетворяли бы одновременно всем зависимостям  $|Z^*(f^*)|$ ,  $R^*(f^*)$  и  $X^*(f^*)$  для каждой конкретной ткани. В этом случае по одной зависимости  $|Z^*(f^*)| = |Z^*(f^*, a_1, a_2, a_3)|$  можно было бы получать зависимости  $R^*(f^*) = \text{Re}[Z^*(f^*, a_1, a_2, a_3)]$  и  $X^*(f^*) = \text{Im}[Z^*(f^*, a_1, a_2, a_3)]$ . Для этого используем минимизацию среднеквадратичных отклонений функции  $F(a_1, a_2, a_3)$ , записываемой в виде:

$$\begin{aligned} F(a_1, a_2, a_3) &= \\ &= \sum_n \left\{ \left| |Z^*(f_n, a_1, a_2, a_3)| - |Z^*(f_n, a_{Z,1}, a_{Z,2}, a_{Z,3})| \right|^2 + \right. \\ &+ \sum_n \left\{ \text{Re}[Z^*(f_n, a_1, a_2, a_3)] - \right. \\ &- \text{Re}[Z^*(f_n, a_{R,1}, a_{R,2}, a_{R,3})] \left. \right\}^2 + \\ &+ \sum_n \left\{ \text{Im}[Z^*(f_n, a_1, a_2, a_3)] - \right. \\ &- \text{Im}[Z^*(f_n, a_{X,1}, a_{X,2}, a_{X,3})] \left. \right\}^2, \end{aligned} \quad (11)$$

здесь значения вектора  $f_n^*$  задаются из выражения (7), а величины  $a_{Z,i}$ ,  $a_{R,i}$ ,  $a_{X,i}$  – из табл. 1.

Минимизация функции  $F(a_i) \rightarrow \min$  может осуществляться численным методом сопряженных градиентов [15] относительно переменных  $a_i$  (в пакете MathCAD – это функция Minimize) при некоторых стартовых значениях переменных  $a_i$ .

В качестве примера возьмем яблоко. В результате минимизации получены коэффициенты:  $a_1 = 6,91$ ;  $a_2 = 0,784$ ;  $a_3 = 1,144 \cdot 10^{-3}$ . На основе этих коэффициентов на рис. 16 построим сплошными линиями кривые расчетных зависимостей величин

$$\begin{aligned} |Z^*(f^*)| &= |Z^*(f^*, a_1, a_2, a_3)|; \\ R^*(f^*) &= \text{Re}[Z^*(f^*, a_1, a_2, a_3)]; \\ X^*(f^*) &= \text{Im}[Z^*(f^*, a_1, a_2, a_3)]. \end{aligned}$$

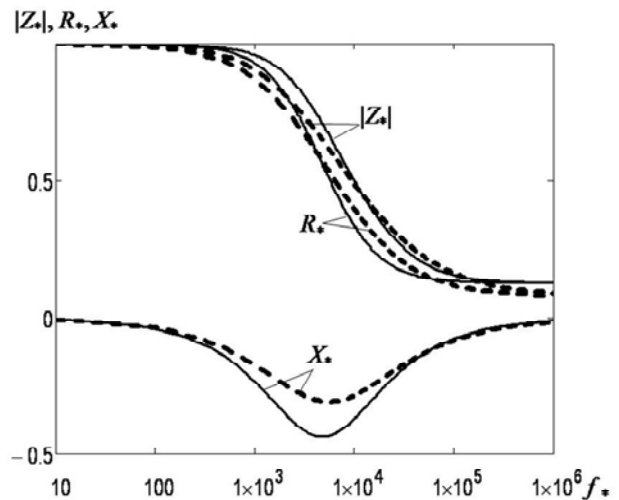


Рис. 16. Частотные зависимости значений модуля импеданса  $|Z^*|$  схемы замещения Фрике, активной  $R^*$  и реактивной  $X^*$  составляющих импеданса для ткани яблока. Пунктирные кривые – опытные значения, сплошные кривые – расчетные значения

Видно, что все эти кривые расходятся с соответствующими им опытными кривыми, показанными на рисунке пунктирными линиями.

Это показывает, что для схемы замещения Фрике нет общих значений коэффициентов аппроксимации  $a_i$ , которые бы удовлетворяли одновременно всем кривым  $|\underline{Z}_*(f_*)|$ ,  $R_*(f_*) = \text{Re}[\underline{Z}_*(f_*)]$  и  $X_*(f_*) = \text{Im}[\underline{Z}_*(f_*)]$  для каждой конкретной биологической ткани.

Поэтому, для аппроксимации кривых  $|\underline{Z}_*(f_*)|$ ,  $\text{Re}[\underline{Z}_*(f_*)]$  и  $\text{Im}[\underline{Z}_*(f_*)]$  необходимо использовать только соответствующие им коэффициенты  $a_{Z,i}$ ,  $a_{R,i}$  и  $a_{X,i}$ , при которых значения расчетных и опытных данных совпадают. Это является следствием того, что схема Фрике не отражает всех свойств биологических тканей.

Поэтому следующий этап исследований должен быть посвящен модернизации схемы замещения Фрике с вводом в схему элементов, учитывающих влияние клеточных мембран и диэлектрических потерь в клеточных мембранах (тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ) для возможности получения общих значений коэффициентов аппроксимации  $a_i$ , которые бы удовлетворяли одновременно всем кривым  $|\underline{Z}_*(f_*)|$ ,  $R_*(f_*)$  и  $X_*(f_*)$  для каждой конкретной биологической ткани.

Разработанная методика позволяет моделировать процессы, происходящие в биологических тканях при прохождении через них тока разной частоты, а так же с большей эффективностью разрабатывать диагностическую и контрольно-измерительную аппаратуру для определения электрических свойств ткани растительного и животного происхождения, в том числе разрабатывать более эффективную медицинскую аппаратуру. Зависимости  $R_*(f_*)$  смогут применяться в расчетах тепловых процессов, происходящих при сварке живых тканей животного происхождения специальными медицинскими сварочными источниками питания.

**Приложение.** Векторы  $V_Z$ ,  $V_R$  и  $V_X$  для модуля полного сопротивления, активной и реактивной составляющих полного сопротивления имеют вид:

$$\begin{aligned} V_Z(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \\ &= \left\| \left| \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3) \right|, \left| \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_1} \right|, \right. \\ &\quad \left. \left| \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_2} \right|, \left| \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_3} \right| \right\|^T; \\ V_R(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \\ &= \left\| \text{Re}[\underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)], \text{Re} \left[ \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_1} \right], \right. \\ &\quad \left. \text{Re} \left[ \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_2} \right], \text{Re} \left[ \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_3} \right] \right\|^T; \\ V_X(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \\ &= \left\| \text{Im}[\underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)], \text{Im} \left[ \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_1} \right], \right. \\ &\quad \left. \text{Im} \left[ \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_2} \right], \text{Im} \left[ \frac{\partial \underline{Z}_*(f_*, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_3} \right] \right\|^T, \end{aligned}$$

здесь  $\partial$  – знак дифференциала;  $T$  – символ транспонирования вектора.

Преобразовывая правые части векторов, с учетом формулы (6), получим выражения для определения коэффициентов  $a_i$  по векторам  $V_Z$ ,  $V_R$ , и  $V_X$ , записанных в явном виде:

$$\begin{aligned} V_Z(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \\ &= \left\| \frac{\sqrt{\left[ a_1^2 + (1+a_1) \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2 \right]^2 + (a_1^2 \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2})^2}}{F(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\left\{ (1+3 \cdot a_1 + 3 \cdot a_1^2 + a_1^3) \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^4 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - a_1^3 \cdot \left[ (1+a_1) \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2 - a_1 \right] \right\} \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3) \cdot \sqrt{F_2(f_*, a_1, a_2, a_3)}}, \right. \\ &\quad \frac{(2+a_1) \cdot a_1^3 \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2 \cdot \ln(f_*)}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3) \cdot \sqrt{F_2(f_*, a_1, a_2, a_3)}}, \\ &\quad \left. - \frac{(2+a_1) \cdot a_1^3 \cdot a_3 \cdot f_*^{2 \cdot a_2}}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)} \right\|^T; \\ V_R(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \left\| \frac{a_1^2 + (1+a_1) \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2}{F_1(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\left\{ \left[ (1+a_1) \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2} \right]^2 - a_1^2 \right\} \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \right. \\ &\quad \frac{2 \cdot (1+a_1) \cdot a_1^3 \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2 \cdot \ln(f_*)}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \\ &\quad \left. - \frac{2 \cdot (1+a_1) \cdot a_1^3 \cdot a_3 \cdot f_*^{2 \cdot a_2}}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)} \right\|^T; \\ V_X(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \left\| - \frac{a_1^2 \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2}}{F_1(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \right. \\ &\quad \frac{2 \cdot a_1 \cdot (1+a_1) \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^3}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \\ &\quad \frac{a_1^2 \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2} \cdot \left\{ a_1^2 - \left[ (1+a_1) \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2} \right]^2 \right\} \cdot \ln(f_*)}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)}, \\ &\quad \left. - \frac{a_1^2 \cdot f_*^{a_2} \cdot \left\{ a_1^2 - \left[ (1+a_1) \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2} \right]^2 \right\}}{F_1^2(f_*, a_1, a_2, a_3)} \right\|^T, \end{aligned}$$

где функции

$$\begin{aligned} F_1(f_*, a_1, a_2, a_3) &= a_1^2 + \left[ (1+a_1) \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2} \right]^2; \\ F_2(f_*, a_1, a_2, a_3) &= \left[ a_1^2 + (1+a_1) \cdot (a_3 \cdot f_*^{a_2})^2 \right]^2 + \\ &\quad + (a_1^2 \cdot a_3 \cdot f_*^{a_2})^2. \end{aligned}$$

В ряде случаев выражения, записанные в явном виде, бывают более удобны в использовании.

## Выводы.

Электрическая схема замещения Фрике позволяет моделировать зависимости модуля импеданса биологических тканей, активную и реактивную составляющие импеданса с приемлемой для практических целей точностью в диапазоне частот от  $10^3$  до  $10^6$  Гц.

Выражение полного сопротивления схемы замещения Фрике для биологических тканей позволяет аппроксимировать частотные зависимости модуля полного сопротивления, активную и реактивную составляющие полного сопротивления только при использовании коэффициентов аппроксимаций, соответствующих каждой составляющей.

Созданная методика обработки экспериментальных данных при моделировании дисперсии импеданса биологических тканей с помощью схемы замещения Фрике для биологических тканей позволяет с высокой точностью определять эти значения.

Разработанная методика оперирует с нормированными на единицу значениями модуля полного сопротивления схемы замещения Фрике, активной и реактивной составляющими полного сопротивления в зависимости от частоты, что позволяет производить сравнительный анализ параметров различных биологических тканей растительного и животного происхождения.

Показано, что частотные зависимости активной составляющей полного сопротивления для тканей растительного и животного происхождения подобны.

Коэффициенты аппроксимации в уравнении полного сопротивления можно использовать только для аппроксимации соответствующих им кривым импеданса, резистанса и реактанса, по значениям которых они были получены, что является основной недостатком схемы замещения Фрике.

Для схемы замещения Фрике не существует общих значений коэффициентов аппроксимации, которые бы соответствовали одновременно трем зависимостям – модулю импеданса, активной и реактивной составляющим импеданса. Поэтому схема замещения Фрике не полностью отражает все характеристики биологических тканей и нуждается в модернизации.

Зависимости импеданса биологической ткани могут применяться при проектировании диагностической и контрольно-измерительной аппаратуры для определения свойств тканей животного и растительного происхождения. Также они будут востребованы при создании медицинской аппаратуры для сварки живых тканей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paton B.E., Krivtsov I.V., Marinsky G.S., Khudetsky I.Yu., Lankin Yu.N., Chernets A.V. Welding, cutting and heat treatment of live tissues // *The Paton welding journal*. – 2013. – no.10-11. – pp. 142-153.
2. Fricke H. The electric resistance and capacity of blood for frequencies between 800 and 4½ million cycles // *The Journal of General Physiology*. – 1925. – vol.9. – no.2. – pp. 153-167. doi: 10.1085/jgp.9.2.153.
3. Калакутский Л.И., Акулов С.А., Федотов А.А. Основы импульсной импедансометрии биологических тканей: электрон. учеб. пособие; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2011. – 94 с. – Режим доступа <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Osnovy-impulsnoi-impedansometrii-biologicheskikh-tkanei-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54991>.
4. Кирьянов Д.В. *MathCAD 14*. – С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
5. Самойлов В.О. *Медицинская биофизика: Учебник*. – С.-Пб.: СпецЛит, 2004. – 496 с.
6. Голев И.М., Коротков Л.Н. Дисперсия электрического сопротивления биологических объектов растительного происхождения // *Вестник воронежского государственного технического университета*. – 2013. – Т.9. – №4. – С. 26-29.
7. Антропов Е.И. *Теоретическая электрохимия. Учебник для химико-технологических специальностей вузов*. – М.: Высшая школа, 1975. – 560 с.
8. Laufer S., Ivorra A., Reuter V.E., Rubinsky B., Solomon S.B. Electrical impedance characterization of normal and cancerous human hepatic tissue // *Physiological Measurement*. – 2010. – vol.31. – iss.7. – pp. 995-1009. – doi: 10.1088/0967-3334/31/7/009.
9. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. *Теоретические основы электротехники: в 2 т.*: М.-Л.: Энергия, 1966. – Т.2, Ч. 3, 4: Теория нелинейных электрических и магнитных цепей. Теория электромагнитного поля. – 407 с.
10. Привалов Е.Е. *Электротехническое материаловедение: учебное пособие*. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 234 с.
11. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники*. – М.: Высшая школа, 1964. – 750 с.
12. Толстов Ю.Г. *Теория линейных электрических цепей*. – М.: Высшая школа, 1978. – 279 с.
13. Голев И.М., Бобкина Е.Ю. Температурная зависимость электрического импеданса паренхимных тканей овощей // *Теоретические и практические аспекты естественных и математических наук: Материалы международной заочной научно-практической конференции (24 декабря 2012 г.)*. – Новосибирск: СибАК, 2012. – С. 103-108. – Режим доступа <http://sibac.info/conf/naturscience/i/30882>.
14. Белик Д.В. *Импедансная электрохирургия*. – Новосибирск: Наука, 2000. – 237 с.
15. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. *Практическая оптимизация: пер. с англ.* – М.: Мир, 1985. – 509 с.

## REFERENCES

1. Paton B.E., Krivtsov I.V., Marinsky G.S., Khudetsky I.Yu., Lankin Yu.N., Chernets A.V. Welding, cutting and heat treatment of live tissues. *The Paton welding journal*, 2013, no.10-11, pp. 142-153.
2. Fricke H. The electric resistance and capacity of blood for frequencies between 800 and 4½ million cycles. *The Journal of General Physiology*, 1925, vol.9, no.2, pp. 153-167. doi: 10.1085/jgp.9.2.153.
3. Kalakutskii L.I., Akulov S.A., Fedotov A.A. *Fundamentals of impulse impedance of biological tissues: an electronic textbook*. Minobronauki Russia, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev (National Research University). Samara, 2011. 94 p. Available at: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-posobiya/Osnovy-impulsnoi-impedansometrii-biologicheskikh-tkanei-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54991>. (Rus).
4. Kiryanov D.V. *MathCAD 14* [MathCAD 14]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2007. 704 p. (Rus).
5. Samoilov V.O. *Meditsinskaia biofizika: Uchebnik* [Medical Biophysics: Textbook]. St. Petersburg, SpetsLit Publ., 2004. 496 p. (Rus).
6. Golev I.M., Korotkov L.N. Dispersion of the electrical resistance of biological objects plant origin. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2013, vol.9, no.4, pp. 26-29. (Rus).
7. Antropov E.I. *Teoreticheskaiia elektrokhemiiia. Uchebnik dlia khimiko-tekhnologicheskikh spetsial'nostei vuzov*

[Theoretical electrochemistry. Textbook for high schools chemical technology specialties]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 560 p. (Rus).

8. Laufer S., Ivorra A., Reuter V.E., Rubinsky B., Solomon S.B. Electrical impedance characterization of normal and cancerous human hepatic tissue. *Physiological Measurement*, 2010, vol.31, iss.7, pp. 995-1009. – doi: 10.1088/0967-3334/31/7/009.

9. Neiman L.R., Demirchian K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V 2 t., T.2, Ch. 3, 4. Teoriia nelineinykh elektricheskikh i magnitnykh tsepei. Teoriia elektromagnitnogo polia* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 vols. Vol. 2, part 3, 4. Theory of nonlinear electric and magnetic circuits. Theory of electromagnetic field]. Moscow-Leningrad, Energiia Publ., 1966. 407 p. (Rus).

10. Privalov E.E. *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie: uchebnoe posobie* [Electrotechnical materials science: Tutorial]. Moscow-Berlin: Direkt-Media Publ., 2015. 234 p. (Rus).

11. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1964. 750 p. (Rus).

12. Tolstov Iu.G. *Teoriia lineinykh elektricheskikh tsepei* [Theory of linear electric circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 279 p. (Rus).

13. Golev I.M., Bobkina E.Iu. The temperature dependence of the electrical impedance of the parenchymal tissue of vegetables. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty estestvennykh i matematicheskikh nauk: Materialy mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Theoretical and practical aspects of the natural and mathematical sciences: Proceedings of the International correspondence scientific-practical conference]. Novosibirsk, 24 December 2012, SibAK Publ., 2012, pp. 103-108. (Rus). Available at: <http://sibac.info/conf/natur-science/i/30882>. (Rus).

14. Belik D.V. *Impedansnaia elektrokhirurgiiia* [Impedance electrosurgery]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 237 p. (Rus).

15. Gill Ph., Murray W., Wright M. *Prakticheskaiia optimizatsiia* [Practical Optimization]. Moscow, Mir Publ., 1985. 509 p. (Rus).

Поступила (received) 20.08.2017

Кривцун Игорь Витальевич<sup>1</sup>, академик НАН Украины, д.т.н., проф.,

Пентегов Игорь Владимирович<sup>1</sup>, д.т.н., проф., в.н.с.,

Сидорец Владимир Николаевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф., в.н.с.,

Рымар Сергей Владимирович<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с.

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11, тел/phone +380 44 2061388, e-mail: elmag@paton.kiev.ua

I.V. Krivtsun<sup>1</sup>, I.V. Pentegov<sup>1</sup>, V.M. Sydorets<sup>1</sup>, S.V. Rymar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,

11, Kazymyr Malevych Str., Kiev, 03680, Ukraine.

**A technique for experimental data processing at modeling the dispersion of the biological tissue impedance using the Fricke equivalent circuit.**

**Purpose.** Modeling the dispersion of the biological tissue impedance of vegetable and animal origin using the Fricke equivalent circuit; development of a technique for experimental data processing to determine the approximation coefficients of the dispersion of the biological tissue impedance for this equivalent circuit; study of the features of the equivalent circuit at modeling the dispersion of the impedance, resistance, and reactance; the definition of the frequency domain in which using of the equivalent circuit is correct; revealing and generalization of the main regularities of dissipation of biological tissue impedance of vegetable and animal origin.

**Methodology.** The technique is based on the scientific provisions of theoretical electrical engineering – the theory of the electromagnetic field in nonlinear media in modeling the dispersion of the biological tissue impedance. **Results.** The electric circuit of the Fricke equivalent circuit allows modeling the dependences of the impedance module of biological tissues, active and reactive components of impedance with acceptable accuracy for practical purposes in the frequency domain from  $10^3$  to  $10^6$  Hz. The equation of impedance of the Fricke equivalent circuit for biological tissues makes it possible to approximate the frequency dependences of the impedance modulus, active and reactive parts of the total resistance only by using the approximation coefficients corresponding to each part. The developed method for determining the values of the approximation coefficients of the impedance equation for the Fricke equivalent circuit for biological tissues allows to determine these values with high accuracy for various biological tissues. It is shown that the frequency dependences of the active component of the total resistance for tissues of vegetable and animal origin are similar. **Originality.** The developed technique operates with the normalized values of the impedance modulus of the Fricke equivalent circuit, the active and reactive components of the impedance as a function of frequency, which allows a comparative analysis of the dependencies of these parameters of various biological tissues of plant and animal origin. **Practical value.** The approximate dependences of the absolute impedance modulus, active and reactive components of the impedance allow modeling processes occurring in biological tissues with the passage of a current of different frequency. Dependence of the impedance of biological tissue can be applied to the design of diagnostic and control equipment to determine the properties of tissues of animal and vegetable origin, including developing more effective medical equipment. References 15, tables 3, figures 16.

**Key words:** biological tissue, electrical properties, simulation, impedance dispersion, Fricke substitution scheme, technique, approximation coefficients.

В.М. Михайлов, К.В. Чунихин

## ОБ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОЙ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ

*Зроблено аналіз застосування електростатичної аналогії у магнетостатиці неоднорідних намагнетованих середовищ на основі дипольної моделі та моделі намагнетчування молекулярними струмами. Показано, що коректним є застосування дипольної моделі намагнетчування. Отримано співвідношення між намагнетченостями для різних моделей, котре пояснює використання в електростатичній аналогії намагнетченості молекулярними струмами.* Бібл. 5, табл. 1.

*Ключові слова:* магнетостатика, намагнетоване середовище, електростатична аналогія, дипольна модель, молекулярний струм намагнетчування, намагнетченість.

*Сделан анализ применения электростатической аналогии в магнетостатике неоднородных намагничивающихся сред на основе дипольной модели и модели намагничивания молекулярными токами. Показано, что корректным является использование дипольной модели намагничивания. Получено соотношение между намагниченностями для различных моделей, поясняющее применение в электростатической аналогии намагниченности молекулярными токами.* Библ. 5, табл. 1.

*Ключевые слова:* магнетостатика, намагничивающаяся среда, электростатическая аналогия, дипольная модель, молекулярный ток намагничивания, намагниченность.

**Введение.** Использование фиктивных магнитных зарядов для расчета магнитостатических полей в намагничивающихся средах связано с развитием представлений о природе магнитных явлений и основано на электростатической аналогии поляризации диэлектриков и магнетиков [1]. В основе этой аналогии лежит образование магнитных диполей, подобных электрическим диполям, но состоящих из двух точечных фиктивных магнитных зарядов (в дальнейшем – дипольная модель намагничивания). Электростатическую аналогию использовали, в частности, Г.А. Гринберг [2] и К. Шимони [3].

Впоследствии оказалось, что намагничивание происходит благодаря протеканию внутри магнетиков молекулярных (микроскопических) токов (такую модель в дальнейшем будем называть моделью намагничивания молекулярными токами), а электростатическая аналогия далека от природы магнетизма [1, 4]. Несмотря на формальный характер электростатическая аналогия при корректном использовании весьма эффективна [1-4].

Различным моделям намагничивания поставим в соответствие различные намагниченности:  $\vec{J}^e$  – намагниченность диполями;  $\vec{J}$  – намагниченность молекулярными токами. В некоторых книгах и статьях авторы описывают магнитостатическое поле намагничиваемых тел при помощи скалярного потенциала  $\varphi_m$ , что соответствует дипольной модели, а в формулах для определения  $\varphi_m$  используют намагниченность  $\vec{J}$ . Возможной причиной этого является предложенная в учебнике [1] аналогия между поляризованностью диэлектрика  $\vec{P}$  и  $\mu_0 \vec{J}$  ( $\mu_0$  – магнитная постоянная), но последнее требует теоретического обоснования.

Актуальность данной работы состоит в том, что применение электростатической аналогии для постановки и тестирования численных алгоритмов решения задач магнетостатики намагничиваемых тел приводит к затруднениям, связанным с недостаточно четким изложением в известных публикациях.

**Целью** данной работы является анализ правильности применения в электростатической аналогии магнетостатики неоднородных намагничивающихся сред двух известных моделей намагничивания.

**Основные уравнения и формулы электростатической аналогии.** Рассматриваем электростатическое и магнитостатическое поле в неподвижной изотропной неоднородной поляризуемой среде. Основные уравнения этих полей и формулы представлены в табл. 1 [1-4]. Величинами-аналогами в случае дипольной модели намагничивания являются:  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ,  $\vec{D}$  и  $\vec{B}$  – напряженности, а также индукции электрического и магнитного поля;  $\vec{P}$  и  $\vec{J}^e$ ;  $\rho_e$  и  $\rho_m$  – объемные плотности поляризационных электрических и фиктивных магнитных зарядов;  $\rho_e^{st}$  и  $\rho_m^{st}$  – объемные плотности сторонних [2] электрических и фиктивных магнитных зарядов;  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$ ,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\vec{p}$  и  $\vec{p}_{me}$  – моменты электрического и магнитного диполей;  $\pm q$  и  $\pm m$  – точечные электрические и фиктивные магнитные заряды, расположенные в диполях на расстоянии  $l$ . В формулах для определения  $\vec{P}$  и  $\vec{J}^e$  величина  $\Delta V$  – достаточно малый объем поляризуемой среды, по которому усредняются суммы соответствующих дипольных моментов. Поле магнитных диполей является потенциальным, его скалярный потенциал  $\varphi_m$  аналогичен потенциалу электростатического поля  $\varphi$ . Следствием формальности рассматриваемой аналогии есть то, что индукция  $\vec{B}$  становится вспомогательным вектором. В формулах для расчета  $\varphi_m$  и  $\varphi$  приняты такие обозначения: в случае диполей, распределенных в объеме  $V$ , величина  $dV_M$  – элементарный объем с центром в точке  $M \in V$ ; в случае поверхностных фиктивных магнитных зарядов, распределенных на граничной поверхности  $S$ , величина  $dS_M$  – элементарная площадка с центром в точке  $M \in S$ ;  $r_{MQ}$  – расстояние между точкой с текущими координатами  $M$  и точкой наблюдения  $Q$ .

© В.М. Михайлов, К.В. Чунихин



Основные уравнения и формулы для расчета аналогичных полей

Электростатическое поле	Магнитостатическое поле (дипольная модель намагничивания)
$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho_e}{\varepsilon_0} + \frac{\rho_e^{st}}{\varepsilon_0}$	$\operatorname{div} \vec{H} = \frac{\rho_m}{\mu_0} + \frac{\rho_m^{st}}{\mu_0}$
$\operatorname{div} \vec{P} = -\rho_e$	$\operatorname{div} \vec{J}^e = -\rho_m$
$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$	$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}^e$
$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_e^{st}$	$\operatorname{div} \vec{B} = \rho_m^{st}$
$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}$	$\vec{J}^e = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_{me}$
$\vec{p} = q \vec{l}$	$\vec{p}_{me} = m \vec{l}$
$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi$	$\vec{H} = -\operatorname{grad} \varphi_m$
$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_V \left( \vec{P}(M), \operatorname{grad}_M \frac{1}{r_{MQ}} \right) dV_M$	$\varphi_m(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_V \left( \vec{J}^e(M), \operatorname{grad}_M \frac{1}{r_{MQ}} \right) dV_M$
$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_S \sigma(M) \frac{1}{r_{MQ}} dS_M$	$\varphi_m(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_S \sigma_m(M) \frac{1}{r_{MQ}} dS_M$

Для границы раздела двух различных однородных сред 1 и 2 в отсутствие сторонних источников и при условии, что нормаль к границе направлена в среду 1, из уравнений первой строки табл. 1 следуют граничные условия [2] для электростатического поля –

$$E_{1n} - E_{2n} = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

для магнитостатического поля –

$$H_{1n} - H_{2n} = \frac{\sigma_m}{\mu_0}, \quad (2)$$

где  $\sigma_e$ ,  $\sigma_m$  – поверхностные плотности поляризационных электрических и фиктивных магнитных зарядов на границе раздела, причем

$$\sigma_e = P_{2n} - P_{1n}, \quad \sigma_m = J_{2n}^e - J_{1n}^e. \quad (3)$$

В граничных условиях (1) и (2), а также в формулах (3) индексы 1n и 2n имеют нормальные проекции соответствующих векторов в средах 1 и 2.

**Анализ применения модели намагничивания молекулярными токами.** Вначале приведем в том же смысловом порядке, как и для дипольной модели (табл. 1), основные уравнения и формулы магнитостатики намагничиваемых сред на основе модели намагничивания молекулярными токами [1, 4]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 (\vec{j}_m + \vec{\delta}^{st}); \\ \operatorname{rot} \vec{J} &= \vec{j}_m; \\ \vec{B} &= \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}); \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0; \\ \vec{J} &= \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_m; \\ \vec{p}_m &= i_m s \vec{n}; \\ \vec{B} &= \operatorname{rot} \vec{A}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\vec{A}(Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \vec{j}_m(M) \frac{1}{r_{MQ}} dV_M,$$

где  $\vec{j}_m$  – плотность молекулярных токов намагничивания;  $\vec{\delta}^{st}$  – плотность сторонних токов проводимости;  $\vec{p}_m$  – магнитный момент молекулярного тока намагничивания  $i_m$ ;  $s$  – площадь микроскопического круга, ограниченного контуром протекания тока  $i_m$ ;  $\vec{n}$  – нормаль к микроскопическому кругу в его центре;  $\vec{A}(Q)$  – векторный потенциал магнитного поля, создаваемого молекулярными токами намагничивания.

Сравнение основных уравнений и формул электростатического поля поляризуемых сред (табл. 1) и магнитостатического поля намагничиваемых сред на основе модели намагничивания молекулярными токами показывает, что между этими полями нет даже формальной аналогии. Этот вопрос не сводится только к несоответствию соотношений между векторами  $\vec{D}$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{P}$  и  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{J}$ , а является следствием существенного отличия источников сопоставляемых полей: источниками электростатического поля являются диполи – скалярные источники, магнитостатического – токи (векторные источники). Магнитное поле молекулярных токов, в отличие от поля магнитных диполей, является вихревым, поэтому его векторы и плотности источников связаны другими уравнениями.

Следовательно, можно говорить лишь об использовании  $\vec{J}$  в электростатической аналогии на основе дипольной модели намагничивания.

**О связи между намагниченностями  $\vec{J}^e$  и  $\vec{J}$ .** Как мы уже отмечали во введении, К.М. Поливанов предложил аналогию  $\vec{P}$  и  $\mu_0 \vec{J}$  [1], используя преобразование формулы (4) к виду

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}.$$

При этом слагаемому  $\mu_0 \vec{J}$  не придается определенный физический смысл, о котором можно догадываться. Для выяснения последнего найдем связь между  $\vec{J}^e$  и  $\vec{J}$ .

Во-первых, воспользуемся идеей замены контуров с токами проводимости двойными магнитными слоями [4, 5]. Применяя эту идею к контуру молекулярного тока намагничивания  $i_m$ , приходим к микроскопическому однородному двойному слою фиктивных магнитных зарядов, который эквивалентен магнитному диполлю.

Во-вторых, воспользуемся условием эквивалентности магнитных полей контура с током проводимости на больших расстояниях от него и магнитного диполя в однородной среде с абсолютной магнитной проницаемостью  $\mu$  [5]. Применяя это условие к рассматриваемым моделям намагничивания с микроскопическими источниками, имеем

$$\vec{p}_{me} = \mu_0 \vec{p}_m. \quad (5)$$

Усредняя левую и правую части условия (5) по достаточно малому объему намагничиваемой среды  $\Delta V$ , находим

$$\vec{J}^e = \mu_0 \vec{J}. \quad (6)$$

Соотношение (6) позволяет использовать намагниченность молекулярными токами в дипольной модели намагничивания и раскрывает физический смысл  $\mu_0 \vec{J}$  в обсуждаемой аналогии.

**Выводы.** Дипольная модель намагничивания и модель намагничивания молекулярными токами имеют различный физический смысл, следствием чего являются различные определения намагниченности и математические описания магнитостатического поля в намагничиваемой среде. Поле дипольной модели является потенциальным и описывается скалярным потенциалом, поле молекулярных токов – вихревое и описывается векторным потенциалом. Применение электростатической аналогии для расчета магнитостатического поля неоднородных намагничивающихся сред правильно на основе дипольной модели намагничивания, однако в расчетных формулах потенциального поля возможно корректное использование намагниченности молекулярными токами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники, ч. 3. Теория электромагнитного поля. – М.: «Энергия», 1969. – 352 с.
2. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М. – Л.: Изд. АН СССР, 1948. – 730 с.
3. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 775 с.
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989. – 504 с.
5. Брунов Б.Я., Гольденберг Л.М., Кляцкин И.Г., Цейтлин Л.А., Теория электромагнитного поля. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 512 с.

#### REFERENCES

1. Polivanov K.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki, ch. 3. Teoriia elektromagnitnogo polia* [Theoretical foundations of electrical engineering, Part 3. Theory of electromagnetic field]. Moscow, Energija Publ., 1969. 352 p. (Rus).
2. Grinberg G.A. *Izbrannye voprosy matematicheskoi teorii elektricheskikh i magnitnykh iavlenii* [Selected questions of mathematical theory of electric and magnetic phenomena]. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1948. 730 p. (Rus).
3. Simonyi K. *Teoreticheskaya elektrotehnika* [Theoretical Electrical Engineering]. Moscow, Mir Publ., 1964. 775 p. (Rus).
4. Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of electricity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1954. 620 p. (Rus).
5. Brunov B.Ia., Gol'denberg L.M., Kliatskin I.G., Tseitlin L.A., *Teoriia elektromagnitnogo polia* [Theory of electromagnetic field]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 512 p. (Rus).

Поступила (received) 28.08.2017

Михайлов Валерий Михайлович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Чунихин Константин Вадимович<sup>2</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 057 7076052,  
e-mail: valery.m.mikhailov@gmail.com

<sup>2</sup>Государственное учреждение «Институт технических  
проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины»,  
61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,  
тел/phone +38 057 2992162,  
e-mail: kvchunikhin@gmail.com

V.M. Mikhailov<sup>1</sup>, K.V. Chunikhin<sup>2</sup>

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

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

#### On electrostatic analogy of magnetostatic field in inhomogeneous magnetized medium.

**Purpose.** The application in electrostatic analogy of magnetostatics for inhomogeneous magnetized media of two known magnetization models. **Methodology.** A comparison of basic equations and formulas of electrostatic and magnetostatic field in immoveable isotropic inhomogeneous polarized medium for dipole model and the magnetization model by molecular currents is made. The value-analogues for dipole model of magnetization are established. **Results.** We have shown that the using of dipole model of magnetization is correct. There is not even formal analogy with electrostatic field in the case of using the magnetization model by molecular currents. The relation between the magnetizations for various models is obtained. It allows us to justify the using magnetization by molecular currents in electrostatic analogy. **Originality.** The magnetization for dipole model is introduced and the possibility of using magnetization by molecular currents in the formulas for calculating potential magnetostatic field in magnetized medium is substantiated. **Practical value.** The results allow to obtain correct formulation and solution of the problem of magnetostatic field calculation in inhomogeneous magnetized medium. References 5, tables 1.

**Key words:** magnetostatics, magnetized medium, electrostatic analogy, dipole model, magnetization by molecular currents.

В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко

## РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ЗАМЫКАНИИ СОБСТВЕННЫХ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ, ОХВАЧЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

*Отримано компактні співвідношення для розрахунку ефективності екранування магнітного поля високовольтної трифазної кабельної лінії, що складається з одножильних кабелів охоплених ферромагнітними осерддями, при двосторонньому замиканні власних екранів. Розглянуто кабельні лінії з прокладкою кабелів трикутником і в площині. Запропоновані співвідношення для розрахунку ефективності екранування магнітного поля верифіковано експериментально. Бібл. 11, рис. 3.*

*Ключові слова:* кабельна лінія, екран кабелю, магнітне поле, двостороннє заземлення, ферромагнітне осердя.

*Получены компактные соотношения для расчета эффективности экранирования магнитного поля высоковольтной трехфазной кабельной линии, состоящей из одножильных кабелей, которые охвачены ферромагнитными сердечниками, при двустороннем замыкании собственных экранов. Рассмотрены кабельные линии с укладкой кабелей треугольником и в плоскости. Предложенные соотношения для расчета эффективности экранирования магнитного поля верифицированы экспериментально. Библи. 11, рис. 3.*

*Ключевые слова:* кабельная линия, экран кабеля, магнитное поле, двустороннее заземление, ферромагнитный сердечник.

**Введение.** Выполнение норм по предельно допустимым уровням магнитной индукции является обязательным при прокладке высоковольтных кабельных линий (КЛ). В Украине предельно допустимый уровень магнитной индукции внутри жилых помещений, расположенных вблизи КЛ, составляет 0,5 мкТл [1, С. 277]. При увеличении расстояния между одножильными кабелями КЛ со шито-полиэтиленовой изоляцией, величина магнитной индукции КЛ может существенно превысить допустимый уровень [1, С. 285].

Для уменьшения магнитного поля (МП) КЛ применяются электромагнитные, магнитоэлектрические и контурные экраны [2-4]. Другой подход к уменьшению МП КЛ, не требующий установки дополнительных экранов, заключается в двухстороннем замыкании собственных экранов кабелей КЛ путем их двухстороннего заземления на обоих концах зоны экранирования [5-7]. В этом случае эффективность экранирования МП составляет 1,5÷2,5 [5], что не всегда достаточно для нормализации МП КЛ. Дальнейшее повышение эффективности экранирования МП может быть достигнуто путем усиления магнитной связи между жилами и экранами кабелей КЛ [8]. Для этого каждый из кабелей (рис. 1) охватывается ферромагнитным сердечником (ФС) из шихтованной электро-технической стали.

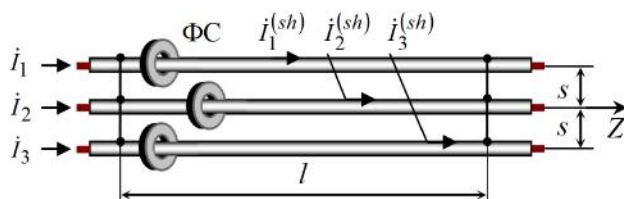


Рис. 1. Трехфазная КЛ с установленными ФС

В [8] экспериментально исследована зависимость эффективности экранирования МП от количества ФС, установленных на каждом из кабелей. Измерения,

выполненные на физическом макете КЛ, подтвердили возможность 2÷4 кратного увеличения эффективности экранирования по сравнению с традиционным двусторонним замыканием экранов кабелей. Однако предложенные в [8] соотношения для расчета эффективности экранирования МП КЛ с ферромагнитными сердечниками требуют уточнения.

**Целью** данной работы является получение теоретически обоснованных соотношений для расчета эффективности экранирования магнитного поля трехфазной кабельной линии с двусторонне замкнутыми экранами и установленными на кабелях ферромагнитными сердечниками.

**Эффективность экранирования МП КЛ при прокладке кабелей треугольником.** Эффективность экранирования МП определяется как отношение действительного значения магнитной индукции до двухстороннего замыкания экранов кабелей к действующему значению магнитной индукции после замыкания экранов кабелей [9]:

$$SF = \left| \frac{\dot{B}_0}{|\dot{B}|} \right| \quad (1)$$

Будем считать, что кабели прямые (или радиусом их кривизны можно пренебречь) и параллельны друг другу. В случае, когда экраны кабелей разомкнуты, МП КЛ определяется только токами в жилах. Если ось  $X$  параллельна уровню земли и перпендикулярна осям кабелей, а ось  $Y$  направлена вверх, то комплексная амплитуда магнитной индукции в точке с координатами  $(x, y)$  равна [9]:

$$\dot{B}_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^3 \dot{I}_k \cdot \left( -\frac{y-y_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right), \quad (2)$$

где  $k = \overline{1, 3}$  – номер кабеля;  $\dot{I}_k$  – комплексная амплитуда тока в жиле  $k$ -ого кабеля;  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  – орты декартовой системы координат;  $(x_k, y_k)$  – координаты оси  $k$ -ого кабеля;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

При двухстороннем замыкании экранов комплексная амплитуда магнитной индукции равна [9]:

$$\dot{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^3 (\dot{I}_k + \dot{I}_k^{(sh)}) \times \left( -\frac{y-y_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right), \quad (3)$$

где  $\dot{I}_k^{(sh)}$  – комплексная амплитуда тока в экране  $k$ -ого кабеля.

Как видно из (1)-(3) для расчета эффективности экранирования необходимо определить токи в экранах кабелей при наличии ферромагнитных сердечников.

Рассмотрим трехфазную КЛ с треугольной прокладкой кабелей, охваченных цилиндрическими ферромагнитными сердечниками (рис. 1).

Поскольку экраны кабелей замкнуты с обоих концов КЛ, то для индуцированных в них токов выполняется 1-й закон Кирхгофа:

$$\dot{I}_1^{(sh)} + \dot{I}_2^{(sh)} + \dot{I}_3^{(sh)} = 0. \quad (4)$$

Рассмотрим контур, образованный экранами 1-ого и 2-ого кабелей, и контур, образованный экранами 2-ого и 3-ого кабелей. ЭДС, индуцированные в контурах, определяются магнитными потоками, которые их пронизывают [10, С. 59]. На основании закона Ома в комплексной форме и закона электромагнитной индукции запишем следующие соотношения для каждого из контуров:

$$\begin{aligned} (\dot{I}_1^{(sh)} - \dot{I}_2^{(sh)}) \cdot R^* &= -j\omega \cdot (\dot{\Psi}_1^{(1,2)} - \dot{\Psi}_2^{(1,2)}), \\ (\dot{I}_2^{(sh)} - \dot{I}_3^{(sh)}) \cdot R^* &= -j\omega \cdot (\dot{\Psi}_2^{(2,3)} - \dot{\Psi}_3^{(2,3)}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $j$  – мнимая единица;  $\omega = 2\pi \cdot 50$  с<sup>-1</sup> – угловая частота тока;  $R^*$  – активное сопротивление единицы длины экрана кабеля, Ом/м;  $\dot{\Psi}_k^{(m,n)} \equiv \dot{\Psi}_k^{(n,m)}$  – комплексная амплитуда полного потока магнитного поля, которое создается токами жилы и экрана  $k$ -ого кабеля и пронизывает контур, образованный экранами кабелей с номерами  $m$  и  $n$ .

Для треугольной КЛ в силу осевой симметрии  $\dot{\Psi}_k^{(m,n)} = 0$ , когда  $k \neq m$  и  $k \neq n$ .

Для расчета  $\dot{\Psi}_k^{(k,n)}$  примем следующие допущения:

– распределение индуцированного тока в экране каждого кабеля равномерно;

– цилиндрические ФС, охватывающие кабели, не намагничиваются до насыщения, а их магнитная проницаемость постоянна и равна  $\mu$ ;

– каждый из ФС намагничивается токами жилы и экрана только того кабеля, который он охватывает, а МП внутри ФС осесимметрично;

– на всей протяженности КЛ МП является плоскопараллельным.

Тогда комплексная амплитуда магнитной индукции поля, создаваемого токами жилы и экрана  $k$ -ого кабеля, имеет только угловую компоненту относительно оси  $k$ -ого кабеля и равна  $\mu\mu_0(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k)/2\pi r$  внутри ФС и  $\mu_0(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k)/2\pi r$  вне ФС. Разбивая токи в экранах кабелей с номерами  $k$  и  $n$  на элементарные трубки тока бесконечно малого сечения [11, С. 8], и проводя интегрирование по всевозможным контурам, образованных этими трубками, находим:

$$\dot{\Psi}_k^{(k,n)} = \frac{\mu_0(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k)}{2\pi} \cdot \ln \frac{s}{r} + \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k)}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (6)$$

где  $s$  – расстояние между осями кабелей, м;  $r$  – радиус экрана, м;  $l$  – длина экранированного участка КЛ, м;  $l_{core}$  – суммарная длина ФС, установленных на каждый из кабелей, м;  $r_1$  и  $r_2$  – соответственно, внешний и внутренний радиус ФС, м;

Выражения (4)-(5) образуют систему трех уравнений относительно  $\dot{I}_1^{(sh)}$ ,  $\dot{I}_2^{(sh)}$  и  $\dot{I}_3^{(sh)}$ . Подставляя (6) находим её решение:

$$\dot{I}_k^{(sh)} = -\dot{I}_k \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \alpha \cdot \dot{I}_k, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad (7)$$

где  $M^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{s}{r} + \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}$  – удельная эквивалентная индуктивность экрана, охваченного сердечником, Гн/м.

Подставляя (7) в (1)-(3) получаем окончательное соотношение для эффективности экранирования в случае треугольной укладки кабелей:

$$SF_{trefoil} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| \frac{1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{s}{r} + j \cdot \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}}{1 + \alpha} \right|. \quad (8)$$

**Эффективность экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости.** В [9] авторами показано, что для анализа МП КЛ с плоской прокладкой кабелей достаточно рассмотреть дипольную составляющую поля, а упрощенное соотношение для расчета эффективности экранирования при прокладке кабелей в плоскости может быть получено подстановкой  $s \rightarrow 2 \cdot s$  в соотношение для эффективности экранирования при прокладке кабелей треугольником. Следовательно, при прокладке кабелей в плоскости

$$SF_{flat} = \left| \begin{aligned} &1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{2s}{r} + \\ &+ j \cdot \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \end{aligned} \right|. \quad (9)$$

Для верификации соотношения (9) воспользуемся результатами экспериментальных исследований, выполненных авторами [8]. Исследования проводились на физическом макете КЛ. Макет выполнен из кабелей типа АПвЭгаПу-110 1×240/70 длиной  $l=10$  м (рис. 2). Активное сопротивление единицы длины экрана кабеля  $R^*=0,29 \times 10^{-3}$  Ом/м. Расстояние между осями кабелей – 0,2 м. Действующее значение тока в жилах кабелей – 95 А.



Рис. 2. Физический макет КЛ

В качестве ФС использовались статорные сердечники асинхронных электродвигателей, которые выполнены из шихтованной электротехнической стали. Магнитная проницаемость сердечников  $\mu=3000$  была определена экспериментально. Внешний радиус сердечника  $r_1=65$  мм, внутренний –  $r_2=50$  мм. Длина одного сердечника равна 100 мм.

Число ФС, устанавливаемых на каждый кабель, варьировалось от 0 до 3. Соответственно, суммарная длина сердечников ФС, установленных на каждый из кабелей при проведении экспериментальных исследований, составляла 0, 100 мм, 200 мм и 300 мм.

Измерение магнитной индукции выполнялось с помощью трехкомпонентного магнитометра EMF-828.

На рис. 3 показаны: построенная согласно (9) кривая зависимости эффективности экранирования от суммарной длины ФС, установленных на каждый из кабелей, и точки, соответствующие результатам измерения эффективности экранирования на макете КЛ. Как видно из рисунка, в отсутствии ФС результаты расчета и измерений совпадают. При использовании ФС отклонение экспериментальных данных от результатов расчета не превышает 15 %.

Соотношение (8) по сравнению с (9) получено при более мягких допущениях. Поэтому можно утверждать, что погрешность применения (8) также не превысит 15 %.

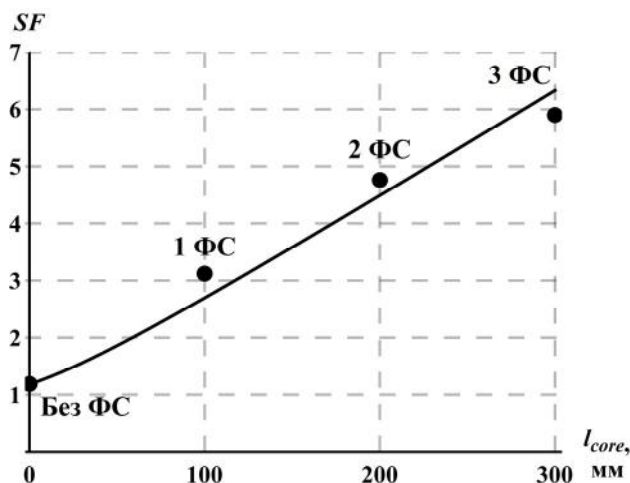


Рис. 3. Зависимость эффективности экранирования МП КЛ от суммарной длины ФС

### Выводы.

1. Впервые получены теоретически обоснованные соотношения для инженерного расчета эффективности экранирования магнитного поля кабельной линии для случаев прокладки кабелей в плоскости и треугольнике при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками.

2. Экспериментальные исследования, проведенные на физическом макете кабельной линии, подтвердили корректность полученных расчетных соотношений, погрешность которых не превышает 15 %, если расстояние между кабелями втрое больше внешнего радиуса ферромагнитных сердечников.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Вид. 5-те, перероб. й доп. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с.
2. Резинкина М.М., Гринченко В.С. Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – №49. – С. 73-78.
3. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic-field mitigation: High magnetic coupling passive loop // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – vol.26. – no.3. – pp. 1625-1633. doi: 10.1109/tpwrd.2010.2099671.
4. De Wulf M., Wouters P., Sergean P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – vol.316. – no.2. – pp. 908-911. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.137.
5. Розов В.Ю., Квицинский А.А., Добродеев П.Н., Гринченко В.С., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С. 56-61. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
6. СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.
7. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с.
8. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Повышение эффективности контурного экранирования

магнитного поля высоковольтных кабельных линий // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 5-7.

9. Розов В.Ю., Ткаченко А.О., Ерисов А.В., Гринченко В.С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей // Технічна електродинаміка. – 2017. – №2. – С. 13-18.

10. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.

11. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справ. кн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.

#### REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations], 5th ed. Kharkiv, Minenergougillya of Ukraine, 2014. 793 p. (Ukr).
2. Rezinikina M.M., Grinchenko V.S. Underground busbars magnetic field mitigation with the help of electro-magnetic shields, consisted of U-shaped elements. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2012, no.49, pp. 73-78. (Rus).
3. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic-field mitigation: High magnetic coupling passive loop. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol.26, no.3, pp. 1625-1633. doi: 10.1109/tpwrd.2010.2099671.
4. De Wulf M., Wouters P., Sergean P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, vol.316, no.2, pp. 908-911. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.137.
5. Rozov V.Yu., Kvytsynskyi A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V. and Tkachenko O.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 56-61. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
6. SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011.2. *Proektuvannya kabelnykh liniy napruhoiu do 330 kV. Nastanova* [Design of cable lines with voltage up to 330 kV. Guidance]. Kyiv, Minenergougillya of Ukraine Publ., 2017, 139 p. (Ukr).
7. SOU-N EE 20.179:2008. *Rozrakhunok elektrychnoho i mahnitnoho poliv liniy elektroperedavannya. Metodyka* [Calculation of the electric and magnetic fields of power line. Method]. Kyiv, Minenergougillya of Ukraine Publ., 2016, 34 p. (Ukr).
8. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Increasing the efficiency of contour shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no.4, pp. 5-7. (Rus).
9. Rozov V.Yu., Tkachenko O.O., Erisov A.V. and Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no.2, pp. 13-18 (Rus).

10. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: V 3-kh t. Uchebnik dlia vuzov. Tom 1* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols. Vol.1]. St. Petersburg, Piter Publ, 2003. 463 p. (Rus).

11. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).

Поступила (received) 07.08.2017

Розов Владимир Юрьевич<sup>1</sup>, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, Гринченко Владимир Сергеевич<sup>1</sup>, к.т.н., Ткаченко Александр Олегович<sup>1</sup>, аспирант,  
<sup>1</sup> Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +380 572 992162, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

V.Yu. Rozov<sup>1</sup>, V.S. Grinchenko<sup>1</sup>, O.O. Tkachenko<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

#### Calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded cable shields covered by ferromagnetic cores.

In this paper we obtain compact expressions for the magnetic field shielding factor of a high-voltage three-phase cable line consisting of single-core cables with two-point bonded cable shields and ferromagnetic cores installed. To obtain these expressions we develop the analytical model of the cable line. Following assumptions are made to develop the model: the current distribution in each cable shield is uniform, cylindrical ferromagnetic cores covering the cables are not magnetized to saturation and their magnetic permeability is constant, each of the ferromagnetic cores is magnetized only by the core current and the shield current of the cable that it covers, the magnetic field inside ferromagnetic cores is axisymmetric, the magnetic field is plane-parallel over the entire cable line. We consider common cases of flat and trefoil cable lines. The proposed expressions for the magnetic field shielding factor are verified experimentally. The physical model is made of three cables of the type NA2XSF(L)2Y-110 1×240/70. It is shown that the difference between numerical simulation results and experimental data lays within 15 %. References 11, figures 3.

Key words: cable line, shield of cable, magnetic field, bonded shields, ferromagnetic core.

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

## КОАКСИАЛЬНЫЙ ДИСКОВЫЙ ШУНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ГРОВОВЫХ РАЗРЯДОВ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ С ИНТЕГРАЛОМ ДЕЙСТВИЯ ДО $15 \cdot 10^6$ ДЖ/ОМ

*Описана конструкція розробленого і створеного вимірювального коаксіального дискового шунта типу ШК-300М2, що дозволяє за допомогою коаксіальної кабельної лінії зв'язку і цифрових осцилографів, що запам'ятовують, одночасно вимірювати амплітудно-часові параметри (АЧП) основних компонент струму штучної блискавки, що генеруються високовольтним генератором грозових розрядів відповідно до вимог нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013 і SAE ARP 5416: 2013. Приведені основні технічні характеристики вимірювального коаксіального дискового шунта типу ШК-300М2. Показано, що даний шунт дозволяє вимірювати і АЧП аперіодичного імпульсу струму часової форми 10 мкс/350 мкс, нормований інтеграл дії якого згідно вимог міжнародного стандарту IEC 62305-1: 2010 може чисельно складати до  $13,5 \cdot 10^6$  Дж/Ом. Бібл. 11, рис. 4.*

**Ключові слова:** потужний високовольтний генератор струму блискавки, вимірювальний коаксіальний дисковий шунт, вимірювальний диск шунта з неіржавіючої сталі, розрахункова оцінка параметрів шунта.

*Описана конструкция разработанного и созданного измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, позволяющего с помощью коаксиальной кабельной линии связи и цифровых запоминающих осциллографов одновременно измерять амплитудно-временные параметры (АВП) основных компонент тока искусственной молнии, генерируемых высоковольтным генератором грозовых разрядов в соответствии с требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013. Приведены основные технические характеристики измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2. Показано, что данный шунт позволяет измерять и АВП аперіодического импульса тока временной формы 10 мкс/350 мкс, нормированный интеграл действия которого согласно требований международного стандарта IEC 62305-1: 2010 может численно составлять до  $13,5 \cdot 10^6$  Дж/Ом. Библ. 11, рис. 4.*

**Ключевые слова:** мощный высоковольтный генератор тока молнии, измерительный коаксиальный дисковий шунт, измерительный диск шунта из нержавеющей стали, расчетная оценка параметров шунта.

**Введение.** Нормативные документы США SAE ARP 5412: 2013 [1] и SAE ARP 5416: 2013 [2] определяют требования к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока искусственной молнии, генерируемых соответствующими высоковольтными генераторами грозовых разрядов, обычно называемых у нас высоковольтными генераторами тока молнии (ГТМ), на электрических нагрузках аэрокосмической техники, испытываемой на молниестойкость. Один из подобных типов мощного ГТМ, воспроизводящего по требованиям [1, 2] на активно-индуктивной нагрузке необходимые АВП импульсов тока имитированной молнии, был разработан и создан в 2007 г. сотрудниками отделов №3 высоковольтной импульсной техники и №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [3]. Согласно [1, 2] при указанных испытаниях устройств авиационной и ракетно-космической техники могут использоваться импульсная А- (или повторная импульсная D-), промежуточная В- и длительная С- (или укороченная длительная С\*- ) компоненты тока искусственной молнии. Причем, сочетания данных токовых компонент, следующих во времени друг за другом и резко отличающихся своими амплитудами (от сотен килоампер до десятков ампер) и длительностями протекания (от сотен микросекунд до одной тысячи миллисекунд), могут быть по [1, 2] различными. Наиболее часто в практике испытаний отдельных элементов таких летательных аппаратов как самолетов гражданского и военного назначения на молниестойкость применяются следующие комбинации указанных компонент тока молнии [1-4]: А-, В- и С- компоненты, А-, В- и С\*-

компоненты и D-, В- и С\*- компоненты. Для указанных компонент тока молнии такой важный параметр для электротермического нагружения в сильноточной разрядной цепи мощного ГТМ испытываемых объектов авиационной и ракетно-космической техники в соответствии с требованиями [1, 2] как интеграл их действия  $J_L$  численно не превышает значения  $2 \cdot 10^6$  Дж/Ом  $\pm 20$  %. Заметим, что именно величина этого интеграла  $J_L$  определяет значение тепловой энергии, выделяющейся на испытываемом элементе того или иного объекта. Поэтому величина  $J_L$  зачастую определяет электротермическую молниестойкость такого объекта. Кроме того, при проведении натурных испытаний по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [5] объектов электроэнергетики на молниестойкость значения интеграла действия  $J_L$  аперіодического импульса тока искусственной молнии временной формы 10 мкс/350 мкс, генерируемого разработанным и созданным в 2012 г. в отделе №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» мощным ГТМ [6], для I уровня их защиты от молнии должны составлять  $10 \cdot 10^6$  Дж/Ом  $\pm 35$  %. При электрическом токовом нагружении испытываемых объектов необходимо в оперативном режиме осуществлять регистрацию и контроль АВП используемых при этом компонент тока молнии. Обычно подобные электротехнологические процедуры выполняются при помощи измерительных средств, в качестве которых выступают высоковольтные сильноточные измерительные шунты (ВСИШ) с коаксиальными кабельными линиями связи, работающими в согласованном

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

волновом режиме [3, 4], и цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО). Как правило, ВСИШ являются специальными нестандартизованными измерительными средствами, которые промышленностью из-за своей незначительной количественной потребности и отсутствия у бизнесменов к такой продукции коммерческого интереса не выпускаются. Поэтому отечественным электротехникам-высоковольтникам вместе с инженерами-метрологами приходится самостоятельно решать возникающие инженерно-технические задачи по их разработке и изготовлению с последующей государственной метрологической аттестацией.

### 1. Состояние инженерно-технической задачи.

В [7] были описаны конструкция и технические характеристики измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 для определения АВП импульсов тока искусственной молнии, генерируемых в сильноточных разрядных цепях ГТМ в соответствии с требованиями нормативных документов [1, 2]. В состав конструкции данного шунта входит манганиновый измерительный диск толщиной  $h_s \approx 0,3$  мм с наружным диаметром  $D_{se} \approx 80$  мм, определяющий импульсное активное сопротивление шунта, равное примерно  $R_s \approx 0,185$  мОм  $\pm 1\%$  [3, 7]. Практика эксплуатации в лабораторных условиях шунта типа ШК-300 показала его недостаточную электротермическую и электродинамическую стойкость в сильноточной разрядной цепи ГТМ, воспроизводящего на активно-индуктивной нагрузке ( $R \approx 0,1$  Ом;  $L \approx 1$  мкГн) импульсный ток  $i_L(t)$  искусственной молнии с интегралом действия, равным около  $J_L \approx 2 \cdot 10^6$  Дж/Ом  $\pm 20\%$  [1, 2]. После примерно 100 указанных сильноточных разрядов ГТМ на испытываемую нагрузку и измерительный шунт типа ШК-300 последний теряет свои метрологические характеристики и становится не пригодным к его дальнейшему использованию. При прохождении согласно [5] по токоведущим частям измерительного шунта типа ШК-300 аperiodического импульса тока 15 мкс/315 мкс искусственной молнии амплитудой  $I_{ml} \approx 184$  кА ( $J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$  Дж/Ом) указанный шунт был разрушен внутренним импульсным газодинамическим давлением в несколько сотен атмосфер из-за электрического взрыва (сублимации) части материала его тонкого измерительного манганинового диска [8]. Как видим, при использовании в области высоковольтной импульсной техники с разрядными токами конденсаторных батарей ГТМ в сотни килоампер к выбору конструкции соответствующего измерительного шунта должны предъявляться повышенные требования к его электротермической молниестойкости.

В [9] была приведена конструкция стержневого шунта для измерения импульсных токов микросекундной длительности с амплитудой до 75 кА. В качестве высокоомного измерительного элемента в этой конструкции шунта были использованы параллельно соединенные прямолинейные отрезки нихромовой проволоки, размещенные по окружности между двумя массивными коаксиальными цилиндрическими электродами шунта – внутренним латунным и наружным дюралюминиевым [9]. Концы каждого отрезка нихромовой проволоки, размещенного параллельно продольной оси шунта, были припаяны твердым при-

поем к двум параллельно расположенным массивным латунным дискам, между которыми находился цилиндрический керамический изолятор. При чувствительности шунта около 350 мВ/кА он позволял надежно измерять лишь большие микросекундные импульсы токи высоковольтной электрофизической установки (амплитудой не более 75 кА) и передавать без искажений фронт токового импульса до 0,6 мкс [9].

**Целью статьи** является разработка и создание в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, позволяющего надежно измерять АВП импульсов тока искусственной молнии в широких амплитудных и временных диапазонах с интегралом действия до  $15 \cdot 10^6$  Дж/Ом.

**2. Постановка задачи.** Накопленный в отделе №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» опыт эксплуатации в составе мощного ГТМ [3] высоковольтного сильноточного измерительного шунта типа ШК-300 свидетельствует о том, что с учетом изложенного выше в разделе 1 состояния назревшей в области высоковольтной импульсной техники актуальной задачи метрологического обеспечения испытаний по [1, 2, 5] отечественной авиационной и ракетно-космической техники, а также объектов электроэнергетики на молниестойкость в указанной конструкции шунта усовершенствованию должны подлежать: во-первых, тонкий измерительный манганиновый диск; во-вторых, изоляция между массивным внутренним латунным и массивным наружным латунным цилиндрическими электродами. Именно эти две позиции являются «слабыми звеньями» в конструкции измерительного шунта типа ШК-300 при его предполагаемом применении в составе измерительных средств, предназначенных для реализации технических задач согласно жестких требований по [1, 2, 5].

Требуется в рамках прикладного инженерно-технического подхода рационально выбрать геометрию и материал измерительного диска, а также изоляцию между основными латунными электродами в измерительном коаксиальном шунте, приобретшем после усовершенствования название ШК-300М2. Кроме того, необходимо после модернизации измерительного коаксиального дискового шунта выполнить его практическую апробацию и проверку работоспособности в составе сильноточной разрядной цепи действующего мощного высоковольтного ГТМ по [3].

**3. Расчетная оценка некоторых параметров измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2.** В качестве материала измерительного диска коаксиального шунта типа ШК-300М2 нами была выбрана широко распространенная в технике и быту нержавеющей сталь марки 12Х18Н10Т отечественного производства [10]. Усредненная толщина  $h_{sm}$  стеньки измерительного диска исследуемого сильноточного высоковольтного коаксиального шунта типа ШК-300М2 в адиабатическом режиме его работы на основании известных законов электро- и теплофизики может быть оценено по соотношению вида:

$$h_{sm} \approx (\pi D_{sm})^{-1} [(J_L \rho_s) / (c_s \Delta T_s d_s)]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $D_{sm} \approx D_{se}/2$ ;  $\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $d_s$  – соответственно удельное электрическое сопротивление, удельная теплоемкость



и плотность материала диска при температуре окружающей среды  $T_0$ , равной комнатной температуре  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\Delta T_s = (T_s - T_0)$  – допустимый кратковременный перегрев материала диска шунта с его текущей температурой  $T_s$ , вызванной протекающим по нему током.

Из конструктивных соображений принимаем, что наружный диаметр измерительного стального диска в шунте типа ШК-300М2 равен  $D_{se} \approx 80\text{ мм}$ , а его внутренний диаметр составляет  $D_{si} \approx 10\text{ мм}$ . Тогда из (1) при  $D_{sm} \approx 40\text{ мм}$ ,  $J_L \approx 15 \cdot 10^6\text{ Дж/Ом}$ ,  $\Delta T_s \approx 100\text{ }^\circ\text{C}$  и известных согласно [10] исходных данных для нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т ( $\rho_s \approx 72,5 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $c_s \approx 462\text{ Дж/(кг}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ ;  $d_s \approx 7900\text{ кг/м}^3$ ) получаем, что усредненная по радиусу толщина стенки измерительного стального диска будет численно равной  $h_{sm} \approx 1,4\text{ мм}$ . С учетом определенного запаса по толщине  $h_{sm}$  и принимая во внимание наши весьма ограниченные технологические возможности в подборе материалов, выбираем толщину стенки измерительного диска из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т равной  $h_{sm} \approx 2\text{ мм}$ .

Отметим, что в (1) для исследуемого шунта типа ШК-300М2 величина кратковременного перегрева  $\Delta T_s$  материала измерительного диска, происходящая за время действия тока  $i_L(t)$  не более  $1000\text{ мс}$  практически в адиабатическом режиме, лимитируется видом твердой изоляции, применяемой для его отделения от основных латунных электродов шунта. При использовании фторопластовой изоляции величину перегрева  $\Delta T_s$  для надежной работы шунта ШК-300М2 в составе ГТМ целесообразно выбирать не более  $100\text{ }^\circ\text{C}$  [3, 4]. При  $\Delta T_s \approx 50\text{ }^\circ\text{C}$  и принятых выше исходных данных для интеграла действия  $J_L$  импульсного тока молнии, геометрических, электро- и теплофизических характеристик стального диска шунта из (1) следует, что толщина  $h_{sm}$  диска как раз и будет равной около  $2\text{ мм}$ .

Активное сопротивление  $R_{S0}$  измерительного стального диска коаксиального шунта ШК-300М2 в квазистационарном режиме, практически соответствующем в рассматриваемом случае режиму протекания по нему постоянного тока, может быть в приближенном виде найдено по следующей формуле [11]:

$$R_{S0} \approx 0,5 (\pi h_{sm})^{-1} \rho_s \ln(D_{se} / D_{si}). \quad (2)$$

Из (2) при  $h_{sm} \approx 2\text{ мм}$ ,  $\rho_s \approx 72,5 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $D_{se} \approx 80\text{ мм}$  и  $D_{si} \approx 10\text{ мм}$  вытекает, что искомая величина  $R_{S0}$  оказывается примерно равной  $0,12\text{ мОм}$ . Измерение практически равного величине  $R_{S0}$  активного сопротивления шунта типа ШК-300М2 в сборе, проведенное специалистами-метрологами в высокостабильной схеме генератора постоянного тока силой  $19\text{ А}$ , показало, что в этом экспериментальном случае  $R_{S0} \approx 0,094\text{ мОм}$ . Видно, что расхождение расчетных и опытных данных для  $R_{S0}$  в нашем случае не превышает  $22\%$ .

#### 4. Практическая реализация измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2.

На рис. 1 и 2 приведены соответственно общий вид и схематическое устройство измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2. Масса этого измерительного шунта составляет около  $3,2\text{ кг}$ , а его габаритные размеры не превышают  $90 \times 95\text{ мм}$ .



Рис. 1. Общий вид коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, предназначенного для измерения на экранах ЦЗО в согласованном режиме работы его коаксиальной кабельной линии связи мощных импульсов тока искусственной молнии в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГТМ с интегралом их действия до  $15 \cdot 10^6\text{ Дж/Ом}$

Из данных рис. 2 видно, что измерительный стальной диск 5 толщиной  $h_{sm} \approx 2\text{ мм}$  на своем рабочем участке плотно зажат между массивными дисками 6 и 7 толщиной  $10\text{ мм}$ , выполненными из листовой фторопластовой изоляции. Между массивными латунными цилиндрическими электродами 1 и 4 шунта, через которые от конденсаторов ГТМ протекает измеряемый импульс тока  $i_L(t)$  искусственной молнии, установлены изоляционные втулки 2 и 3 толщиной  $3\text{ мм}$ , изготовленные также из фторопластовой изоляции.

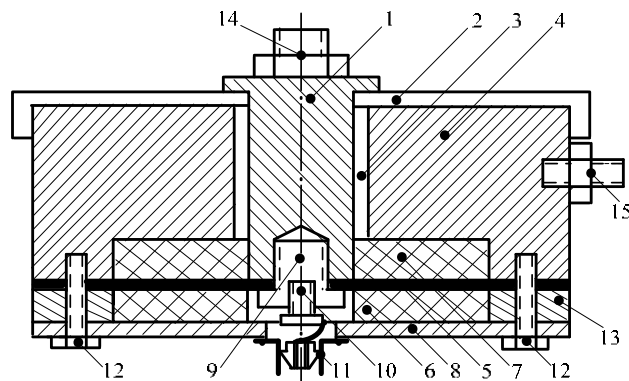


Рис. 2. Элементы конструкции коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 в его продольном осевом разрезе (1 – массивный внутренний цилиндрический электрод; 2,3 – изоляционные втулки; 4 – массивный наружный цилиндрический электрод; 5 – высокоомный стальной измерительный диск; 6,7 – массивные изоляционные диски; 8 – бандажный диск; 9,10,12 – винты крепления; 11 – выходной коаксиальный разъем типа СР-75; 13 – массивное прижимное кольцо; 14,15 – соответственно входные (потенциальные) и выходные (заземленные) элементы болтового подсоединения шунта к сильноточной разрядной цепи ГТМ)

Данные втулки существенно повышают электрическую прочность изоляционных зазоров между токоведущими частями высоковольтного сильноточного шунта типа ШК-300М2, что положительно сказывается на надежности его функционирования в составе мощного ГТМ. Повышенную электродинамическую

стойкость исследуемого шунта обеспечивают массивное прижимное латунное кольцо 13 толщиной 7 мм, бандажный латунный диск 8 толщиной 5 мм и стальные винты крепления 12 в количестве 8 шт., равномерно распределенные по наружному круговому периметру массивного латунного электрода 4 шунта.

Измерительный коаксиальный дисковый шунт типа ШК-300М2 включается в разрыв силовоточной высоковольтной разрядной цепи мощного ГТМ того или иного исполнения [3, 5]. Причем, внутренний цилиндрический латунный электрод 1 диаметром 29 мм шунта подсоединяется при помощи элементов 14 болтового соединения к потенциальной части силовоточной разрядной цепи ГТМ, а его наружный цилиндрический латунный электрод 4 диаметром 80 мм при помощи элементов 15 болтового соединения – к заземленной части разрядной цепи ГТМ (обычно к металлическому заземленному коллектору мощной высоковольтной конденсаторной батареи генератора).

**5. Результаты экспериментальной апробации измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 в силовоточной цепи высоковольтного ГТМ.** На рис. 3 приведена осциллограмма импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии, полученная при помощи измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, включенного в разрядную цепь мощного ГТМ [3], воспроизводящего по требованиям нормативных документов [1, 2] на активно-индуктивной нагрузке ( $R \approx 0,1$  Ом;  $L \approx 1,5$  мкГн) импульсы тока искусственной молнии.

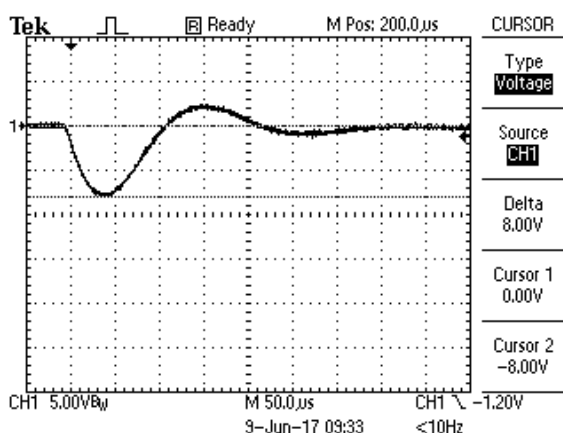


Рис. 3. Осциллограмма импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в силовоточной разрядной цепи ГТМ [3], полученная с помощью измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 ( $I_{mA1} \approx 200$  кА;  $t_{mA1} \approx 38$  мкс;  $J_A \approx 2,39 \cdot 10^6$  Дж/Ом;  $U_{cA} \approx 29,7$  кВ;  $S_{SA} \approx 25 \cdot 10^3$  А/В; масштаб по вертикали – 125 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

В ходе экспериментальных исследований поведения усовершенствованной конструкции и характеристик шунта типа ШК-300М2 в разрядной цепи ГТМ [3], конденсаторная батарея которого при формировании приведенной на рис. 3 компоненты тока молнии заряжалась до постоянного напряжения  $U_{cA} \approx 29,7$  кВ, было установлено, что его импульсное активное сопротивление  $R_S$  принимает численное значение, равное около  $R_S \approx 0,08$  мОм  $\pm 1\%$ . Данное опытное значе-

ние  $R_S$  в условиях протекания по измерительному стальному диску шунта приведенного на рис. 3 импульсного тока  $i_L(t)$  искусственной молнии отличается от активного сопротивления  $R_{S0} \approx 0,094$  мОм исследуемого шунта постоянному току не более, чем на 15 %. Следует заметить то, что указанные значения активных сопротивлений  $R_S$  и  $R_{S0}$  находятся в хорошем согласовании с результатами ранее выполненных исследований переходных электромагнитных процессов и глубин проникновения импульсного электромагнитного поля в проводящих немагнитных средах на участках трех первых полуволн воздействующего на них затухающего синусоидального импульса тока [4]. Из-за особенностей распределения в металле измерительного диска шунта импульсного электромагнитного поля от измеряемого импульсного тока  $i_L(t)$  имитированной молнии его импульсное активное сопротивление  $R_S$  будет всегда меньше активного сопротивления  $R_{S0}$  диска, измеренного при постоянном токе [4].

Известно, что величина импульсного активного сопротивления  $R_S$  измерительного диска шунта в согласованном режиме подключения его коаксиальной кабельной линии связи к ЦЗО определяет его коэффициент преобразования  $S_S$ , имеющий размерность А/В и рассчитываемый по соотношению  $S_S \approx 2/R_S$ . В этом случае значение параметра  $S_S$  оказывается численно равным силе тока, протекающей по диску шунта при подаче на его вход напряжения, равного 1 В. В этой связи АВП измеряемого при помощи коаксиального шунта типа ШК-300М2 импульсного тока  $i_L(t)$  искусственной молнии в разрядной цепи мощного ГТМ будут определяться следующим соотношением:

$$i_L(t) \approx S_S U_{LO}(t), \quad (3)$$

где  $U_{LO}(t)$  – импульсное напряжение, регистрируемое при помощи измерительного шунта на экране ЦЗО.

С учетом представленных результатов находим, что коэффициент преобразования  $S_S$  рассматриваемого измерительного шунта типа ШК-300М2 для режима регистрации им согласно [1, 2] *A*- и *D*- компонент импульсного тока искусственной молнии, а также по [5] импульса тока временной формы 10 мкс/350 мкс будет составлять  $S_{SA} \approx 2/R_S \approx 25 \cdot 10^3$  А/В. При использовании в конце коаксиальной кабельной линии связи шунта, выполненной на основе радиочастотного кабеля марки РК 75-7-11 с волновым сопротивлением 75 Ом, согласующего делителя напряжения (СДН) [3, 7] коэффициент преобразования  $S_S$  исследуемого измерительного шунта типа ШК-300М2 в режиме регистрации им промежуточной *B*-, длительной *C*- и укороченной длительной *C*\*- компонент тока искусственной молнии будет равным  $S_{SC} \approx 1/R_S \approx 12,5 \cdot 10^3$  А/В. Указанный СДН выполняется с двумя выходными коаксиальными разъемами 1:1 (для  $S_{SA}$ ) и 1:2 (для  $S_{SC}$ ) на базе трех резисторов номиналом 110 Ом и размещается в отдельном экранированном корпусе [3, 7].

На рис. 4 приведена осциллограмма укороченной длительной *C*\*- компоненты тока искусственной молнии в силовоточной разрядной цепи ГТМ [3], следующей во времени сразу за импульсной *A*- токовой компонентой молнии и одновременно зафиксированной на экране ЦЗО при помощи измерительного коаксиального

дискового шунта типа ШК-300М2. Укажем, что в проведенных экспериментах были использованы ЦЗО серии Tektronix TDS 1012, размещенные в заглубленном измерительном бункере и удаленные от разрядных цепей ГТМ на расстоянии примерно 70 м.

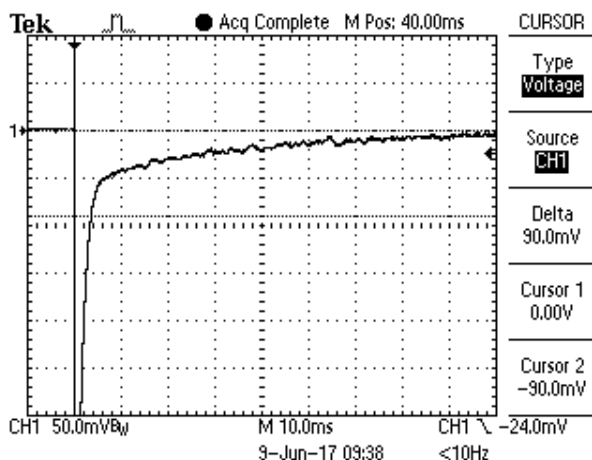


Рис. 4. Осциллограмма укороченной длительной  $C^*$ -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в разрядной цепи ГТМ [3], полученная одновременно с протекающей перед нею токовой  $A$ -компонентой при помощи измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 ( $I_{mC^*} \approx 750$  А;  $t_{mC^*} \approx 5$  мс;  $\tau_{pC^*} \approx 15$  мс;  $q_{C^*} \approx 18,1$  Кл;  $S_{SC^*} \approx 12,5 \cdot 10^3$  А/В;  $U_{cC^*} \approx 4$  кВ; масштаб по вертикали – 625 А/клетка; масштаб по горизонтали – 10 мс/клетка)

Зарядное напряжение отрицательной полярности конденсаторной батареи ГТМ [3], формирующей на активно-индуктивной нагрузке ( $R \approx 0,1$  Ом;  $L \approx 1,5$  мкГн) укороченную длительную  $C^*$ -компоненту тока имитированной молнии, применительно к данным рис. 4 составляло  $U_{cC^*} \approx 4$  кВ. Заметим, что приведенные на рис. 3 и 4 АВП импульсной  $A$ - и укороченной длительной  $C^*$ -компонент тока моделируемой в лабораторных условиях молнии соответствуют действующим требованиям нормативных документов [1, 2].

**Выводы.** 1. Разработанный и созданный в отделе №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» усовершенствованный измерительный коаксиальный дисковый шунт типа ШК-300М2 позволяет при его прямом размещении в сильноточной высоковольтной разрядной цепи мощного ГТМ с помощью одной дополнительно экранированной коаксиальной кабельной линии связи длиной до 70 м и нескольких находящихся в удаленном от ГТМ заглубленном экранированном бункере ЦЗО в согласованном режиме их работы одновременно и многократно измерять на активно-индуктивной нагрузке испытываемого объекта основные компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП по требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 при их амплитуде до  $\pm 220$  кА и интеграле действия до  $2,4 \cdot 10^6$  Дж/Ом.

2. Измерительный коаксиальный дисковый шунт типа ШК-300М2 способен многократно регистрировать на активно-индуктивной нагрузке и передавать в согласованном режиме по коаксиальной кабельной линии связи на ЦЗО формируемые в сильноточной

высоковольтной разрядной цепи мощного ГТМ аperiodические импульсы тока временной формы 10 мкс/350 мкс короткого удара искусственной молнии с нормированными АВП по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 при их амплитуде до  $\pm 220$  кА и интеграле действия до  $13,5 \cdot 10^6$  Дж/Ом.

3. Проведенные в июне 2017 г. на экспериментально-испытательном полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сильноточные эксперименты на мощном высоковольтном ГТМ подтвердили согласно требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 работоспособность измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, прошедшего государственную метрологическую аттестацию в ГП «Харьковстандартметрология» (сертификат соответствия №06/0206 от 19.07.2017 г.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
3. 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.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Точка, 2010. – 407 с.
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10  $\mu$ s/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – vol.58. – no.6. – pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.
7. Дныщенко В.Н., Еремеев В.О., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г. Измерительный шунт ШК-300 для определения амплитудно-временных параметров имитированного импульса тока молнии // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2007. – №20. – С. 75-79.
8. Баранов М.И., Князев В.В., Рудаков С.В. Расчетная и опытная оценка результатов электротермического воздействия нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 импульса тока короткого удара искусственной молнии на тонкостенное покрытие из нержавеющей стали // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №1. – С. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
9. Донец С.Е., Леденев В.В., Литвиненко В.В. Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2008. – №44. – С. 39-44.
10. <http://prom.ua/p19700265-pischevaya-nerzhavyuschaya-stal.html>.
11. Баранов М.И., Белый И.В., Хищенко Л.Т. Эквивалентные электрические параметры коаксиальных систем различной формы с однородным азимутальным магнитным полем в зазоре // Теоретическая электротехника. – 1976. – Вып. 20. – С. 67-74.

#### REFERENCES

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.

3. 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.
4. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10  $\mu$ s/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.
7. Dnyshchenko V.N., Ereemeev V.O., Nedzelsky O.S., Ponudzhaeva E.G. SC-300 measuring shunt for determining the amplitude-time parameters of the simulated lightning current pulse. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2007, no.20. pp. 75-79. (Rus).
8. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 31-38. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
9. Donets S.E., Ledenev V.V., Litvinenko V.V. Rod shunt to measure strong currents of microsecond duration. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2008, no.44. pp. 34-44. (Rus).
10. Available at: <http://prom.ua/p19700265-pishevayav-nerzhavyuschaya-stal.html> (accessed 12 June 2014). (Rus).
11. Baranov M.I., Belyi I.V., Khimenko L.T. Equivalent electrical parameters of coaxial systems of various shapes with a homogeneous azimuthal magnetic field in the gap. *Theoretical electrical engineering*, 1976, no.20, pp. 67-74. (Rus).

Поступила (received) 09.08.2017

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

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841,

e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua, knyaz2@i.ua

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

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

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

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

**Coaxial disk shunt for measuring in the heavy-current chain of high-voltage generator of storm discharges of impulses of current of artificial lightning with the integral of action to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm.**

**Purpose.** Description of construction and basic technical descriptions developed and created in Research & Design Institute «Molniya» National Technical University «Kharkiv Polytechnic

*Institute» high-voltage heavy-current coaxial disk shunt of type of SC-300M2, allowing reliably to measure the peak-temporal parameters (PTP) of impulses of current of artificial lightning in wide peak and temporal ranges with the integral of their action to  $15 \cdot 10^6$  J/Ohm. **Methodology.** Electrophysics bases of high-voltage impulsive technique, scientific and technical bases of development and creation of high-voltage heavy-current impulsive electrical equipment, including the powerful generators of current of lightning (GCL), and also measuring methods in bit chains powerful high-voltage GCL AVP large impulsive currents of micro- and millisecond temporal ranges. **Results.** Offered and described new construction of measuring high-voltage heavy-current shunt, containing a measuring round disk from stainless steel easily soiled a 12X18H10T thickness 2 mm and external diameter 80 mm. Experimental a way impulsive active resistance of  $R_S \approx 0,08$  mOhm of the indicated measuring disk and on his basis a calculation coefficient transformation is found of  $S_S$  of coaxial disk shunt of type of SC-300M2, numeral equal in the concerted mode of operations of his coaxial cable line (CCL)  $S_S \approx 2/R_S \approx 25 \cdot 10^3$  A/V. It is rotined that it is expedient to use this value  $S_S$  for measuring in the heavy-current bit chain of GCL ATP impulsive A- and repeated impulsive D- component of current of artificial lightning, and also ATP of aperiodic impulse of current of artificial lightning of temporal form 10  $\mu$ s/350  $\mu$ s. It is set that taking into account application in the end CCL of shunt of a co-ordinate divisor of voltage with two output coaxial sockets 1:1 (for  $S_{SA} \approx 25 \cdot 10^3$  A/V) and 1:2 ( $S_{SC} \approx 12,5 \cdot 10^3$  A/V) at measuring of ATP intermediate B-, protracted C- and shortened protracted C\*- component of current of artificial lightning in GCL it is expedient to utilize a numeral value  $S_S$  for the examined shunt, equal  $12,5 \cdot 10^3$  A/V. Practical approbation and verification of capacity of the improved measuring coaxial disk shunt of type of SC-300M2 is executed in the high-voltage heavy-current bit chain of powerful GCL, forming on the actively-inductive loading of A- and C\*- the components of current of artificial lightning with rationed ATP. **Originality.** Developed and created new high-voltage heavy-current measuring shunt of type of SC-300M2, allowing reliably to register rationed ATP of attenuation sinewave and aperiodic impulses of current of artificial lightning in the bit chains of powerful GCL with amplitude to  $\pm 220$   $\mu$ A and integral them action to  $13,5 \cdot 10^6$  J/Ohm. On the measuring coaxial disk shunt of type of SC-300M2 from government metrology service of Ukraine the certificate of accordance of the set form is got. **Practical value.** Application of the created shunt of type of SC-300M2 in composition the high-voltage heavy-current bit chains of powerful GCL will allow in a certain measure to improve the metrology providing of tests of aviation and space-rocket technique, and also objects of electroenergy on stability to lightning. References 11, figures 4.*

**Key words:** powerful high-voltage generator of current of lightning, measuring coaxial disk shunt, measuring disk of shunt from stainless steel, calculation estimation of parameters of shunt.

А.В. Беспрозванных, И.А. Мирчук

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВИТЫХ ПАР В ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

*Представлені результати прискореного старіння в умовах підвищеної вологості та температури неекранованого кабелю на основі чотирьох неекранованих витих пар з поліетиленовою термопластичною ізоляцією в захисній оболонці з полівінілхлоридного пластикату. Оцінка стійкості кабелю до дії зовнішніх факторів, що впливають, виконана за частковими ємностями та тангенсу кута діелектричних втрат ізоляційних проміжків між жилами. Конструктивна особливість кабелю призводить до групування часткових ємностей в чотири характерних області. Встановлено динаміку зміння діелектричних параметрів в процесі гігроскопічного зволоження, природної сушки та теплового старіння при температурі 90 °С зразка кабелю. Визначено коефіцієнти парної кореляції між діелектричними параметрами в початковому стані та після зовнішніх факторів. Показано, що конструкція кабелю стійка до дії підвищеної вологості та температури. Бібл. 5, табл. 1, рис. 5.*

*Ключові слова:* кабелі на основі витих пар для суднобудування, прискорене старіння, гігроскопічне зволоження, теплове старіння, часткові ємності, тангенс кута діелектричних втрат, строк служби.

*Представлены результаты ускоренного старения в условиях повышенной влажности и температуры образца неэкранированного кабеля на основе витых пар с полиэтиленовой термопластичной изоляцией в защитной оболочке на основе поливинилхлоридного пластиката. Оценка устойчивости кабеля к действию внешних воздействующих факторов выполнена по частичным емкостям и тангенсу угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков между жилами. Конструктивная особенность кабеля приводит к группированию частичных емкостей в четыре характерные области. Установлена динамика изменений диэлектрических параметров в процессе гигроскопического увлажнения, естественной сушки и теплового старения при температуре 90 °С образца кабеля. Определены коэффициенты парной корреляции между диэлектрическими параметрами в исходном состоянии и после внешних воздействующих факторов. Показано, что конструкция кабеля устойчива к действию повышенной влажности и температуры. Библ. 5, табл. 1, рис. 5.*

*Ключевые слова:* кабели на основе витых пар для судостроения, ускоренное старение, гигроскопическое увлажнение, тепловое старение, частичные емкости, тангенс угла диэлектрических потерь, срок службы.

**Введение.** Развитие объектов инфраструктуры судостроения предусматривает наличие современных разветвленных структурированных систем управления с высокоскоростной передачей данных.

К судовым кабелям предъявляются более высокие требования по электрическим, монтажным характеристикам, стойкости к внешним воздействующим факторам (температуре, влажности, вибрации, солнечному излучению и т.д.), чем к кабелям общепромышленного назначения. Кабели промышленного интерфейса должны соответствовать критериям безопасности и техническим требованиям, в первую очередь, по пожаровзрывобезопасности [1, 2].

Следует отметить, что порядка 60-70 % от общего количества электрических кабелей на кораблях составляют кабели систем управления, сигнализации и связи. Развитие кабелей для структурированных кабельных систем на основе витых пар для судостроения осуществляют по двум основным направлениям: повышение пожарной безопасности кабелей и повышение длительно допустимой рабочей температуры посредством применения новых, более теплоустойчивых, электроизоляционных материалов. В [3] показано, что кабели общепромышленного применения на основе витых пар категории 5е могут работать в условиях повышенной радиационной обстановки.

**Цель статьи** – обоснование возможности работы в условиях повышенной влажности и высоких рабочих температур неэкранированного кабеля на основе неэкранированных витых пар с термопластичной полиэтиленовой изоляцией в защитной поливинилхло-

ридной (ПВХ) оболочке по результатам ускоренного старения.

**Характерные области частичных емкостей изоляционных промежутков.** Оценка устойчивости кабеля к действию внешних воздействующих факторов выполнена по частичным емкостям и тангенсу угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков между жилами. Усадка изоляции в процессе теплового старения либо набухание в ходе длительного гигроскопического увлажнения приводит к изменению характеристик изоляционных промежутков кабеля.

Для кабелей на основе витых пар характерна случайная ориентация пар. Шаги скрутки неэкранированных витых пар (UTP) разные для обеспечения требуемой помехозащищенности: в результате происходит усреднение расстояний между жилами, из-за чего число групп частичных емкостей уменьшается. Так, в 4-парном кабеле на основе UTP (рис. 1, 2) расстояние между жилами 1 и 3 в среднем такое же, как между жилой 1 и любой другой – 4, 5, 6, 7 или 8. В результате все частичные емкости между 8-мью жилами (а таких емкостей столько же, сколько сторон у 8-ми угольника, т.е.  $N = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{8(8-1)}{2} = 28$ ) группируются всего в 4 области – рис. 3.

Первая область – емкости между соприкасающимися жилами одной и той же пары ( $i-j$  – промежутки: 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6, 7 – 8, рис. 1); вторая – емкости меж-

ду жилами соприкасающихся пар ( $i-k$  – промежутки, например: 1 – 7, 1 – 8, 2 – 7, 2 – 8, рис. 1); третья – емкости между жилами не соприкасающихся пар ( $i-l$  – промежутки: 1 – 5, 1 – 6, 2 – 5, 2 – 6 и т.д., рис. 1). Четвертую группу могут образовать измерения по схеме «жила – против всех остальных» ( $i-s$  – область изоляции жил, например, 1 – 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, рис. 1).

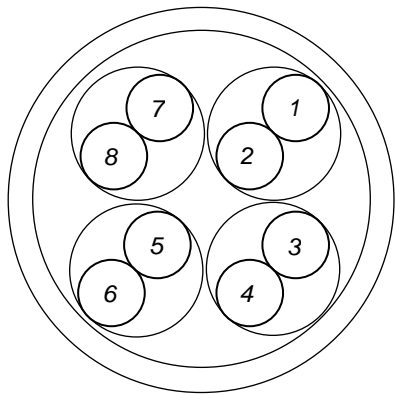


Рис. 1. Схема неэкранированного кабеля на основе витых пар (UTP): 4 витые пары, причем с разными шагами скрутки (случай одинаковой ориентации витых пар, возможный на отдельных сечениях кабеля)

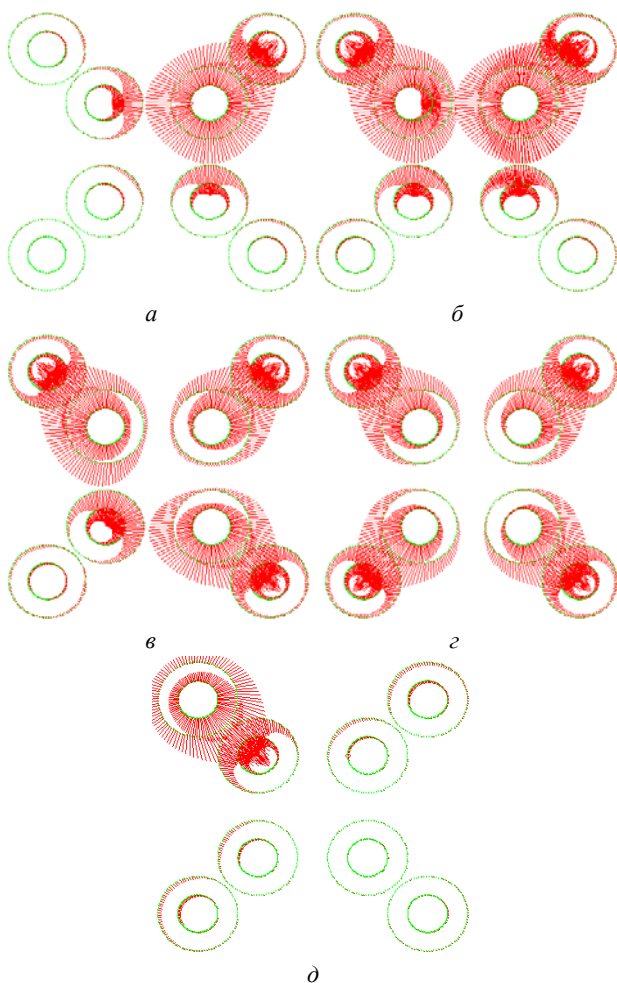


Рис. 2. Картины силовых линий электрического поля в сечении UTP-кабеля с разной ориентацией пар при разных схемах подачи потенциала на жилы

Нормативные характеристики изоляционных

промежутков определены на основе расчета электростатического поля. На рис. 2 представлены силовые линии электрического поля при разных схемах подачи потенциала на жилы: на вторую жилу первой пары (рис. 2,а); на вторую жилу первой и восьмую жилу четвертой пары (рис. 2,б); на вторую жилу первой, восьмую жилу четвертой и третью жилу второй пары (рис. 2,в); на вторую жилу первой, восьмую жилу четвертой, третью жилу второй и пятую жилу третьей пары (рис. 2,г) соответственно. На основе расчета электростатического поля определены погонные емкости ( $C$ ) и доли запасенной энергии ( $\eta$ ) [4] потенциальных жил по отношению к полной энергии, накопленной в кабеле (рис. 3):  $C = 53,0$  пФ/м;  $\eta = 0,506$  – для одной внутренней (рис. 2,а);  $C = 37,7$  пФ/м;  $\eta = 0,473$  – для одной внешней (рис. 2,д);  $C = 101,9$  пФ/м;  $\eta = 0,524$  – для двух внутренних (рис. 2,б);  $C = 114,2$  пФ/м;  $\eta = 0,571$  – для четырех внутренних (рис. 2,в);  $C = 6,214$  пФ/м;  $\eta = 0,0085$  – для восьми жил вместе. Доля энергии, запасенной в твердой изоляции жил, составляет около 50 %. Следовательно, диэлектрические потери в изоляционных промежутках (типа «твердая фаза – воздух») тоже должны составлять около 50 % от потерь в собственно твердом диэлектрике.

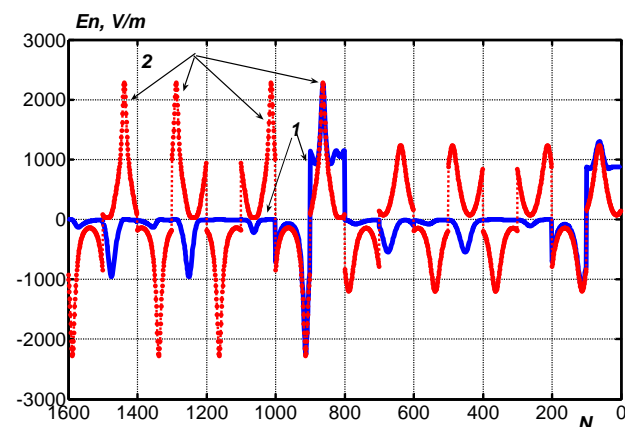


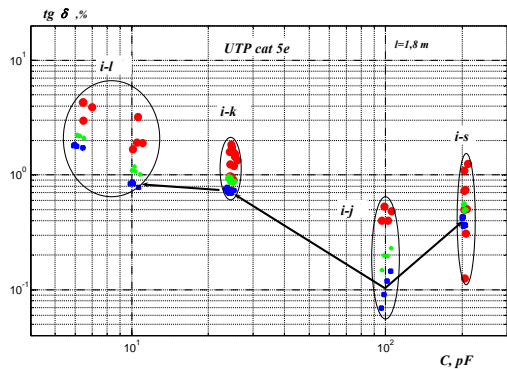
Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля при подаче потенциала на одну (кривая 1) и четыре (кривая 2) внутренние жилы витых пар в UTP-кабеле (число основных узлов  $N = 2500$ , т.е. порядок системы линейных алгебраических уравнений)

**Динамика изменений параметров изоляционных промежутков в результате ускоренного старения.** Экспериментальные исследования выполнены на образце кабеля UTP категории 5е, длиной 1,8 м. Их целью является проверка устойчивости кабеля базовой конструкции с термопластичной сплошной полиэтиленовой изоляцией в защитной оболочке на основе поливинилхлоридного пластика к воздействию повышенной влажности и температуры. Цикл старения в условиях повышенной 100 % влажности в эксикаторе (гигроскопическое увлажнение образца – через не герметизированные торцы) выполнен в течение 336 часов. Затем образец находился в условиях естественной сушки на протяжении 1440 часов. Тепловое старение в термостате при 90 °С проведено в два этапа: первый – в течение 206 часов, второй – в течение 260

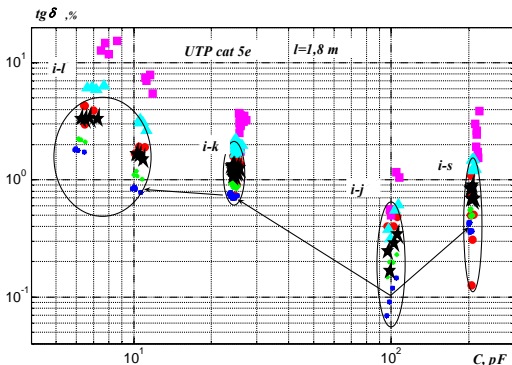
часов.

В исходном состоянии и после ускоренного старения выполнены измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь всех изоляционных промежутков при частотах 100 Гц, 1 и 10 кГц.

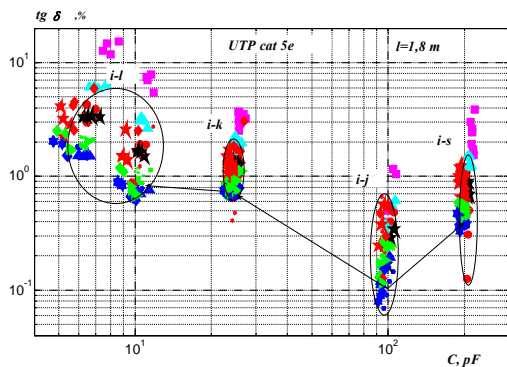
На рис. 4,а представлены параметры изоляционных промежутков образца кабеля UTP категории 5е в исходном состоянии. Для промежутков «жила – жила той же пары» наблюдаются наименьшие уровни  $\text{tg}\delta$ , причем с ростом частоты  $\text{tg}\delta$  падает.



а



б



в

Рис. 4. Динамика изменений частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь в процессе ускоренного старения в условиях повышенной влажности и температуры

Внешнее воздействие – гигроскопическое увлажнение – приводит к сильному изменению параметров только некоторых областей – рис. 4,б (экспериментальные точки лежат за пределами выделенных областей). Это следствие появления влаги в капиллярах, образованных соприкасающимися изолированными жилами [5]. На рис. 5,б представлены параметры изоляционных промежутков в исходном состоянии и по-

сле двухнедельной выдержки (336 часов) в эксикаторе. Емкости промежутков возросли мало, зато  $\text{tg}\delta$  вырос значительно сильнее, причем в большей степени для удаленных друг от друга жил (область малых частичных емкостей, левая часть рис. 4,б). После извлечения из эксикатора и естественной сушки на протяжении двух месяцев (1440 часов) наблюдается уменьшение  $\text{tg}\delta$  из-за удаления влаги с поверхности изолированных жил и уменьшение частичных емкостей из-за набухания изоляции (диффузия влаги в толщу изоляции).

В результате теплового старения при температуре 90 °С продолжается уменьшение  $\text{tg}\delta$  из-за удаления влаги из толщи изоляции и рост частичных емкостей из-за усадки изоляции. Сушка кабеля при температуре 90 °С в течение 260 часов привела к почти полному восстановлению электрических характеристик всех его изоляционных промежутков (см. рис. 4,в). При этом ПВХ оболочка несколько изменилась в цвете, потеряла блеск, но сохранила эластичность.

Наблюдается положительная корреляция, как для частичных емкостей, так и для тангенса угла диэлектрических потерь (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты взаимной парной корреляции между емкостью в исходном состоянии и емкостью после ускоренного старения ( $r_C$ ), между тангенсом угла диэлектрических потерь в исходном состоянии и после ускоренного старения ( $r_{\text{tg}\delta}$ )

Частота измерений $f$ , кГц	Условия ускоренного старения			
	336 часов в условиях 100 % влажности	1440 часов в естественных условиях	206 часов теплового старения при температуре 90 °С	456 часов теплового старения при температуре 90 °С
0,1	$r_C$			
	0.9998	0.9998	0.9999	0.9998
	$r_{\text{tg}\delta}$			
1	0.9001	0.8176	0.8578	0.7876
	$r_C$			
	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999
10	$r_{\text{tg}\delta}$			
	0.9810	0.9909	0.9876	0.9622
	$r_C$			
10	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999
	$r_{\text{tg}\delta}$			
	0.9111	0.9966	0.9942	0.9904

Значения выборочного линейного парного коэффициента корреляции К. Пирсона  $r$  большие для частичных емкостей и, практически, мало изменяются при разных частотах (см. табл. 1). Для тангенса угла диэлектрических потерь характерна более выраженная частотная зависимость  $r_{\text{tg}\delta}$ : коэффициент парной корреляции имеет большие значения при частоте 1 кГц и 10 кГц, что связано как с процессами поляризации, так и электропроводности в изоляции.

В качестве адекватного срока эксплуатации образца кабеля принимается расчётный срок эксплуатации, полученный на основании параметров режима ускоренного старения, адекватного старению кабелей в условиях эксплуатации (рис. 5). Время нормальной эксплуатации кабеля составляет 1,14 года и 6,8 года при рабочей температуре 60 °С и 40 °С

СООТВЕТСТВЕННО.

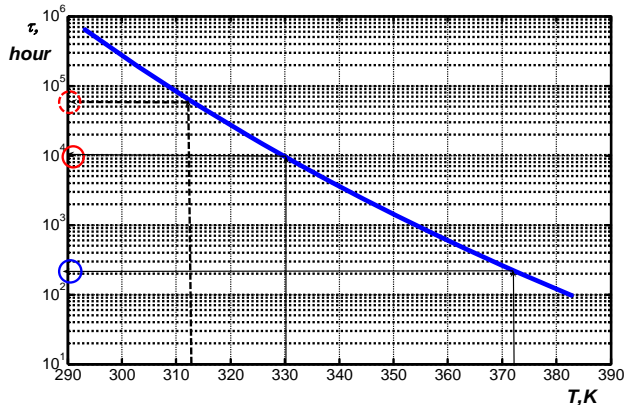


Рис. 5. К оценке срока службы кабеля при нормальных условиях эксплуатации

**Выводы.** Результаты ускоренного старения неэкранированного кабеля на основе неэкранированных витых пар с термопластичной полиэтиленовой изоляцией в защитной оболочке на основе ПВХ-пластиката в условиях повышенной влажности и температуры показывают, что конструкция устойчива к внешним воздействующим факторам. Длительная выдержка при температуре 90 °С эквивалентна эксплуатации при температуре 40 °С в течение 6,8 лет. При более высоких рабочих температурах срок эксплуатации кабеля существенно сокращается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60092-359:2014, Electrical Installations In Ships – Part 359: Sheathing Materials For Shipboard Power And Telecommunication Cables By IEC TC/SC 18A. – 50 p.
2. IEC 60332-1-2:2004, Tests on electric cables under fire conditions – Part 1: Test on a single vertical insulated wire or cable.
3. Безпрозванных А.В., Набока Б.Г., Морозова Е.В. Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения // Электротехніка і електромеханіка. – 2006. – №3. – С. 82-86. doi: 10.20998/2074-272X.2006.3.16.
4. Безпрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке // Электричество. – №1. – 2010. – С. 48-54.
5. Безпрозванных А. В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений // Технічна електродинаміка. – 2008. – №3. – С. 30-36.

#### REFERENCES

1. IEC 60092-359:2014, Electrical Installations In Ships – Part 359: Sheathing Materials For Shipboard Power And Telecommunication Cables By IEC TC/SC 18A. 50 p.
2. IEC 60332-1-2:2004, Tests on electric cables under fire conditions – Part 1: Test on a single vertical insulated wire or cable.
3. Bezprozvannyh G.V., Naboka B.G., Morozova E.V. Radiating resistance of common commercial cables of internal laying. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.3, pp. 82-86. doi: 10.20998/2074-272X.2006.3.16. (Rus).
4. Bezprozvannyh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Examination of the three-phase insulation of cables in a metal shell. *Electricity*, 2010, no.1, pp. 48-54. (Rus).

5. Bezprozvannyh A.V. The electrical scanning of the transverse structure by multicore cables by the method of cumulative measurements. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2008, no.3, pp. 30-36. (Rus).

Поступила (received) 25.08.2017

Безпрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Мирчук Игорь Анатольевич<sup>2</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 057 7076010,  
e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Приватное акционерное общество  
«Украинский научно-исследовательский институт  
кабельной промышленности»,  
71101, Запорожская обл., Бердянск, ул. Промышленная, 2-Р,  
тел/phone +38 066 8288554,  
e-mail: garik710@ukr.net

G.V. Bezprozvannyh<sup>1</sup>, I.A. Mirchuk<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Private Joint Stock Company «Ukraine Scientific-Research  
Institute of Cable Industry»,  
2-Р, Promychnennaya Str., Berdyansk, Zaporozhye Region,  
71101, Ukraine.

**The evaluation of possibility of normal operation of cables based on twisted pairs with PVC jacket under the conditions of high humidity and temperature.**

**Introduction.** Development of cables for structured cabling systems based on twisted pairs for shipbuilding is carried out in two main directions: increasing the fire safety of cables and increasing the long-term permissible operating temperature by using new, more heat-resistant, electrical insulating materials.

**Purpose.** Substantiation of the possibility of unshielded cables on the basis of unshielded twisted pairs with thermoplastic polyethylene insulation in PVC protective jacket in conditions of high humidity and high operating temperatures on the basis of the results of accelerated aging. **Methodology.** The cycle of aging under conditions of increased humidity is performed for 336 hours. Then the sample was under natural drying conditions for 1440 hours. Thermal aging in a thermostat at 90 °C was carried out in two stages: first – for 206 hours, the second – for 260 hours. In the initial state and after accelerated aging, measurements of the capacitance and tangent of the dielectric loss angle of all the insulating gaps at frequencies of 100 Hz, 1 and 10 kHz were performed. **Results.** According to the results of accelerated aging under conditions of high humidity and temperature, it is established that the design of an unshielded cable based on unshielded twisted pairs with thermoplastic polyethylene insulation in a protective coating based on PVC-plastic is resistant to external influencing factors. **Practical value.** The prolonged holding at temperature of 90 °C is equivalent to operation at temperature of 40 °C for 6.8 years. At higher operating temperatures, the lifetime of the cable is significantly reduced. References 5, tables 1, figures 5.

**Key words:** cables based on twisted pairs for shipbuilding, accelerated aging, hygroscopic moistening, thermal aging, partial capacitance, tangent of the dielectric loss angle, service life.



В.Г. Жекул, А.П. Смирнов, Э.И. Тафтай, О.В. Хвощан, И.С. Швец

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОДНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

*На підставі проведеного аналізу ринку приладів, що вимірюють імпульсний тиск, обрана конструкція і схемне рішення стійкого до електричних перешкод хвилевідного датчика тиску, який забезпечує стабільність і достовірність показань на близькій відстані від каналу високовольтного електричного розряду в замкненому об'ємі рідини. Розроблено хвилевідний датчик імпульсного тиску ДТХ-1 з вимірювальним шлейфом, який дозволяє досліджувати спектральні характеристики хвиль тиску в замкнених об'ємах рідини при гідростатичному тиску до 20 МПа і температурі до 80 °С. Датчик може бути застосований для дослідження хвиль тиску з максимальним амплітудним значенням до 150 МПа і довжиною до 80 мкс. Згідно результатів тарировки з використанням вторинного еталону, чутливість датчика ДТХ-1 з вимірювальним трактом – 0,0346 В/МПа. Бібл. 10, рис. 7.*

*Ключові слова:* п'єзоелектричний датчик, імпульсний тиск, електричні характеристики, високовольтний розряд, замкнений об'єм рідини.

*На основании проведенного анализа рынка приборов, измеряющих импульсное давление, выбрана конструкция и схемное решение помехоустойчивого волноводного датчика давления, обеспечивающего стабильность и достоверность показаний на близком расстоянии от канала высоковольтного электрического разряда в замкнутом объеме жидкости. Разработан волноводный датчик импульсного давления ДТХ-1 с измерительным шлейфом, позволяющий исследовать спектральные характеристики волн давления в закрытых объемах жидкости при гидростатическом давлении до 20 МПа и температуре до 80 °С. Датчик может быть применен для изучения волн давления с максимальным амплитудным значением до 150 МПа и длительностью до 80 мкс. Согласно результатам тарировки с использованием вторичного эталона, чувствительность датчика ДТХ-1 с измерительным трактом – 0,0346 В/МПа. Библ. 10, рис. 7.*

*Ключевые слова:* пьезоэлектрический датчик, импульсное давление, электрические характеристики, высоковольтный разряд, замкнутый объем жидкости.

**Введение.** Множество современных технологий (в частности, электроразрядная) использует волну давления в качестве определяющего фактора воздействия на обрабатываемый объект. Исследование спектральных характеристик таких волн представляет огромный интерес и является актуальной задачей для любой промышленно развитой страны с развитым научным потенциалом.

Исследования характеристик волн давления, которые генерируются, например, электрическим разрядом в жидкости, предусматривают регистрацию полного профиля волны давления в заданной точке объема жидкости. Для этих целей уже давно используются различного рода преобразователи давления в электрический сигнал [1-6]. Наибольшее распространение в технике измерения импульсных давлений получили преобразователи на основе природных (кварц, турмалин, ниобат лития и др.), искусственно создаваемых и специально поляризуемых в электрическом поле пьезоматериалов (пьезокерамика типа титаната бария, титаната свинца, цирконата свинца и др.).

В Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, который занимается разработкой и внедрением различных электроразрядных технологий, при выполнении исследований уже много лет используются различные средства регистрации импульсных давлений. Среди них – пьезоэлектрические датчики давления известной в области создания измерительной акустической аппаратуры датской фирмы «Брюль и Кьер» [7]. Помимо этого, в ИИПТ разрабатывались и изготавливались собственные датчики давления на основе различных типов пьезокерамики [5, 8]. Большинство проводимых ранее исследований были связаны с измерением давлений

в открытых объемах жидкости на значительных расстояниях от канала разряда. Это обстоятельство существенно снижало требования к конструкции датчика и некоторым его параметрам (амплитуде измеряемого импульсного давления, уровню допускаемого статического давления жидкости и др.).

В рамках данной работы следовало разработать датчик давления для измерения импульсного давления в закрытом объеме воды при повышенных гидростатических давлениях. Одним из применений такого датчика является исследование влияния высоковольтного импульсного разряда на повышение притока полезных ископаемых и питьевой воды в скважинах [9]. Для тарировки и испытаний разрабатываемого датчика использовалась разрядная камера высокого давления (рис. 1), позволяющая поддерживать высокое гидростатическое давление и близость приемной части датчика к каналу разряда (источнику гидродинамического возмущения – волны давления). Внутренний диаметр разрядной камеры составляет 120 мм.

Близость к источнику импульсного давления, необходимость гальванической развязки пьезоэлемента датчика и контура электрической цепи, по которому протекает импульсный ток, достигающий десятков килоампер, наличие жесткой отражающей стенки камеры, на которой следует крепить датчик, повышает уровень требований к нему, что делает невозможным применение большинства доступных датчиков давления, в том числе, гидрофонов фирмы «Брюль и Кьер».

Выполненные маркетинговые исследования позволили сделать вывод о принципиальной возможности использования в таких условиях двух датчиков импульсного давления: DPX 101-5K фирмы «OMEGA»

© В.Г. Жекул, А.П. Смирнов, Э.И. Тафтай, О.В. Хвощан, И.С. Швец

(США) с чувствительностью 0,1552 В/МПа, допустимой амплитудой импульсного давления до 100 МПа и PS-02 фирмы ООО «ГлобалТест» (Россия) с чувствительностью 0,0735 В/МПа, допустимой амплитудой импульсного давления до 250 МПа.



Рис. 1. Разрядная камера высокого давления

В процессе тестовых испытаний приобретенных датчиков, осуществляемых электрическими разрядами малой мощности в разрядной камере высокого давления, обнаружилась их существенная чувствительность к «токовой помехе», возникающей из-за электромагнитных наводок от высоковольтного контура. Такой термин для данной помехи введен вследствие ее корреляции по времени и фазе с осциллограммой тока, протекающего в разрядном контуре.

Все попытки снизить уровень помехи за счет дополнительных мер (приведения в одну точку заземления разрядных и измерительных цепей, использование двойных экранов в измерительных трассах, высокочастотной фильтрацией на ферритовых кольцах) не принесли положительного эффекта.

Осциллограммы с «токовой наводкой» представлены на рис. 2. В связи с низкой чувствительностью кварцевых преобразовательных элементов этих датчиков амплитуда полезного сигнала измерялась единицами вольт. Фактически считываемая по осциллограммам амплитуда «токовой наводки» находилась в диапазоне единиц вольт, и была соизмерима или даже превышала полезный сигнал с датчика импульсного

давления. Это позволило сделать вывод, что данные датчики стандартной конструкции не могут использоваться в условиях сильных электромагнитных полей, которые сопровождают разряд.

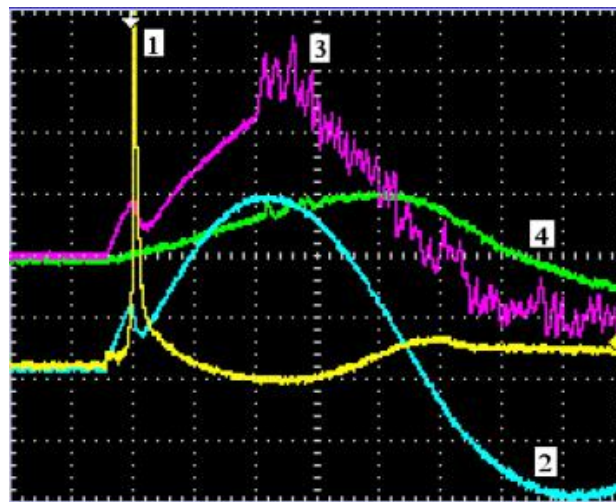


Рис. 2. Осциллограмма импульса давления и электрических характеристик при электрическом разряде, инициированном тонким проводником:

1 – напряжение на разрядном промежутке; 2 – ток в канале разряда; 3 – волна давления, генерируемая электрическим разрядом в жидкости, измеренная с помощью датчика давления DPX 101-5k; 4 – волна давления, генерируемая электрическим разрядом в жидкости, измеренная с помощью датчика давления PS-02

Исходя из вышеизложенного, существует необходимость в разработке датчика давления, обеспечивающего достоверность полученных результатов измерений и надежность функционирования в условиях сильных электромагнитных полей.

**Целью работы** являлась разработка помехоустойчивого пьезоэлектрического волноводного датчика для измерения импульсного давления на близком расстоянии от канала высоковольтного разряда в замкнутом объеме жидкости.

**Результаты проектирования датчика.** При разработке датчика давления, отвечающего вышеизложенным требованиям, в качестве прототипа был использован волноводный датчик давления ВДД [5], разработанный ранее в ИИПТ.

Отличительной особенностью разрабатываемого датчика давления должна быть высокая чувствительность, благодаря которой датчиком генерируется полезный сигнал амплитудой от десятков до сотен вольт. Однако сигнал такой амплитуды представляет опасность как для регистрирующего осциллографа, так и для преобразовательного элемента датчика.

Для снижения уровня измерительного сигнала был разработан измерительный тракт, электрическая схема которого представлена на рис. 3.

При попадании на датчик волны давления  $P$  на его пьезокерамическом элементе электрической емкостью  $C_1$  наводится электрический заряд  $Q_1$ , при этом разность потенциалов  $U_1$  на его обкладках определяется соотношением

$$U_1 = Q_1 / C_1. \quad (1)$$

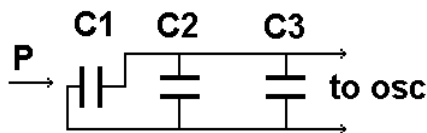


Рис. 3. Электрическая схема измерительного тракта:  $C_1$  – электрическая емкость измерительного элемента (пьезокерамики) датчика давления;  $C_2$  – электрическая емкость измерительного коаксиального кабеля;  $C_3$  – электрическая емкость дополнительного конденсатора;  $P$  – волна давления, генерируемая электрическим разрядом в жидкости; *to osc* – к осциллографу

В случае подключения к обкладкам датчика коаксиального кабеля емкостью  $C_2$  и дополнительного конденсатора емкостью  $C_3$  тот же электрический заряд  $Q_1$  обеспечит разность потенциалов на выходе схемы  $U_{osc}$ , определяемую по соотношению

$$U_{osc} = Q_1 / (C_1 + C_2 + C_3). \quad (2)$$

Коэффициент  $k$ , выражающий степень ослабления полезного сигнала и наводок с датчика, определяется как отношение

$$k = U_1 / U_{osc} = (C_1 + C_2 + C_3) / C_1. \quad (3)$$

Анализ показал, что использование в качестве преобразовательного элемента датчика пьезокерамики ЦТС-19 позволяет обеспечить допустимые значения  $U_{osc}$  в диапазоне измерений импульсного давления до 150 МПа при величине  $k = 450$ .

Проведенный комплекс исследований позволил предложить конструкцию волноводного датчика давления ДТХ-1 [10], приведенную на рис. 4.

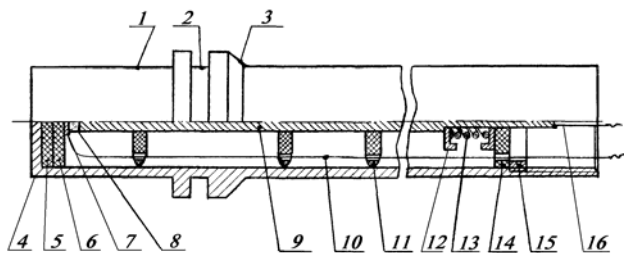


Рис. 4. Конструкция волноводного датчика давления ДТХ-1

Пьезоэлектрический волноводный датчик импульсного давления ДТХ-1 состоит из металлического корпуса 1, на котором есть канавка 2 под уплотнительное кольцо, упорной поверхности 3, приемного доньшка-мембраны 4, прокладки из вибродемпфирующего материала 5, прокладки из диэлектрического материала с высокой электрической прочностью 6, токосъемника 7, пьезоэлемента 8, медного волновода 9, проводников 10, 16, резиновых амортизаторов 11, шайбы 12, пружины 13, изоляционной шайбы 14, гайки 15.

Датчик импульсного давления работает следующим образом.

С помощью дополнительных элементов крепления датчик размещают в специальном отверстии технологической камеры соосно с направлением прохождения исследуемой волны давления. Металлический корпус 1 датчика образует контакт с камерой при механическом воздействии элементов крепления на упорную поверхность 3, а уплотнительное резиновое кольцо в канавке 2 дает возможность измере-

ния в камере, заполненной жидкостью как при атмосферном, так и при повышенном гидростатическом давлении.

Выделение энергии в жидкости при проведении определенных технологических операций (например, в разрядно-импульсных технологиях) ведет к возникновению гидродинамического возмущения и распространению волн давления. Волна давления поочередно проходит через слой жидкости в технологической камере, приемное доньшко-мембрану 4 датчика, прокладку из вибродемпфирующего материала 5, прокладку из диэлектрического материала с высокой электрической прочностью 6, токосъемник 7, пьезоэлемент 8, медный волновод 9.

Выбор толщины и типа материала прокладки из вибродемпфирующего материала 5 позволяет ослабить амплитуду волны давления и увеличить верхний предел измерения датчика давления. Наличие прокладки из диэлектрического материала с высокой электрической прочностью 6 позволяет избежать электрического контакта между корпусом 1 с приемным доньшком-мембраной 4 и пьезоэлементом 8.

При воздействии волны давления на пьезоэлемент 8 на его торцах вследствие явления пьезоэффекта появляется разность потенциалов. Напряжение с помощью припаянных к пьезоэлементу 8 медного волновода 9, токосъемника 7 и проводников 10, 16 подается на измерительный тракт. Длина медного волновода 9 выбирается из условия отсутствия влияния на пьезоэлемент 8 волн давления, отраженных от его торца, что позволяет исследовать волны давления длительностью до 80 мкс.

Центровка волновода 9 в цилиндрическом корпусе 1 осуществлено резиновыми амортизаторами 11. Плотность прилегания поверхностей приемного доньшка-мембраны 4, прокладок 5 и 6, токосъемника 7 обеспечивает механическое воздействие пружины 13 с помощью шайбы 12, изоляционной шайбы 14 и гайки 15.

В качестве материала изоляционных прокладок был использован паронит ПМБ ГОСТ 481-80 и полиэтилентерефталат ПЭТ-Э ГОСТ 24234-80, в качестве материала пьезоэлемента – ЦТС-19 ГОСТ 13927-74.

Внешний вид волноводного датчика давления ДТХ-1 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид волноводного датчика давления ДТХ-1

Волноводный датчик давления ДТХ-1 обладает значительно большей чувствительностью (примерно на два порядка) по сравнению с датчиками давления DPX 101-5K и PS-02, благодаря этому уровень полезного сигнала более чем на порядок превышает уровень «токовых наводок». Для примера на рис. 6 приведена осциллограмма тока, напряжения и сигнала с датчика ДТХ-1 при электрическом взрыве медного проводника диаметром 0,14 мм в воде.

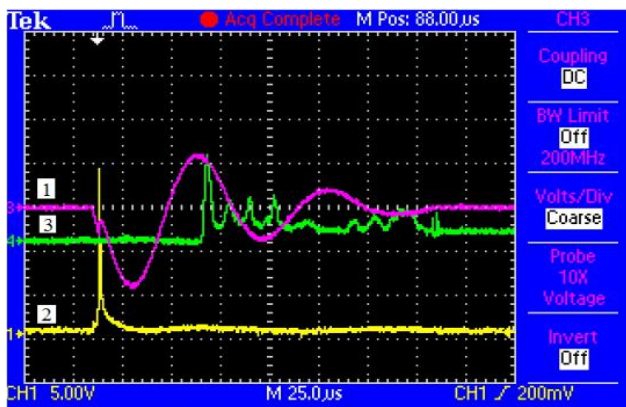


Рис. 6. Осциллограмма импульса давления и электрических характеристик при электрическом взрыве медного проводника (диаметр проводника – 0,14 мм; длина – 0,038 м; зарядное напряжение – 10 кВ; запасенная энергия – 1 кДж; гидростатическое давление – 20 МПа): 1 – ток в канале разряда (инвертированный); 2 – напряжение на разрядном промежутке; 3 – сигнал с датчика ДТХ-1

### Тарировка волноводного датчика давления.

Тарировка датчика ДТХ-1 выполнялась путем сравнения тарировочных (опорных) импульсов давления с сигналами, полученными с помощью датчика ДТХ-1. По результатам сравнения выполнялся расчет коэффициента чувствительности датчиков.

В качестве тарировочных импульсов давления использовались данные, полученные с помощью вторичного эталона (датчика давления DPX 101-5К) при следующих параметрах установки: зарядное напряжение конденсаторной батареи – 15 кВ; емкость конденсаторной батареи – 2,26 мкФ; индуктивность цепи – 4,29 мкГн. При данных параметрах контура удалось отделить во времени «токовую помеху» и полезный сигнал датчика DPX 101-5К.

Инициирование разряда осуществлялось медным проводником диаметром 0,14 мм и длиной 50 мм, что повышало стабильность амплитуды волны давления. Гидростатическое давление в камере поддерживалось на уровне 10 МПа. Датчиком давления ДТХ-1 фиксировались импульсы от пяти разрядов. Полученные результаты подвергались статистической обработке, находилось среднее значение, по которому определялась чувствительность тарированного датчика.

Тарировка ДТХ-1 проводилась совместно с измерительным трактом (см. рис. 3), имеющим следующие параметры:

- электрическая емкость изготовленного датчика давления ДТХ-1 C1 – 150 пФ;
- электрическая емкость измерительного кабеля РК 50-2-16 C2 длиной 10 м – 1166 пФ;
- электрическая емкость нагрузочного конденсатора C3 – 66340 пФ.

Таким образом, тарировка датчика с трактом заключалась в определении его чувствительности при воздействии импульса давления известной амплитуды (полученного на сертифицированном датчике).

На рис. 7 приведены совмещенные временные профили опорного импульса (1) и профиля импульса, регистрируемого волноводным датчиком ДТХ-1 (2). Для удобства сравнения осциллограмм амплитуды

обоих сигналов приведены к одному значению. Приведенные результаты (см. рис. 7) показали, что совпадение сигналов как по фронту нарастания импульса давления, так и по длительности его спада удовлетворительное.

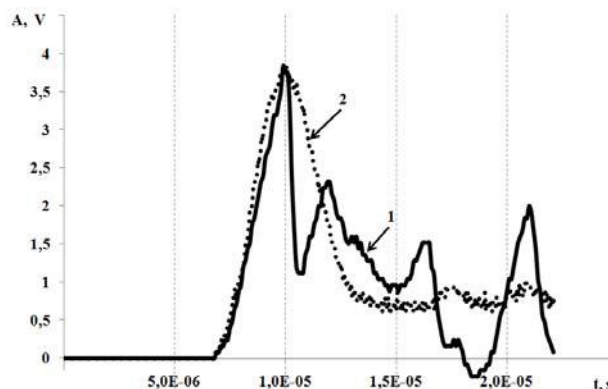


Рис. 7. Профили импульсов волны давления: 1 – опорный импульс давления; 2 – импульс волноводного датчика давления ДТХ-1

Согласно результатам тарировки, чувствительность разработанного датчика ДТХ-1 с измерительным трактом – 0,0346 В/МПа.

Проведенные лабораторные испытания показали стабильность чувствительности датчика при измерении волн давления с амплитудой до 150 МПа и долгосрочной работе в диапазоне гидростатических давлений (0,1-20) МПа, температур (10-80) °С.

Разработанные датчики давления ДТХ-1 использовались для регистрации импульсных давлений при выполнении ряда научно-исследовательских работ в ИИПТ НАН Украины, опытный образец был поставлен исследователю центру во Франции.

### Выводы.

1. Предложена конструкция и схемное решение помехоустойчивого волноводного датчика давления для электроразрядных технологий, обеспечивающего стабильность и достоверность показаний на близком расстоянии от канала высоковольтного разряда в замкнутом объеме жидкости.

2. Разработан волноводный датчик импульсного давления ДТХ-1 с измерительным шлейфом, позволяющий исследовать спектральные характеристики волн давления при высоковольтном электрическом разряде в закрытых объемах жидкости при гидростатическом давлении до 20 МПа и температуре до 80 °С.

3. Разработанный датчик может быть применен для изучения волн давления с максимальным амплитудным значением до 150 МПа. Согласно результатам тарировки, чувствительность разработанного датчика ДТХ-1 с измерительным трактом – 0,0346 В/МПа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д. Датчики: справочное пособие. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
2. Fomin N.A. Diagnostics of Rapidly Proceeding Processes in Fluid and Plasma Mechanics // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2008. – vol.81. – no.1. – pp. 68-81. doi: 10.1007/s10891-008-0010-y.

3. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах / под ред. А.Е. Панича. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006.
4. Шамраков А.Л. Перспективы развития пьезоэлектрических датчиков быстропеременных, импульсных и акустических давлений // Датчики и системы. – 2005. – №9. – С. 4-8.
5. Бескаравайный Н.М., Поздеев В.В. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах. – Киев: Наукова думка, 1981. – 190 с.
6. Elkarous L., Robbe C., Pirlot M., Golinval J.-C. Dynamic calibration of piezoelectric transducers for ballistic high-pressure measurement // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2016. – vol.7. – no.2. – p. 201. doi: 10.1051/ijmqe/2016004.
7. <https://www.bksv.com/en>.
8. Poklonov S.G., Zhekul V.G., Smirnov A.P. Technique and results of experimental investigations of the influence of the elastic barrier on pressure wave parameters in electric discharge in water // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2007. – vol.43. – no. 5. – pp. 350-353. doi: 10.3103/S1068375507050079.
9. Швець І., Жекул В., Поклонов С., Смірнов О., Мельхер Ю., Литвинов В., Конотоп С., Хвощан О., Залога С. Електрозорядний спосіб відновлення продуктивності артезіанських свердловин // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2013. – №3. – С. 200-205.
10. Пат. 115393 Україна, МПК G01L 9/08, G01L 23/10, H01L 41/08. П'єзоелектричний хвилевідний датчик імпульсного тиску / Тафтаї Е.І., Жекул В.Г., Смірнов О.П., Хвощан О.В., Швець І.С. Ін-т імпульсних процесів і технологій. – № у 2016 11774; Заявл. 21.11.2016; Опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7.

#### REFERENCES

1. Sharapov V.M., Polishchuk E.S., Koshevoi N.D. *Datchiki: spravocnoe posobie* [Sensors: a reference book]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 624 p. (Rus).
2. Fomin N.A. Diagnostics of Rapidly Proceeding Processes in Fluid and Plasma Mechanics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol.81, no.1, pp. 68-81. doi: 10.1007/s10891-008-0010-y.
3. Panich A.E. *P'ezoelektricheskoe priborostroenie: sbornik v 3 tomakh* [Piezoelectric instrument making: a collection in 3 volumes]. Rostov-na-Donu, SKNTs VSh Publ., 2006. (Rus).
4. Shamrakov A.L. Prospects for the development of piezoelectric sensors for fast-changing, pulsed and acoustic pressures. *Sensors and systems*, 2005, no.9, pp. 4-8. (Rus).
5. Beskaravainyi N.M., Pozdeev V.V. *Teoreticheskie osnovy izmereniia impul'snykh davlenii v zhidkikh sredakh* [Theoretical basis for measuring pulsed pressures in liquid media]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981. 190 p. (Rus).
6. Elkarous L., Robbe C., Pirlot M., Golinval J.-C. Dynamic calibration of piezoelectric transducers for ballistic high-pressure measurement. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2016, vol.7, no.2, p. 201. doi: 10.1051/ijmqe/2016004.
7. Available at: <https://www.bksv.com/en> (accessed 22 July 2016).
8. Poklonov S.G., Zhekul V.G., Smirnov A.P. Technique and results of experimental investigations of the influence of the elastic barrier on pressure wave parameters in electric discharge in water. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2007, vol.43, no. 5, pp. 350-353. doi: 10.3103/S1068375507050079.
9. Shvets I., Zhekul V., Poklonov S., Smirnov O., Mel'kher Ju., Litvinov V., Konotop S., Khvoshchan O., Zaloga Je. Electrodischarge method of restoration of productivity of artesian well. *Ukrainian Black Sea region agrarian science*, 2013, no.3, pp. 200-205. (Ukr).

10. Taftaj E.I., Zhekul V.G., Smirnov O.P., Khvoshchan O.V., Shvets I.S. *P'jezoelektrychnyj hvil'veidnyj datchyk impul'snogo tysku* [Piezoelectric waveguide impulse pressure sensor] Patent UA, no. u 2016 11774, 2017. (Ukr).

Поступила (received) 03.08.2017

Жекул Василий Григорьевич<sup>1</sup>, к.т.н., ст. науч. сотр.,  
Смирнов Алексей Петрович<sup>1</sup>, к.т.н., ст. науч. сотр.,  
Тафтаї Едуард Іванович<sup>1</sup>, мл. науч. сотр.,  
Хвощан Олег Вильямович<sup>1</sup>, к.т.н., науч. сотр.,  
Швець Іван Сафронович<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., вед. науч. сотр.  
<sup>1</sup> Інститут імпульсних процесів і технологій (ІІПТ)  
НАН України,  
54018, Николаєв, просп. Богоявленський, 43-А,  
тел/phone +380 512 224113,  
e-mail: Smirnovap1978@gmail.com, Khvoshchan@gmail.com

V.G. Zhekul<sup>1</sup>, O.P. Smirnov<sup>1</sup>, E.I. Taftaj<sup>1</sup>, O.V. Khvoshchan<sup>1</sup>,  
I.S. Shvets<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) of NAS  
of Ukraine,

43-A, Bohoyavlensky Ave., Mykolayiv, 54018, Ukraine.

**Piezoelectric waveguide sensor for measuring pulse pressure in closed liquid volumes at high voltage electric discharge.**

**Purpose.** Investigations of the characteristics of pressure waves presuppose the registration of the total profile of the pressure wave at a given point in space. For these purposes, various types of «pressure to the electrical signal» transmitters (sensors) are used. Most of the common sensors are unsuitable for measuring the pulse pressure in a closed water volume at high hydrostatic pressures, in particular to study the effect of a powerful high-voltage pulse discharge on increasing the inflow of minerals and drinking water in wells. The purpose of the work was to develop antijamming piezoelectric waveguide sensor for measuring pulse pressure at a close distance from a high-voltage discharge channel in a closed volume of a liquid. **Methodology.** We have applied the calibration method as used as a secondary standard, the theory of electrical circuits. **Results.** We have selected the design and the circuit solution of the waveguide pressure sensor. We have developed a waveguide pulse-pressure sensor DTX-1 with a measuring loop. This sensor makes it possible to study the spectral characteristics of pressure waves of high-voltage pulse discharge in closed volumes of liquid at a hydrostatic pressure of up to 20 MPa and a temperature of up to 80 °C. The sensor can be used to study pressure waves with a maximum amplitude value of up to 150 MPa and duration of up to 80 μs. According to the results of the calibration, the sensitivity of the developed sensor DTX-1 with a measuring loop is 0.0346 V/MPa. **Originality.** We have further developed the theory of designing the waveguide piezoelectric pulse pressure sensors for measuring the pulse pressure at a close distance from a high-voltage discharge channel in a closed fluid volume by controlling the attenuation of the amplitude of the pressure signal. **Practical value.** We have developed, created, calibrated, used in scientific research waveguide pressure pulse sensors DTX-1. We propose sensors DTX-1 for sale in Ukraine and abroad. Sensors DTX-1 can be used to study pressure waves with a maximum amplitude value of up to 150 MPa in closed fluid volumes at a hydrostatic pressure of up to 20 MPa and a temperature of up to 80 °C. References 10, figures 7.

**Key words:** piezoelectric sensor, pulse pressure, electrical characteristics, high-voltage discharge, closed volume of liquid.

В.Ю. Розов, Д.Е. Пелевин, Е.Д. Пелевина

## ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГОРОДСКИХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И МЕТОДЫ ЕГО НОРМАЛИЗАЦИИ

*Метою роботи є дослідження зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій (ТП) і методів його зменшення в розташованих поблизу житлових приміщеннях до нормативного рівня. Виконано комплексні експериментальні дослідження магнітного поля частотою 50 Гц, що створюється типовими міськими ТП у зовнішньому середовищі. Показано, що індукція магнітного поля в розташованих поблизу житлових приміщеннях не перевищує нормативного рівня (0,5 мкТл), якщо приміщення розташовані на відстанях більше 8 м від корпусу ТП. Запропоновано мультидипольну математичну модель для розрахунку зовнішнього магнітного поля ТП і наведено приклад її практичного використання для розрахунку індукції зовнішнього магнітного поля, що створюється в прилеглому житловому приміщенні ТП потужністю 715 кВА, що вбудована в житловий будинок. Наведено порівняння результатів розрахунку і експерименту. Показано, що вбудовані в житлові будинки ТП можуть створювати в сусідніх житлових приміщеннях небезпечно для здоров'я населення магнітне поле з індукцією 1,5-7 мкТл, що в 3-14 разів перевищує його нормативний рівень. Запропоновано методи нормалізації зовнішнього магнітного поля вбудованих ТП, що ґрунтуються на вдосконаленні конструкції ТП, а також методах зовнішнього пасивного і активного екранування (компенсації). Бібл. 22, Рис. 9.*

*Ключові слова:* трансформаторна підстанція, зовнішнє магнітне поле, житлові приміщення, мультидипольна модель, методи нормалізації.

*Целью работы является исследование внешнего магнитного поля городских трансформаторных подстанций (ТП) и методов его уменьшения в близлежащих жилых помещениях до нормативного уровня. Выполнены комплексные экспериментальные исследования магнитного поля частотой 50 Гц, создаваемого типовыми городскими ТП во внешней среде. Показано, что индукция магнитного поля в близлежащих жилых помещениях не превышает нормативного уровня (0,5 мкТл), если помещения расположены на расстояниях более 8 м от корпуса ТП. Предложена мультидипольная математическая модель для расчета внешнего магнитного поля ТП и приведен пример ее практического использования для расчета индукции внешнего магнитного поля, создаваемого в близлежащем жилом помещении ТП мощностью 715 кВА, встроенной в жилой дом. Приведено сравнение результатов расчета и эксперимента. Показано, что встроенные в жилые дома ТП могут создавать в соседних жилых помещениях опасное для здоровья населения магнитное поле с индукцией 1,5-7 мкТл, что в 3-14 раз превышает его нормативный уровень. Предложены методы нормализации внешнего магнитного поля встроенных ТП, основанные на совершенствовании конструкции ТП, а также методах внешнего пассивного и активного экранирования (компенсации). Библ. 22, рис. 9.*

*Ключевые слова:* трансформаторная подстанция, внешнее магнитное поле, жилые помещения, мультидипольная модель, методы нормализации.

**Введение.** Магнитное поле (МП) промышленной частоты 50 Гц наиболее опасно для здоровья людей даже при его слабом, но длительном воздействии [1]. Основными источниками, создающими такое МП внутри жилых помещений, являются расположенные в жилых зонах объекты электроэнергетики – воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), а также городские трансформаторные подстанции (ТП).

Предельно допустимый уровень (ПДУ) индукции МП 50 Гц для населения, создаваемого электроустановками, регламентирован в [2] и составляет 10 мкТл на территории жилой застройки и 0,5 мкТл внутри жилых помещений.

Наиболее остро проблема нормализации внешнего магнитного поля (ВМП) ТП стоит в жилых домах со встроенными ТП [2, 6], когда расстояния между ТП и жилыми помещениями уменьшается до нескольких метров. Такие дома (рис. 1) достаточно широко распространены в Украине и других странах. Кроме того, встроенные ТП начали широко использоваться в мире для электроснабжения секций из 10-20 этажей в современных сверхвысотных жилых домах [7] с целью уменьшения потерь электроэнергии. Проблема нормализации их МП также требует своего решения.

В настоящее время наиболее полно исследовано МП ЛЭП и определены методы его уменьшения до

безопасного для населения уровня [3-5]. В тоже время исследованию ВМП ТП не уделялось должного внимания, хотя в отдельных случаях – при приближении ТП к жилым помещениям, их МП может превышать ПДУ.

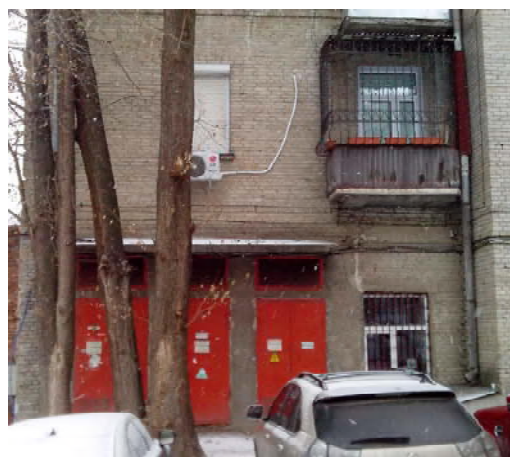


Рис. 1. Типичный жилой дом со встроенной ТП (г Харьков, ул. Данилевского, 19)

Таким образом, ВМП ТП в настоящее время исследовано не достаточно, что затрудняет решение актуальной и социально значимой проблемы нормализации

© В.Ю. Розов, Д.Е. Пелевин, Е.Д. Пелевина

МП частотой 50 Гц в помещениях жилых домов, расположенных вблизи ТП.

**Целью работы** является исследование ВМП городских ТП и методов его уменьшения до нормативного уровня в близлежащих жилых помещениях.

**ТП как источник МП.** Городские ТП осуществляют электроснабжение жилых домов. Они выполняют функции преобразования трехфазного высокого напряжения 6 (10) кВ в напряжение 0,38 кВ и распределения электроэнергии напряжением 380 В (220 В) конечным потребителям [2, 6]. Типовые городские ТП (рис. 2) имеют мощность от 100 кВА до 1400 кВА и комплектуются одним либо двумя понижающими трехфазными трансформаторами с заземленной нейтралью. ТП содержат секционированные распределительные устройства (РУ) из токопроводов (шин, кабелей) с необходимой коммутационной, защитной и измерительной аппаратурой.



а



б

Рис. 2. Конструктивное исполнение городской ТП (а) и ее РУ (б)

Основными источниками ВМП ТП являются трехфазные токопроводы РУ, каждый из которых при симметричной нагрузке разных фаз, в общем случае образует три токовых контура [5, 8, 9], создающих МП.

Трехфазные трансформаторы РУ имеют симметричную конструкцию, теоретически исключающую создание ВМП [8]. Практически они создают ВМП, вызванное технологическими отклонениями от симметрии [8, 10]. Индукция этого МП незначительна и не превышает 10 % от суммарного ВМП ТП. ВМП трансформатора, имеет дипольный характер [9], быстро спа-

дает при удалении от ТП (рис. 3) и при дальнейшем анализе не учитывается.

Остальные элементы РУ, в том числе коммутационная, защитная и измерительная аппаратура ТП, а также входные и выходные витые трехфазные кабели, также практически не влияют на ВМП ТП [9].

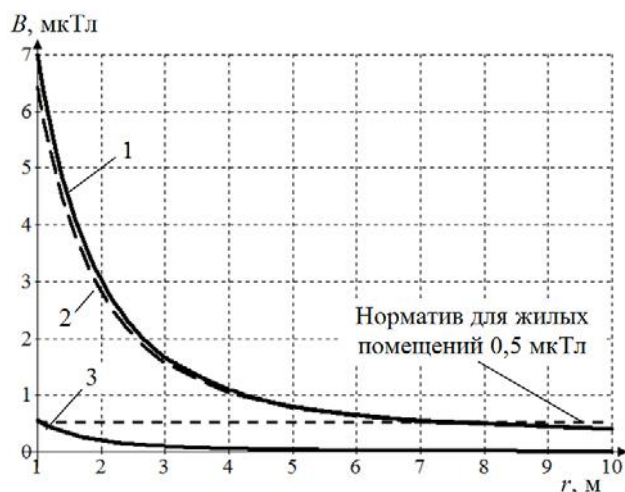


Рис. 3. Характерное спадание индукции МП ТП типа К-42-630 при удалении на расстояние  $r$  от ее корпуса (1 – суммарное МП ТП; 2 – МП токопроводов; 3 – МП трансформатора)

Таким образом, ВМП ТП определяется МП трехфазных токопроводов ТП, которые могут быть представлены в соответствии с рис. 4.

#### Экспериментальные исследования ВМП ТП.

Экспериментальные исследования ВМП ТП выполнены для 42 городских ТП г. Харькова номинальной мощностью ( $S_{ном}$ ) от 100 до 1260 кВА. Исследовано 36 ТП, расположенных в отдельных строениях (внутри микрорайонов), и 6 ТП, встроенных в жилые дома.

В основу исследований положены прямые измерения действующего значения индукции переменного МП в ограниченном количестве точек с использованием векторных магнитометров типа Magnetoscop 1.069 фирмы Foerster (диапазон измерений индукции МП 0-600 мкТл, относительная погрешность 2,5 %) и EMF-828 (диапазон измерения индукции 0-2000 мкТл, относительная погрешность 4 %).

Индукция МП в  $i$ -й точке измерения определялась по измерениям индукции МП в трех ортогональных положениях датчика магнитометра по формуле

$$B_i = \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2 + B_{zi}^2}, \quad (1)$$

где  $B_{xi}$ ,  $B_{yi}$ ,  $B_{zi}$  – измеренное действующее значение пространственных компонент индукции МП в  $i$ -й точке измерений по осям датчиков магнитометра  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Начало координатной сетки совмещалось с поверхностью корпуса ТП. Измерения МП проводились при удалении от ТП в горизонтальном (вертикальном) направлении, соответствующем максимальным значениям МП с фиксацией фактических токов в токопроводах ТП. Результирующее значение индукции МП ТП приводилось к номинальной мощности ТП.

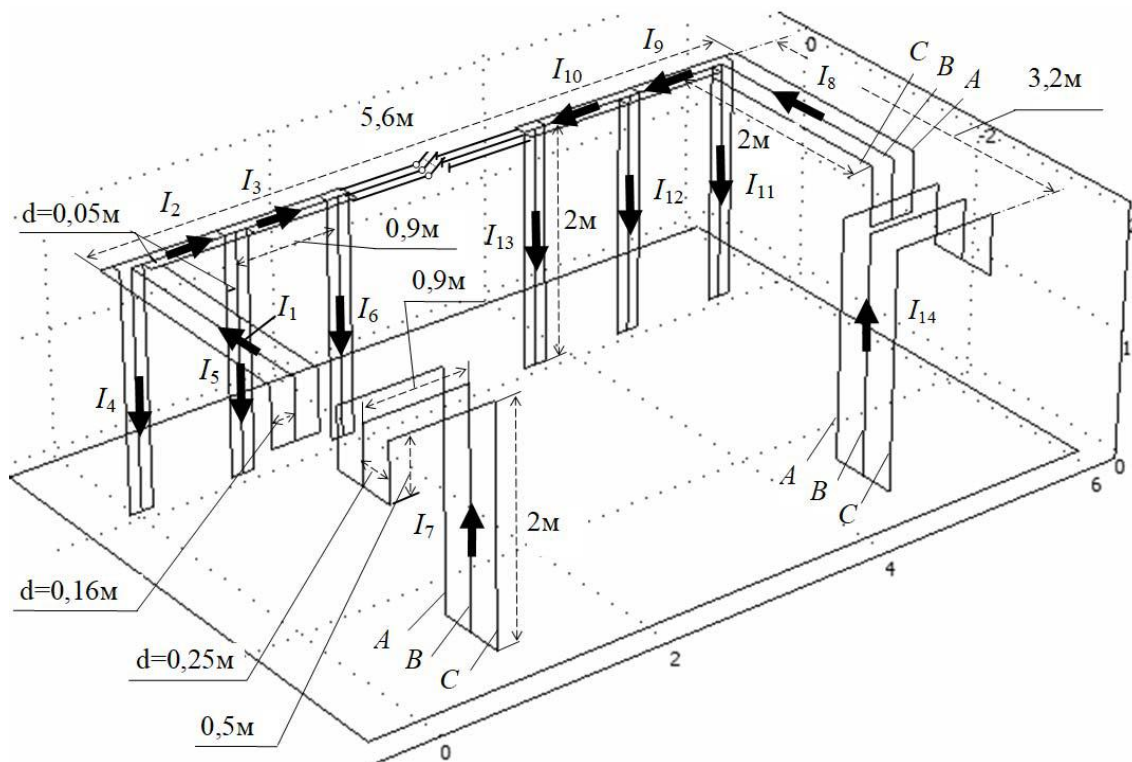


Рис. 4. Конфигурация токопроводов исследуемой двухтрансформаторной ТП мощностью 715 кВА

В жилой зоне точки измерения располагались на линиях, перпендикулярных стенам здания, с шагом 1 м на высоте 1 м. При измерении МП в близлежащих жилых помещениях, точки измерения располагались в узлах пространственной сетки, параллельной стенам помещений. Базовая сетка измерений имела шаг 0,5 м и располагалась в горизонтальной плоскости, на высоте 0,5 м от пола помещения.

Обобщенные результаты измерений индукции МП ТП различной мощности представлены на рис. 5, где значение индукции вблизи внешней стены помещения ТП соответствует  $r = 2$  м, расстояние между которой и корпусом отдельно стоящих ТП составляет 2 м.

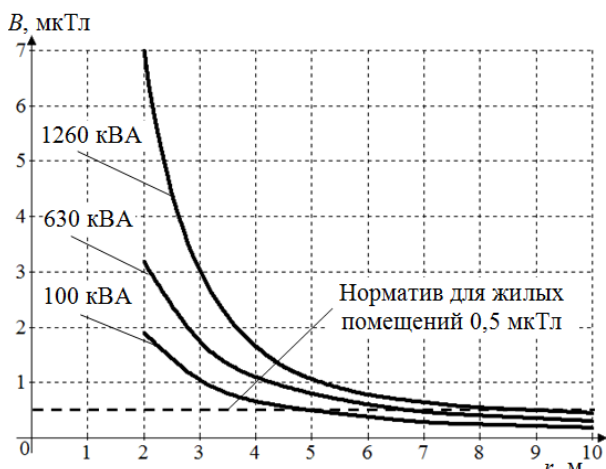


Рис. 5. Экспериментальные значения индукции ВМП отдельно стоящих ТП различной мощности, приведенные к их номинальной нагрузке при удалении точки измерения от их корпуса ( $r$  – расстояние корпуса ТП до точки наблюдения)

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает следующее. Индукция ВМП ТП спадает до ПДУ (значений 0,5 мкТл) при удалении от ТП максимальной мощности (1260 кВА) на 8 м. При минимальной мощности ТП (100 кВА) его ВМП спадает до ПДУ на расстоянии 5 м.

Так как все отдельно стоящие ТП находятся на удалении более 15 м от жилых домов, опасности для ее жильцов они не представляют.

Максимум индукции ВМП рассматриваемых ТП (рис. 5) возникает вблизи внешних стен их помещений и составляет 7 мкТл, что не превышает ПДУ для территории жилой застройки (10 мкТл) в соответствии с [2].

Поэтому городские ТП не представляют опасности для здоровья населения, когда они расположены на расстоянии более 8 м от жилых домов. Однако это условие нарушается для встроенных ТП, когда расстояние между корпусом ТП и жилыми помещениями сокращается до нескольких метров.

Так, на рис. 6 представлено распределение индукции МП, построенное по результатам измерений в жилом помещении, расположенном на втором этаже дома (рис. 1) над встроенной двухтрансформаторной ТП мощностью 715 кВА. Расстояние от корпуса ТП до пола жилого помещения 2-го этажа составляет 1,85 м. Фактическая нагрузка ТП во время измерений составляла 45 % от номинальной ( $0,45 \cdot S_{\text{ном}}$ ).

Результаты измерений представлены на (рис. 6). Их анализ показывает, что максимальный уровень индукции МП в жилом помещении над встроенной ТП даже при уменьшенной нагрузке ТП ( $0,45 \cdot S_{\text{ном}}$ ), составляет 1,6 мкТл, что более чем в 3 раза превышает ПДУ. При большей установленной мощности ТП,



работающей в режиме номинальной нагрузки, значение индукции МП в соответствии с рис. 5 может достигать 7 мкТл.

Таким образом, встроенные ТП могут создавать в соседних жилых помещениях МП с индукцией, в 3-14 раз превышающей ПДУ, что представляет опасность для здоровья населения и требует принятия мер по нормализации их ВМП.

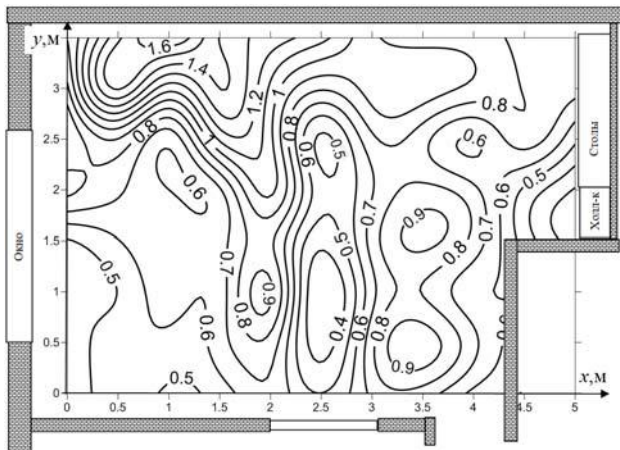


Рис. 6. Экспериментальные значения распределения индукции МП (мкТл) на высоте 0,5 м от пола жилого помещения, расположенного над встроенной ТП мощностью  $S_{\text{ном}} = 715$  кВА при фактической нагрузке  $0,45 \cdot S_{\text{ном}}$

**Моделирование ВМП ТП.** Проведенный анализ показывает, что ВМП ТП нормируется во внешней области пространства – в точках, удаленных на расстояние  $R_0$  от корпуса ТП. Это расстояние составляет не менее 2 м и значительно превышает расстояния  $d$  между осями фазных токопроводов ТП (0,05-0,5 м) [6], что создает условия для применения мультидипольной математической модели при расчете ВМП ТП [8, 11, 12]. Эта модель, при характерном для ТП большом количестве токопроводов со сложной конфигурацией, позволяет по сравнению с методом Био-Савара и численными методами упростить расчет ВМП ТП при ограниченной методической погрешности (менее 10 %) [3, 8]. Кроме того, мультидипольная модель имеет четкую физическую интерпретацию, что позволяет упростить синтез средств снижения МП на ее основе [3].

Для построения мультидипольной модели ВМП ТП может быть использован реализованный в [3] подход, когда каждый линейный контур с током  $I$  ТП (рис. 4) протяженностью  $L$  и шириной  $d$  условно разбивается на  $N$  элементарных микроконтуров с площадями  $S_i = a_i \cdot d$ , характеризующихся дипольными магнитными моментами  $\vec{m}_i$  (рис. 7). При этом необходимо выполнение следующих условий [3, 8]:

$$R_0 > 2d; R_0 > 2a; a = \frac{L}{N} < 0,5R_0. \quad (2)$$

В этом случае напряженность МП  $\vec{H}_k(P)$ , создаваемая единичным прямолинейным однофазным контуром с током (рис. 7) в точке наблюдения  $P$  может быть определена выражениями [3, 8]

$$\vec{H}_k(P) = -\sum_{i=1}^N \nabla \left[ \frac{(\vec{m}_i, \vec{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right]; \quad (3)$$

$$\vec{m}_i = I \cdot \vec{S}_i = I \cdot e^{-j\varphi} \cdot a_i \cdot d \cdot \vec{n}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество микроконтуров в прямолинейном контуре ТП;  $\vec{S}_i$  – вектор площади  $i$ -го микроконтра;  $\vec{n}_i$  – единичный вектор, нормальный к  $S_i$ ;  $\vec{R}_i$  – радиус вектор от геометрического центра  $i$ -го микроконтра в точку наблюдения  $P$ ;  $\varphi$  – фаза тока  $I$ .

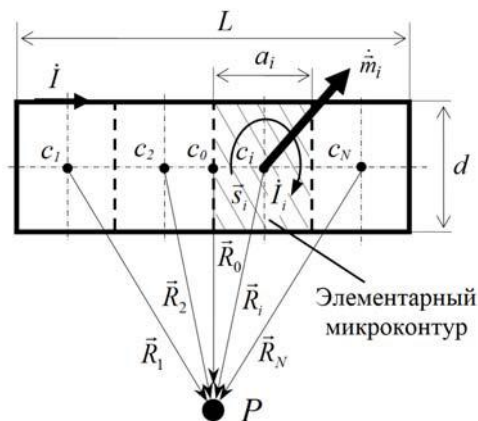


Рис. 7. Мультидипольное представление элементарного контура с переменным током  $I$  как источника МП

Тогда индукция  $\vec{B}_{TS}$  ВМП ТП (рис. 4), содержащей  $K$  трехфазных прямолинейных контуров ТП может быть определена как

$$\vec{B}_{TS}(P) = -\sum_{l=1}^K \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{i=1}^N \nabla \left[ \frac{\mu_0 (\vec{m}_{l\alpha i}, \vec{R}_{l\alpha i})}{4\pi R_{l\alpha i}^3} \right], \quad (5)$$

где  $\alpha$  – номер фазы токопровода ТП ( $\alpha = 1, \dots, 3$ );  $l$  – номер контура ТП ( $l = 1, \dots, K$ );  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Используем предложенную мультидипольную модель (5) для расчета индукции ВМП встроенной ТП. Расчет проведем для реальной городской 2-х трансформаторной ТП мощностью 715 кВА, встроенной в жилой дом (рис. 1). При расчете полагаем, что токи в фазах всех контуров ТП синусоидальны, сдвинуты на 120 эл. градусов и образуют симметричную систему. Токопроводы ТП представляют собой токовые нити. Внешняя среда не содержит источников МП. Влиянием на ВМП металлических частей корпуса ТП и стен жилого дома в соответствии с [9, 13] пренебрегаем.

Расчетная схема ТП соответствует рис. 4 и содержит 18 прямолинейных трехфазных токовых контуров ( $K = 18$ ) с приведенными на рис. 4 размерами и фактическими токами, определенными экспериментально при нагрузке ТП  $0,45 \cdot S_{\text{ном}}$ :  $I_1 = 312$  А;  $I_2 = 208$  А;  $I_3 = 108$  А;  $I_4 = 104$  А;  $I_5 = 100$  А;  $I_6 = 108$  А;  $I_7 = 21$  А;  $I_8 = 174$  А;  $I_9 = 114$  А;  $I_{10} = 62$  А;  $I_{11} = 60$  А;  $I_{12} = 52$  А;  $I_{13} = 62$  А;  $I_{14} = 12$  А.

Результаты расчета индукции МП в горизонтальной плоскости, расположенной на высоте 2,35 м над ТП, выполнены в соответствии с (5) и представлены на рис. 8.

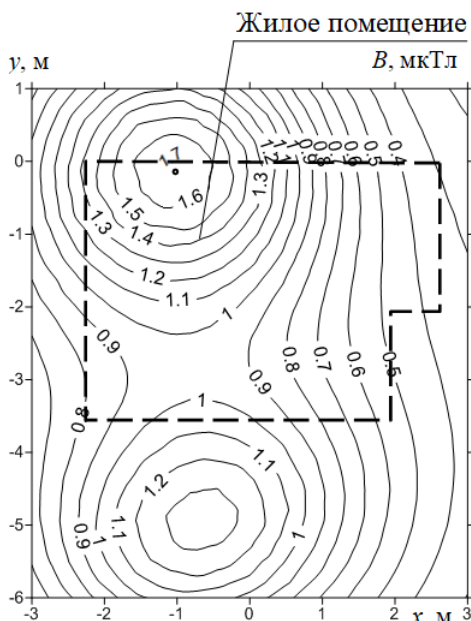


Рис. 8. Расчетные значения распределение индукции МП (мкТл) на высоте 0,5 м от пола жилого помещения (рис. 1), расположенного над встроенной ТП мощностью  $S_{ном} = 715$  кВА при расчетной нагрузке  $0,45 \cdot S_{ном}$

Сравнение результатов расчета (рис. 8) с результатами эксперимента (рис. 6) показывает, что максимальное расчетное значение индукции МП (1,7 мкТл) с погрешностью менее 10 % совпадает с результатами эксперимента (1,6 мкТл). Это подтверждает корректность

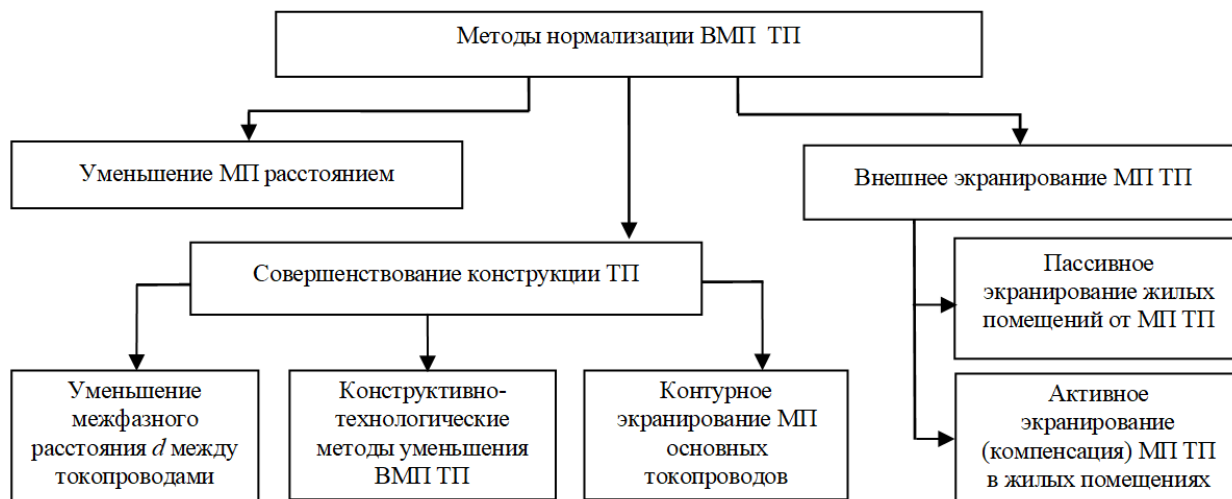


Рис. 9. Классификация методов нормализации ВМП, создаваемого ТП в близлежащих жилых помещениях

Большой интерес с точки зрения стоимости реализации при высокой эффективности представляют методы активного экранирования МП [4, 8, 9, 16-22]. Однако они требуют своего развития применительно к ТП, что и является предметом дальнейших исследований.

#### Выводы.

1. Впервые выполнены комплексные экспериментальные исследования распределения индукции

предложенной методики расчета индукции ВМП ТП и принятых выше допущений.

**Методы нормализации ВМП ТП.** Как следует из проведенного выше анализа, нормализация ВМП требуется для встроенных в жилые дома ТП, когда расстояние между корпусом ТП и жилым помещением составляет менее 8 м. Основные методы нормализации ВМП ТП представлены на рис. 9.

ВМП ТП интенсивно спадает в функции расстояния (рис. 5), что позволяет существенно уменьшить МП при удалении ТП от жилых помещений. Однако реализация этого метода возможна только при наличии свободного пространства, что ограничивает его применение.

Существенное уменьшение ВМП ТП возможно за счет его специального конструктивного исполнения ТП. Так, предложенные в [8, 9] конструктивно-технологические методы (симметрирование, транспонирование, расщепление токопроводов, локальное активное и пассивное экранирование МП) позволяют на порядок и более снизить ВМП ТП. Перспективным методом уменьшения ВМП ТП является контурное экранирование его токопроводов в соответствии с [5, 9]. Однако изменение конструкции действующих ТП технически сложно и имеет юридические ограничения, а промышленный выпуск ТП в специальном конструктивном исполнении требует значительных инвестиций.

Поэтому более предпочтительными для практической реализации являются методы внешнего экранирования МП ТП. Пассивное экранирование осуществляется с помощью электропроводных (ферромагнитных) материалов, размещаемых на стенах и потолках расположенных вблизи ТП жилых помещений [14, 15]. Этот метод универсален, однако на низкой частоте 50 Гц его реализация требует существенных материальных средств.

внешнего магнитного поля частотой 50 Гц, создаваемого 42 типовыми городскими трансформаторными подстанциями (ТП) установленной мощностью от 100 кВА до 1260 кВА. Показано, что индукция магнитного поля в близлежащих жилых помещениях не превышает нормативного уровня (0,5 мкТл) при условии удаления ТП от жилых помещений на расстояние более 8 м.

2. Предложена и экспериментально обоснована мультидипольная математическая модель для расчета внешнего магнитного поля ТП, позволяющая упростить расчет при ограниченной погрешности (10 %) и имеющая четкую физическую интерпретацию. Модель построена на основе дипольных источников магнитного поля, характеризующихся магнитными моментами независимых элементарных микроконтуров  $d \times a_i$ , на которые с шагом  $a_i$  условно разбиваются все линейные участки трехфазных токопроводов ТП с межфазным расстоянием  $d$ . Магнитное поле в точке наблюдения, удаленной на расстояние более  $2d$  ( $2a_i$ ), определяется как суперпозиция магнитного поля, создаваемого магнитными моментами элементарных микроконтуров всех линейных участков токопроводов ТП.

3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что наибольшую опасность для здоровья населения представляют встроенные в жилые дома ТП, которые могут создавать в соседних жилых помещениях магнитное поле с индукцией 1,5-7 мкТл, что в 3-14 раз превышает нормативный уровень.

4. Рассмотрены методы нормализации внешнего магнитного поля ТП в жилых помещениях, основанные на совершенствовании конструкции ТП, использовании внешнего экранирования (компенсации) магнитного поля ТП и обоснована перспективность развития методов внешнего активного экранирования магнитного поля.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сердюк А.М., Думанський В.Ю., Біткін С.В., Дідик Н.В., Думанський Ю.Д. та інші. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання в умовах сучасної міської забудови // Гігієна населених місць: Сб. наук. пр. – К., 2015. – Вип. 66. – С. 20-29.
2. Правила улаштування електроустановок. – 5-те вид., переробл. й доповн. (станом на 22.08.2014). – Х.: Форт, 2014. – 800 с.
3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. – 2013. – №2. – С. 3-9.
4. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Синтез систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи на основе многокритериальной оптимизации // Електротехніка і електромеханіка – 2016. – №6. – С. 26-30. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.05.
5. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Квицинский А.А. Двухконтурное пассивное экранирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий в зонах соединительных муфт // Технічна електродинаміка. – 2017. – №1. – С. 23-28.
6. Ополева Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник. – М: Форум-Инфра, 2006. – 480 с.
7. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations // Universities Power Engineering Conference, 42nd International. – 2007. – pp. 832-836. doi: 10.1109/UPEC.2007.4469057.
8. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики; №772. – К.: 1995. – 42 с.
9. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лупиков В.С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных уст-

ройств и полупроводниковых преобразователей Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики; №791. – К.: 1996. – 46 с.

10. Заутнер Ф.Л., Пилюгина О.Ю., Розов В.Ю. Вероятностный метод прогнозирования электромагнитных помех электрооборудования в низкочастотном диапазоне // Технічна електродинаміка. – 1994. – №1. – С. 3-6.

11. Розов В.Ю. Построение систем автоматической компенсации внешних магнитных полей подвижных объектов, содержащих ферромагнитные массы // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2002. – Ч.2. – С. 9-14.

12. Розов В.Ю., Гетьман А.В., Петров С.В., Ерисов А.В., Меланченко А.Г., Хорошилов В.С., Шмидт И.Р. Магнетизм космических аппаратов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч.2. – С. 144-147.

13. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи // Техническая электродинамика. – 2016. – №3. – С. 6-9.

14. Szabó J., Jánossy G., Thuróczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations // Bioelectromagnetics. – 2007. – vol.28. – no.6. – pp. 48-52. doi: 10.1002/bem.20264.

15. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings // Building and Environment. – 2002. – vol.37. – no.8-9. – pp. 769-775. doi:10.1016/S0360-1323(02)00043-4.

16. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 1996. – №1. – С. 3-9.

17. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч.4. – С. 97-100.

18. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.3. – С.13-16.

19. Волошко О.В. Синтез систем активного экранирования магнитного поля повітряних ліній електропередачі // Вісник НАН України. – 2017. – №7. – С. 64-73. doi: 10.15407/visn2017.07.064.

20. Cruz P., Riquelme J.M., de la Villa A., Martínez J.L. Gabbased passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines: neural network applications in electrical engineering, // Neurocomputing. – 2007. – vol.70. – no.16-18. – pp. 2679-2686. doi:10.1016/j.neucom.2006.05.016.

21. del-Pino-López J., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P., Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings // Electric Power Systems Research. – 2015. – vol.119. – pp. 337-344. doi: 10.1016/j.epr.2014.10.019.

22. Garzia, F., Geri, A. Active shielding design of indoor MV/LV substations using genetic algorithms optimization // IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2003. – vol.1. – pp.197-202.

#### REFERENCES

1. Serdiuk A.M., Dumanskiy V.Yu., Bitkin S.V., Didyk N.V., Dumanskiy Yu.D. Hygienical ground of requirements to placing and exploitation of cable busses of electricity transmission and their equipment in the conditions of modern municipal building. *Hygiene of populated places*, 2015, no.66, pp. 20-29. (Ukr).
2. *Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok 5-te vyd., pererobl. j dopovn. (stanom na 22.08.2014)* [Electrical Installation Regu-

lations. 5 edition, Revised and enlarged]. Kharkiv, Fort Publ., 2014. 800 p. (Ukr).

3. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pilyugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2013, no.2, pp. 3-9. (Rus).
4. Kuznetsov B.I., Nikitiina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B.. Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 26-30. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.05.
5. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Kvytsynskiy A.A. Double-circuit passive shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines in junction zones. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no.1, pp. 23-28. (Rus).
6. Opoleva G.N. *Skhemy i podstantsii elektrosnabzheniia. Spravochnik* [Schemes and substations of power supply. Directory]. Moscow, Forum-Infra Publ., 2006. 480 p. (Rus).
7. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *Universities Power Engineering Conference, 42nd International*. 2007, pp. 832-836. doi: 10.1109/UPEC.2007.4469057.
8. Rozov V.Yu. *Vneshnie magnitnye polia silovogo elektrooborudovaniia i metody ikh umen'sheniia* [External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them]. Kiev, The Institute of Electrodynamics Publ., 1995, no.772. 42 p. (Rus).
9. Rozov V. Yu., Erisov A.V., Lupikov V.S. *Osobennosti snizheniia vneshnikh magnitnykh polei raspredelitel'nykh ustroystv i poluprovodnikovyykh preobrazovatelei* [Features of reducing external magnetic fields of switchgears and semiconductor converters]. Kiev, The Institute of Electrodynamics Publ., 1996, no.791. 46 p. (Rus).
10. Zautner F.L., Pilyugina O.Yu., Rozov V.Yu. Probabilistic method for predicting electromagnetic interference of electrical equipment in the low-frequency range. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1994, no.1, pp. 3-6. (Rus).
11. Rozov V.Yu. Construction of systems for automatic compensation of external magnetic fields of mobile objects containing ferromagnetic masses. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2002, no.2, pp. 9-14. (Rus).
12. Rozov V.Yu., Getman A.V., Petrov S.V., Ericov A.V., Melanchenko A.H., Horoshilov V.S., Shmidt I.R. Magnetism of spacecraft. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2010, no.2, pp. 144-147. (Rus).
13. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no.3, pp.6-9. (Rus).
14. Szabó J., Jánossy G., Thuróczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. *Bioelectromagnetics*, 2007, vol.28, no.6, pp. 48-52. doi: 10.1002/bem.20264.
15. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*, 2002, vol.37, no.8-9, pp. 769-775. doi:10.1016/S0360-1323(02)00043-4.
16. Shidlovskij A.K., Rozov V.Yu. Automatic compensation systems for external magnetic fields of energy-saturated objects. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1996, no.1, pp.3-9. (Rus).
17. Rozov V.Yu., Assuirov D.A., Reuckij S.Ju. Closed systems for compensation of the magnetic field of technical objects with different methods of feedback formation. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2008, no.4, pp. 97-100. (Rus).
18. Rozov V.Yu., Assuirov D.A. The method of active shielding of the external magnetic field of technical objects. *Tekhnichna*

*Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).

19. Voloshko A.V. Synthesis of active shielding systems of power transmission lines magnetic field. *Visnyk Nac. Akad. Nauk Ukr.*, 2017, no.7, pp. 64-73. (Ukr). doi: 10.15407/visn2017.07.064.
20. Cruz P., Riquelme J.M., de la Villa A., Martínez J.L. Ga-based passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines: neural network applications in electrical engineering. *Neurocomputing*, 2007, vol.70, no.16-18, pp. 2679-2686. doi:10.1016/j.neucom.2006.05.016.
21. del-Pino-López J.C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings. *Electric Power Systems Research*, 2015, vol.119, pp. 337-344. doi: 10.1016/j.epsr.2014.10.019.
22. Garzia F., Geri A. Active shielding design of indoor MV/LV substations using genetic algorithms optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol.1, pp.197-202.

Поступила (received) 12.08.2017

Розов Владимир Юрьевич<sup>1</sup>, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины,  
 Пелевин Дмитрий Евгеньевич<sup>1</sup>, к.т.н.,  
 Пелевина Екатерина Дмитриевна<sup>1</sup>, аспирантка,  
<sup>1</sup> Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины»,  
 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,  
 тел/phone: +38 0572 992162, e-mail: pelevindmitro@ukr.net

V.Yu. Rozov<sup>1</sup>, D.Ye. Pelevin<sup>1</sup>, K.D. Pielievina<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,  
 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

#### External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization.

**Purpose.** Research of external magnetic field of urban transformer substations and the methods it reduction to the standard level in the living quarters of nearby. **Methodology.** Experiment based on the actual values the measuring magnetic flux density of the alternating magnetic field. Theories of electromagnetic field on quasi-static formulation is basis of external magnetic field of urban transformer substations description. **Results.** We have made comprehensive experimental researches the magnetic field of a 50 Hz through model urban transformer substations on the external environment. For calculating the external magnetic field of transformer substations the mathematical model of multi-dipole is proposed. It practical uses for induction external magnetic field of calculating created in nearby built in house transformer substations power 715 kVA is proposed. Comparison of results calculation and experiment was conducted. **Originality.** We have established that magnetic flux density of the magnetic field does not exceed standard level in the living quarters of nearby (0.5  $\mu\text{T}$ ) if quarters the location distances of more than 8 m from the transformer substation on the first time. Transformer substations in the built-in houses can create the dangerous to public health magnetic field which induction 1.5-7  $\mu\text{T}$  in neighboring living quarters. It exceeds the normative level in 3-14 times. **Practical value.** We have proposed normalization methods of the external magnetic field built-in transformer substations. Methods are based on improving construction transformer substations. And methods of external passive and active shielding are considered. References 22, figures 9.  
 Key words: transformation substation, external magnetic field, living spaces, multi-dipole model, methods of normalization.

Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, Д.Н. Калюжный

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИСТОЧНИКАМИ ИНТЕРГАРМОНИК

*Розроблена методика вибору батарей конденсаторів, які застосовуються як в якості компенсаторів реактивної потужності при наявності джерел інтергармонік, так і в складі фільтрів вищих гармонік і інтергармонік. Отримані вирази для перевірки відсутності неприпустимих перевантажень батарей конденсаторів по напрузі й по струму при наявності в кривій напруги (струму), поряд з вищими гармоніками, дискретного спектру інтергармонік. Обґрунтована доцільність спрощеного врахування зміни напруги на затискачах батарей конденсаторів фільтрів вищих гармонік і інтергармонік за рахунок наявності реактора в складі фільтрів. Використання запропонованих підходів дозволить комплексно вирішувати низку питань, пов'язаних з вибором параметрів батарей конденсаторів в електричних мережах з нелінійними навантаженнями. Бібл. 10.*

*Ключові слова:* батарея конденсаторів, компенсація реактивної потужності, фільтро-компенсуючий пристрій, вищі гармоніки, інтергармоніки.

*Разработана методика выбора батарей конденсаторов, применяемых как в качестве компенсаторов реактивной мощности при наличии источников интергармоник, так и в составе фильтров высших гармоник и интергармоник. Получены выражения для проверки отсутствия недопустимых перегрузок батарей конденсаторов по напряжению и по току при наличии в кривой напряжения (тока), наряду с высшими гармониками, дискретного спектра интергармоник. Обоснована целесообразность упрощенного учета изменения напряжения на зажимах батарей конденсаторов фильтров высших гармоник и интергармоник за счет наличия реактора в составе фильтров. Использование предложенных подходов позволит комплексно решать ряд вопросов, связанных с выбором параметров батарей конденсаторов в электрических сетях с нелинейными нагрузками. Библ. 10.*

*Ключевые слова:* батарея конденсаторов, компенсация реактивной мощности, фильтро-компенсирующее устройство, высшие гармоники, интергармоник.

**Введение.** Рациональное применение в системах электроснабжения компенсирующих устройств позволяет снизить потери мощности в электрической сети (ЭС), обеспечить надлежащее качество потребляемой электроэнергии за счет нормализации уровней напряжения и в целом позволяет достичь высоких технико-экономических показателей работы электроустановок. Таким образом, решение вопросов компенсации реактивной мощности (КРМ) является одним из аспектов как энергосбережения в ЭС, так и надежности электроснабжения промышленных предприятий [1-4].

Одними их наиболее применяемых в системах электроснабжения различного назначения устройств КРМ являются батареи конденсаторов (БК), так как имеют ряд характерных преимуществ: незначительные удельные потери активной мощности, отсутствие вращающихся частей, простота монтажа и эксплуатации, относительно невысокая стоимость, малая масса, отсутствие шума во время работы, возможность реализации индивидуальной КРМ [5, 6].

Однако в современных ЭС имеет место тенденция к росту количества и мощности нелинейных электроприемников. Это в первую очередь различные преобразователи частоты, выпрямители, инверторы, приводы постоянного тока и др. полупроводниковые устройства. Резкопеременные нагрузки являются не только источниками колебаний напряжения, но и гармонических искажений кривых токов и напряжений. При наличии высших гармоник (ВГ) в кривой напряжения процесс старения диэлектрика конденсаторов протекает более интенсивно, чем в случае, когда конденсаторы работают при синусоидальном напряжении. Это объясняется тем, что физико-химические процессы в диэлектриках, обуславливающие их старение, значительно ускоряются при высоких частотах электрического поля. Аналогично влияет дополнительный нагрев, вызванный протеканием ВГ тока. В зависимости от частотных характе-

ристик систем электроснабжения БК могут оказаться в режиме, близком к резонансу токов на частоте какой-либо из ВГ [6-8]. Вследствие перегрузок БК токами ВГ они выходят из строя. Необходимо отметить, что в зависимости от источников искажений, наряду с ВГ может генерироваться существенный спектр интергармоник (ИГ), к которым, в соответствии со стандартом МЭК, относятся гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети [6]. ИГ оказывают на системы электроснабжения аналогичное ВГ негативное влияние [9]. Таким образом, выбор параметров БК при несинусоидальных режимах должен заключаться в недопущении резонансных режимов на частотах как ВГ, так и ИГ и обеспечении допустимых напряжений на конденсаторах и их допустимой загрузки по току. Однако вопрос выбора параметров БК при наличии ИГ является недостаточным исследованным.

**Цель исследования** – разработка методики выбора параметров батарей конденсаторов, применяемых как в качестве компенсаторов реактивной мощности при наличии источников дискретного спектра интергармоник, так и в составе фильтров высших и интергармоник.

**Изложение основного материала.** Техническими условиями на эксплуатацию БК предусматривается ограничение превышения напряжения и тока сверх номинальных значений некоторыми величинами  $c_u$  и  $c_i$  (в долях номинальных значений). Так согласно международным стандартам конденсаторы должны выдерживать повышенное напряжение сети, действующее в течение определенного интервала времени. Например, стандарт EN-60831-1/2 устанавливает требования, в соответствии с которыми на промышленной частоте конденсатор должен выдерживать напряжение величиной  $1,1U_{ном}$  до 8 часов в сутки. Кроме этого конденсаторы должны быть рассчитаны на

© Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, Д.Н. Калюжный

непрерывную работу при токе, не превышающем  $1,3I_{nom}$ . Таким образом, величины  $c_u$  и  $c_i$  соответственно равны 1,1 и 1,3.

Тогда при наличии в кривой напряжения ВГ условие отсутствия недопустимой перегрузки БК по напряжению [6]:

$$\sqrt{\frac{U_{CB}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} U_{nCB}^2}{U_{nom,CB}}} \leq c_u, \quad (1)$$

где  $U_{CB}$  – напряжение на зажимах БК при промышленной частоте (напряжение основной гармоники), в расчетах допускается в качестве  $U_{CB}$  использовать номинальное напряжение БК  $U_{nom,CB}$ ;  $n$  – номер гармонической составляющей;  $U_{nCB}$  – напряжение  $n$ -й гармоники на конденсаторах.

Условие исключения недопустимой перегрузки БК по току:

$$\sqrt{\frac{I_{CB}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nCB}^2}{I_{nom,CB}}} \leq c_i, \quad (2)$$

где  $I_{CB}$  – ток промышленной частоты в БК (ток основной гармоники), как и в случае с напряжением, в расчетах допускается в качестве  $I_{CB}$  использовать номинальный ток  $I_{nom,CB}$ ;  $I_{nCB}$  – ток  $n$ -й гармоники, протекающий через БК.

При наличии в кривых тока и напряжения дискретного спектра ИГ условия (1) и (2) принимают следующий вид:

$$\sqrt{\frac{U_{CB}^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^{\infty} U_{v_k CB}^2}{U_{nom,CB}}} \leq c_u; \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{I_{CB}^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^{\infty} I_{v_k CB}^2}{I_{nom,CB}}} \leq c_i, \quad (4)$$

где  $k$  – номер гармонической составляющей кривых напряжения и тока соответственно;  $v_k$  – относительная частота  $k$ -й гармонической составляющей (значение  $v_k$  при каком-то  $k$  может совпадать с относительной частотой ВГ  $n$ );  $U_{v_k CB}$  – напряжение  $v_k$ -й гармоники на конденсаторах;  $I_{v_k CB}$  – ток  $v_k$ -й гармоники, протекающей через БК.

Для практического применения условия отсутствия недопустимых перегрузок БК по напряжению и по току при наличии, наряду с ВГ, дискретного спектра ИГ целесообразно привести к следующему виду:

$$\sqrt{1 + \frac{1}{U_{nom,CB}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N U_{v_k CB}^2} \leq c_u; \quad (5)$$

$$\sqrt{1 + \frac{1}{I_{nom,CB}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N I_{v_k CB}^2} \leq c_i, \quad (6)$$

где  $N$  – номер последней учитываемой гармоники.

В выражениях (5) и (6) число  $N$  должно определяться диапазоном частот, где гармоники имеют наиболее значимые амплитуды. В общем случае значения  $N$  и  $v_N$  будут зависеть от источника ИГ.

Учитывая, что превышение напряжения на зажимах БК допускается до величины  $c_u$  (не более 8 ч каждые сутки), а допустимая перегрузка по току – до величины  $c_i=1,3$ ; выражения (5) и (6) удобнее преобразовать к следующему виду:

$$U_{nom,CB} \geq 1,2 \sqrt{\sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N U_{v_k CB}^2}; \quad (7)$$

$$I_{nom,CB} \geq 1,2 \sqrt{\sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N I_{v_k CB}^2}. \quad (8)$$

Проверка отсутствия резонансных режимов при работе БК, подключенной в сеть с источниками несинусоидальности, может быть выполнена путем анализа частотных характеристик соответствующей ЭС. Частотные характеристики ЭС могут быть получены как экспериментально, так и расчетным путем. Методика расчета резонансных режимов в ЭС предусматривает составление схемы замещения рассматриваемой сети, определение параметров схемы замещения на частотах гармоник и расчете частотных характеристик входных и взаимных сопротивлений (или проводимостей) узлов сети на частотах гармоник [10].

На основе полученной схемы замещения формируется матрица узловых проводимостей ЭС на частоте  $n$ -й гармоники:

$$Y_{yn} = \begin{bmatrix} Y_{11n} & Y_{12n} & \dots & Y_{1mn} \\ Y_{21n} & Y_{22n} & \dots & Y_{2mn} \\ \vdots & & & \vdots \\ Y_{m1n} & Y_{m2n} & \dots & Y_{mmn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Каждый из диагональных элементов этой матрицы соответствует определенному узлу системы и равен сумме проводимостей всех ветвей, непосредственно соединенных с данным узлом. Недиагональные элементы равны проводимостям соответствующих ветвей, связывающих данную пару узлов, взятых со знаком минус. При отсутствии таких ветвей недиагональный элемент принимается равным нулю.

Входное сопротивление ЭС со стороны узла с номером  $i$  на частоте  $n$ -й гармоники может быть найдено как [10]

$$Z_{iin} = \frac{A_{iin}}{D_n}, \quad (10)$$

где  $D_n$  – определитель матрицы узловых проводимостей (9) на частоте  $n$ -й гармоники;  $A_{iin}$  – алгебраическое дополнение определителя  $D_n$ .

Взаимное (передаточное) сопротивление  $i$ -го и  $j$ -го узлов ЭС на частоте  $n$ -й гармоники равно

$$Z_{ijn} = \frac{A_{ijn}}{D_n}, \quad (11)$$

где  $A_{ijn}$  – алгебраическое дополнение определителя  $D_n$ .

Алгебраические дополнения  $A_{iin}$  и  $A_{ijn}$  могут быть найдены как

$$A_{iin} = D_{iin}; \quad (12)$$

$$A_{ijn} = (-1)^{i+j} D_{ijn}, \quad (13)$$

где  $D_{iin}$  – минор, получаемый из определителя  $D_n$  вычеркиванием  $i$ -й строки и  $i$ -го столбца;  $D_{ijn}$  – минор, получаемый из определителя  $D_n$  вычеркиванием  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца.

На частотах, соответствующих частотам резонансов токов, значения входных и взаимных сопротивлений узлов будут стремиться к бесконечности (при пренебрежении активными сопротивлениями). При резонансах токов относительно небольшой ток гармоники, частота которой совпадает с частотой резонанса, вызывает значительные напряжения в узлах сети (из-за больших входных и взаимных сопротивлений узлов). Это приводит к протеканию значительных токов в ветвях сети и перегрузке БК.

В связи с тем, что в ЭС происходят изменения частотных характеристик входных и взаимных сопротивлений, вызванные изменениями сопротивления питающей сети, мощностей и режимов подключенных нагрузок и возможными коммутациями в схеме, при оценке параметров компенсирующих устройств необходимо учитывать эти факторы и определять возможные диапазоны изменений резонансных частот.

Рассмотренный подход к выбору параметров БК, используемых для КРМ, справедлив и для выбора БК, входящих в состав фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), применяемых для снижения несимметричности напряжения и одновременно КРМ.

Наличие реактора в составе фильтра изменяет напряжение на зажимах БК на величину, зависящую от частоты настройки фильтра  $\nu$  [6],

$$U_{CB} = a_\nu U_{en}, \quad (14)$$

где  $U_{en}$  – линейное (фазное) напряжение в электрической сети;  $a_\nu$  – коэффициент изменения напряжения.

Без учета активного сопротивления цепи фильтра

$$a_\nu = \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1}. \quad (15)$$

Так как все элементы цепи фильтра обладают активным сопротивлением (выводы конденсаторов, реакторов, соединительных шин, кабелей и т.д.), то с учетом активного сопротивления коэффициент изменения напряжения определяется выражением [6]

$$a_\nu = \frac{\nu^2 \operatorname{tg} \varphi_r}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_r (\nu^2 - 1)^2 + 1}}, \quad (16)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi_r = x_r/R_f$ ;  $x_r$  – сопротивление реактора фильтра, определяемое из условия резонанса;  $R_f$  – суммарное активное сопротивление цепи фильтра.

Отношение  $x_r/R_f$  является добротностью контура  $Q$ . Таким образом, можно записать  $\operatorname{tg} \varphi_r = Q$ . Для ФКУ ВГ  $Q \geq 10$  [10]. Согласно проведенным исследованиям для ФКУ ИГ, особенно устанавливаемых в зоне низких частот, также выполняется неравенство  $Q \geq 10$ .

Расчеты показали, что определение коэффициента  $a_\nu$  по выражению (15) дает погрешность в сторону увеличения по сравнению с коэффициентом  $a_\nu$ , определяемым выражением (16), не более чем на 1 % при  $Q=10$ , за исключением диапазона  $0,55 \leq \nu \leq 0,7$ . В указанном диапазоне максимальная погрешность для  $\nu=0,7$  составляет 1,9 %. С увеличением добротности

погрешность значительно уменьшается. Так, например, уже при  $Q=20$  погрешность расчета  $a_\nu$  по выражению (15) для всех частот, входящих в возможные зоны установки ФКУ ИГ, составляет менее 1 %.

Таким образом, при выборе номинального напряжения БК фильтров ИГ коэффициент  $a_\nu$  целесообразно определять в соответствии с (15). При этом возможно незначительное завышение номинального напряжения, что предпочтительно с точки зрения надежной работы БК фильтров при их расстройке.

С учетом выражений (5) и (14) условие отсутствия недопустимой перегрузки БК ФКУ, настроенного на частоту  $\nu$ , по напряжению:

$$\sqrt{a_\nu^2 k_U^2 + \frac{1}{U_{nom,CB}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ \nu_k \neq 1}}^N U_{\nu_k CB}^2} \leq c_u = 1,1, \quad (17)$$

$$\text{где } k_U = \frac{U_{en}}{U_{nom,CB}}.$$

Ток БК  $I_{CB}$  пропорционален напряжению на батарее  $U_{CB}$ , следовательно, можно записать [10]

$$I_{CB} = I_{nom,CB} a_\nu k_U. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (6), после преобразований получим условие отсутствия недопустимой перегрузки БК ФКУ по току:

$$\sqrt{a_\nu^2 k_U^2 + \frac{1}{I_{nom,CB}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ \nu_k \neq 1}}^N I_{\nu_k CB}^2} \leq c_i = 1,3. \quad (19)$$

**Выводы.** При выборе батарей конденсаторов как для компенсации реактивной мощности, так и для фильтро-компенсирующих устройств необходимо построение частотных характеристик входных и взаимных сопротивлений электрической сети для анализа возможных резонансных явлений, как в узле с источником интергармоник, так и во всех остальных узлах сети. При построении частотных характеристик необходим учет активных сопротивлений элементов электрической сети, оказывающих существенное влияние на полное сопротивление при резонансе токов.

При выборе параметров батарей конденсаторов фильтров необходимо комплексное решение целого ряда вопросов, в том числе, обеспечение их надежной работы при отклонениях параметров как самих фильтров, так и питающей сети, источников гармонических искажений от номинальных; отсутствие резонансных явлений на частотах как высших гармоник, так и интергармоник. Решение указанных вопросов требует: расчета спектрального состава токов источников высших гармоник и интергармоник, рационального выбора зоны (зон) установки фильтро-компенсирующего устройства, как можно более точного расчета реальной частоты настройки фильтра и возможного диапазона ее отклонений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев І.М. Про компенсацію реактивної потужності електрообладнання // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2010. – №11. – С. 66-69.
2. Омельчук А.О., Скрипник А.М., Трондюк В.С. Щодо балансу реактивної потужності в мережах живлення в нових нормативних умовах перетоку реактивної енергії в Україні // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2011. – №161. – С. 111-119.

3. Seema Dudhe. Reactive Power Compensation Techniques in Transmission lines // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC)*. – 2015. – vol.3. – iss.5. – pp. 3224-3226.
4. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., Domke R. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review // *Proceedings of the IEEE*. – 2005. – vol.93. – iss.12. – pp. 2144-2164. doi: 10.1109/JPROC.2005.859937.
5. Давидов О.Ю., Бялобржеський О.В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах // *Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського*. – 2010. – №3(62). – С. 132-136.
6. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
7. Attachie J.C., Amuzuvi C.K. Using a Fixed and Switched-Capacitor Bank to Investigate Harmonic Resonance and Capacitor Bank Switching in a Distribution Network // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. – 2014. – vol.7. – iss.9. – pp. 1900-1909. doi: 10.19026/rjaset.7.480.
8. Wilsun Xu, Xian Liu, Yilu Liu. Assessment of harmonic resonance potential for shunt capacitor applications // *Electric Power Systems Research*. – 2001. – vol.57. – iss.2. – pp. 97-104, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00092-X.
9. Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Э.В. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік // *Електрифікація транспорту*. – 2012. – № 3. – С. 78-83.
10. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Горпинич А.В., Нестерович В.В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий [Под ред. И.В. Жежеленко]. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

#### REFERENCES

1. Zaytsev I. M. On compensation of reactive power of electrical equipment. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2010, no.11, pp. 66-69. (Ukr).
2. Omelchuk A.O., Skripnik A.M., Trondyuk V.S. Concerning the balance of reactive power in power grids in the new normative conditions of jet energy flows in Ukraine. *Scientific Herald of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*, 2011, no. 161, pp. 111-119. (Ukr).
3. Seema Dudhe. Reactive Power Compensation Techniques in Transmission lines. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC)*, 2015, vol. 3, iss. 5, pp. 3224-3226.
4. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., Domke R. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. *Proceedings of the IEEE*, 2005, vol.93, iss.12, pp. 2144-2164. doi: 10.1109/JPROC.2005.859937.
5. Davidov O.Yu., Byalobrzheskiy O.V. Analysis of reactive power compensation systems in electrical engineering systems. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2010, no.3(62), pp. 132-136. (Ukr).
6. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Kachestvo elektroenergii na promyshlennukh predpriiatiakh* [Power quality in industrial plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p. (Rus).
7. Attachie J.C., Amuzuvi C.K. Using a Fixed and Switched-Capacitor Bank to Investigate Harmonic Resonance and Capacitor Bank Switching in a Distribution Network. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, vol.7, iss.9, pp. 1900-1909. doi: 10.19026/rjaset.7.480.
8. Wilsun Xu, Xian Liu, Yilu Liu. Assessment of harmonic resonance potential for shunt capacitor applications. *Electric Power Systems Research*, 2001, vol.57, iss.2, pp. 97-104, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00092-X.

9. Saenko Yu.L., Baranenko T.K., Baranenko E.V. Reduction of levels of harmonic distortions in electric networks with sources of interharmonics. *Electrification of transport*, 2012, no.3, pp. 78-83. (Ukr).
10. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L., Baranenko T.K., Gorpinich A.V., Nesterovich V.V. *Izbrannyye voprosy nesinusoidal'nykh rezhimov v elektricheskikh setiakh predpriiati* [Selected issues of non-sinusoidal regimes in electric networks of enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2007. 296 p. (Rus).

*Postynula (received) 19.08.2017*

Саенко Юрий Леонидович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Бараненко Татьяна Константиновна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
 Калюжный Дмитрий Николаевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> Приазовский государственный технический университет,  
 87500, Мариуполь, ул. Университетская, 7,  
 тел/phone +380 629 446551,  
 e-mail: yls62@i.ua, tbaranenko@gmail.com  
<sup>2</sup> Харьковский национальный университет  
 городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
 61002, Харьков, ул. Революции, 12,  
 тел/phone +380 57 7073117,  
 e-mail: KalyuzhniyDN@gmail.com

*Yu.L. Saenko<sup>1</sup>, T.K. Baranenko<sup>1</sup>, D.N. Kalyuzhniy<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Pryazovskyi State Technical University,  
 7, Universytets'ka Str., Mariupol, 87500, Ukraine.  
<sup>2</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy  
 in Kharkiv,  
 12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Features of selection of capacitor banks in electric networks with interharmonic sources.

**Purpose.** Development of a methodology for selecting capacitor bank parameters designed to compensate for reactive power, if there are sources of interharmonics in the electrical network. Development of a methodology for selecting the parameters of capacitor banks that are part of resonant filters of higher harmonics and interharmonics. **Methodology.** For the research, we used the decomposition of the non-sinusoidal voltage (current) curve into the sum of the harmonic components with frequencies as multiple of the fundamental frequency - higher harmonics, and not multiple fundamental frequencies - interharmonics. **Results.** Expressions are obtained for checking the absence of inadmissible overloads of capacitor banks by voltage and current in the presence of voltage (current) in the curve, along with higher harmonics, of the discrete spectrum of interharmonics. When selecting capacitor banks, both for reactive power compensation and for filter-compensating devices, the necessity of constructing the frequency characteristics of the input and mutual resistances of the electrical network for analyzing possible resonant phenomena is confirmed. **Originality.** The expediency of simplified calculation of the voltage variation at the terminals of the banks of the capacitors of the higher harmonics filters and interharmonics due to the presence of the reactor in the filters is substantiated. **Practical value.** The use of the proposed approaches will make it possible to resolve a number of issues related to the choice of parameters of capacitor banks in networks with nonlinear loads, including: ensuring reliable operation of capacitor banks when their parameters deviate from their nominal values, as well as deviations in the parameters of the supply network and sources of harmonic distortion; ensuring the absence of resonant phenomena at frequencies of both higher harmonics and interharmonics. References 10.  
**Key words:** capacitor bank, reactive power compensation, filter-compensating device, higher harmonics, interharmonics.



**ЖЕМЕРОВ ГЕОРГИЙ ГЕОРГИЕВИЧ**

(к 80-летию со дня рождения)

21 октября 2017 р. исполнилось 80 лет со дня рождения известного ученого в области электрических и полупроводниковых преобразователей, доктора технических наук, члена IEEE, профессора кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» (ПБМЭ) Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Жемерова Георгия Георгиевича.

После окончания средней школы с золотой медалью в 1955 г. Георгий Георгиевич поступил на электротехнический факультет Харьковского политехнического института, который успешно закончил в 1960 г., получив квалификацию инженера-электромеханика. По распределению был направлен в научно-исследовательскую лабораторию «Техника высоких напряжений и преобразователи тока» Харьковского политехнического института (ХПИ). С 1963 года по 1991 год работал в качестве научного сотрудника, начальника отдела и затем директора научно-исследовательского электротехнического завода Харьковского электромеханического завода. С 1990 года по 1994 занимал должность генерального директора ГП «Харьковский электромеханический завод», а с 1994 года работает на кафедре ПБМЭ на должности профессора.

В 1970 году Г.Г. Жемеров защитил кандидатскую диссертацию, а в 1987 – докторскую диссертацию. Ученое звание профессора по специальности «Электрические и полупроводниковые преобразователи» присуждено Г.Г. Жемерову в 1989 году.

После перехода на кафедру ПБМЭ читает лекции студентам 3-6 курсов по таким дисциплинам как «Энергетическая электроника», «Методы расчета и моделирования преобразователей», «Преобразователи для электропривода», «Специальные вопросы преобразовательной техники». Содержание лекций ежегодно обновляется с учетом последних достижений в теоретической электротехнике, методах расчета и компьютерного моделирования установившихся и переходных процессов в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями. В значительной степени в материалах лекций отражаются результаты исследований самого профессора Г.Г. Жемерова.

С 1994 года профессор Г.Г. Жемеров является членом секций «Power Electronics» и «Industrial Electronics» IEEE. За многолетнее членство и активность в 2017 году он получил статус пожизненного члена IEEE.

С участием профессора Г.Г. Жемерова на кафедре ПБМЭ проводятся научно-исследовательские работы по следующим направлениям:

- теория передачи энергии и теория мгновенной активной и реактивной мощностей в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями, накопителями энергии и альтернативными источниками энергии;

- компенсированные управляемые выпрямители и компенсированные непосредственные преобразователи частоты;

- активные выпрямители и силовые активные фильтры;



- многоуровневые инверторы напряжения и тока;

- управление полупроводниковыми преобразователями в системах электроснабжения с накопителями энергии и альтернативными источниками энергии.

В области теории передачи энергии и теории мощности им систематизированы матрицы всех известных преобразований координат результирующих векторов напряжений и токов, предложено модифицированное преобразование Парка для четырехпроводных трехфазных систем электроснабжения и разработаны методы расчета максимально возможного и реального КПД систем электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. Подробно исследованы характеристики компенсированного управляемого выпрямителя, схема которого запатентована в Украине. Предложены схемы систем электроснабжения коммунальных объектов, железных дорог и метрополитена, в которых использование активных выпрямителей, силовых активных фильтров и накопители энергии позволяет существенно, – на единицы, а в ряде случаев на более чем 10%, – уменьшить потери электроэнергии в системе. Разработаны схемы автоматического управления новыми системами электроснабжения и их Matlab-модели. Решено несколько вопросов связанных с применением активных выпрямителей и силовых активных фильтров, таких как: учет динамических потерь в транзисторах при моделировании, оценка коэффициента несинусоидальности напряжения в точке подключения активного выпрямителя, определение допустимых пределов изменения индуктивности входных реакторов активного выпрямителя. Г.Г. Жемеров широко известен своими работами по преобразователям частоты, энергосберегающим преобразовательным системам, теории мощности. Вместе с д.т.н. Тугаев Д.В. он сформулировал концепцию определения минимума потерь энергии в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями. Им создана методика расчета дополнительных потерь энергии в преобразовательных системах, которые определяются расчетной реактивной мощностью. Профессор Г.Г. Жемеров имеет более 230 публикаций научного и учебно-методического характера.

Под руководством профессора Г.Г. Жемерова подготовлены и успешно защищены десять кандидатских и две докторские диссертации. Он является членом двух специализированных ученых советов при НТУ «ХПИ».

Друзья, коллеги, многочисленные ученики Георгия Георгиевича искренне поздравляют его с юбилеем, желают ему доброго здоровья и дальнейших успехов в научной и методической работе. Редакционная коллегия журнала «Электротехніка і електромеханіка» присоединяется к этим пожеланиям, выражая надежду на дальнейшее долгосрочное и плодотворное сотрудничество с юбилеем.

## КРАВЧЕНКО ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

(к 70-летию со дня рождения)

Владимир Иванович Кравченко родился 16 октября 1947 г. в г. Минеральные Воды Ставропольского края. В 1966 г. поступил на учебу в Харьковский политехнический институт (ХПИ) на инженерно-физический факультет, который он в 1972 г. окончил с отличием по специальности «Инженерная электрофизика». С 1972 г. по 1975 г. он учился в очной аспирантуре ХПИ по специальности «Техника высоких напряжений». В период 1975-1981 гг. работал старшим научным сотрудником в известной в научно-технических кругах бывшего СССР научно-исследовательской лаборатории НИЛ ТВН и ПТ ХПИ. С 1981 г. по 1987 г. – старший преподаватель кафедры «Инженерной электрофизики» (ИЭФ) «ХПИ». В 1978 г. Владимир Иванович успешно защитил кандидатскую диссертацию на актуальную тему «Исследование экранирующих свойств металлических сплошных оболочек различных геометрических форм при воздействии на них импульсного электромагнитного поля». С 1987 г. по 1996 г. он работал доцентом кафедры ИЭФ «ХПИ». Работая на этой кафедре, он занимался проблемами электромагнитной совместимости и стойкости технических средств к мощным помехам. Эта научная работа оказалась актуальной и плодотворной. В 1992 г. Владимир Иванович стал организатором и руководителем Технического Комитета Украины по стандартизации в области электромагнитной совместимости и стойкости технических средств (ТК-22 ЭМС). В 1994 г. по его инициативе при НИПКИ «Молния» ХГПУ был создан Центр сертификационных испытаний «Импульс», аккредитованный Госстандартом Украины на независимость и техническую компетентность. С 1996 г. и по сей день Владимир Иванович является директором НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

В 1997 г. В.И. Кравченко успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Научно-технические основы обеспечения электромагнитной стойкости технических средств к поражающему действию грозовых разрядов» по специальности «Техника сильных электрических и магнитных полей». С появлением первого доктора технических наук в НИПКИ «Молния» ХГПУ существенно активизировалась работа по подготовке в этом известном своими фундаментальными теоретическими и экспериментальными работами научном учреждении страны научных специалистов высшей квалификации. В данном научно-исследовательском институте успешно трудились пять докторов технических и физико-математических наук и девять кандидатов технических наук. На высоком уровне выполняется госбюджетная и хозяйственная тематика. Издаются монографии, учебные пособия и огромное количество научных печатных работ. В 2002 г. НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» за высокие достигнутые результаты в научно-технической работе был удостоен Серебряного диплома Лауреата международного конкурса «Золотая фортуна». Область научных интересов Владимира Ивановича охватывает



электромагнитную совместимость и электромагнитную стойкость технических объектов, стандартизацию и метрологию. Большой вклад внес Владимир Иванович в то, что на сегодня НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» является единственным в Украине Центром по проведению государственных и сертификационных электромагнитных испытаний летательных аппаратов и авиационного оборудования. Под его научным руководством и при его непосредственном творческом участии сотрудники НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» внесли большой вклад в комплекс работ по обеспечению требований электромагнитной совместимости первого экспериментального борта отечественного самолета АН-148. За данный цикл работ в 2004 г.

группа сотрудников института во главе с Владимиром Ивановичем была удостоена высокой награды страны – присуждения Государственной премии Украины в области науки и техники. В 2004 г. он был награжден Почетной Грамотой Верховного Совета Украины, а в 2011 г. – Почетной Грамотой Кабинета Министров Украины. В 2016 г. Владимир Иванович был удостоен высокого почетного звания – он стал Заслуженным деятелем науки и техники Украины. Много сделал В.И. Кравченко для развития уникального высоковольтного научно-испытательного полигона института, ставшего в 1999 г. объектом Национального достояния Украины, в том числе и для того, чтобы в 2006 г. сразу 10 ученых НТУ «ХПИ» и НИПКИ «Молния» за работу «Научно-технические основы разработки современной высоковольтной импульсной техники» стали лауреатами Государственной премии Украины в области науки и техники. В 2003 г. Владимиру Ивановичу было присвоено ученое звание профессора. Он подготовил двух докторов и четырех кандидатов технических наук. О высоком научно-техническом уровне этого ученого свидетельствует то, что он автор ряда научных монографий («Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи», 1987 г.; «Грозозащита радиоэлектронных средств», 1991 г.; «Электромагнитное оружие», 2008 г.; «Электромагнитный терроризм», 2011 г.), соавтор учебного пособия «Техника и электрофизика высоких напряжений» (2005 г.) и книги «НИПКИ «Молния» на рубеже тысячелетий» (2014 г.). Он автор более 150 научных трудов в области ЭМС, техники и электрофизики высоких напряжений и больших импульсных токов.

Ректорат НТУ «ХПИ», деканат физико-технического факультета, сотрудники кафедры «Инженерной электрофизики», коллектив возглавляемого им института, его друзья и товарищи желают дорогому Владимиру Ивановичу крепкого здоровья, большого счастья, успешной перспективы во всех его начинаниях и устремлениях, творческого вдохновения и дальнейших успехов в его научно-технической деятельности. Редакционная коллегия журнала «Электротехника і електромеханіка» присоединяется к этим пожеланиям.

## ЗАГІРНЯК МИХАЙЛО ВАСИЛЬОВИЧ

(до 70-річчя з дня народження)

25 вересня 2017 року виповнюється 70 років Михайлу Васильовичу Загірняку – дійсному члену (академіку) Національної академії педагогічних наук (НАПН) України, заслуженому діячеві науки і техніки України, лауреату державної премії України в галузі науки і техніки, доктору технічних наук, професору, ректору Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (КрНУ).

М.В. Загірняк відомий в Україні та за кордоном як учений і педагог, який зробив великий внесок у розвиток електромеханіки і підготовку інженерних кадрів.

Михайло Загірняк народився в Луганську. 1970 року закінчив з відзнакою Луганський машинобудівний інститут (ЛМБІ) зі спеціальності «Електричні машини і апарати». Працював у відділі головного конструктора Луганського тепловозобудівного заводу, після служби в армії – на кафедрі електричних машин і апаратів ЛМБІ, де за 30 років пройшов шлях від інженера до завідувача кафедрою. 1977 року захистив кандидатську дисертацію, працював відповідальним секретарем приймальної комісії інституту, 1980 року став доцентом.

Із 1989 року М. В. Загірняк обіймав посади проrektора ЛМБІ (пізніше Східноукраїнського національного університету імені Володимира Дала) з міжнародних зв'язків, навчальної та наукової роботи. Із 1994 по 2002 роки паралельно завідував кафедрою електромеханіки. 1993 року йому було присвоєно звання професора, а 1996 року присуджено науковий ступінь доктора технічних наук.

У листопаді 2002 року колективом Кременчуцького державного політехнічного університету (КДПУ, нині КрНУ) обраний ректором Кременчуцького університету, де і працює до сьогодні.

Як відомий спеціаліст у галузі електромеханіки, він на підставі розвинутої і узагальненої ним методології проектування електромагнітних сепараторів проводив особисто й очолював наукову, конструкторську і практичну роботу щодо вдосконалення та розробки цих пристроїв. Результати його наукових досліджень, пов'язані з визначенням енергетичних показників роботи частотно-регульованого електроприводу, були використані в науковій роботі колективу провідних науковців України «Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення», що 2016 року отримала державну премію України у галузі науки і техніки.

Професор М.В. Загірняк очолює наукову школу «Електромагнітні та електромеханічні процеси в електричних машинах і апаратах». Був керівником восьми кандидатських і консультантом трьох докторських дисертацій.

М.В. Загірняк приділяє значну увагу науково-методологічним засадам удосконалення менеджменту та технологій навчання для забезпечення якості вищої освіти. Ураховуючи його досягнення у цьому напрямі, 2010 року він був обраний членом-кореспондентом, а 2016 року – академіком НАПН України.

Професор М.В. Загірняк – автор понад 600 наукових праць, серед яких 13 монографій, вісім брошур, чотири підручники та 12 навчальних посібників із грифом Міністерства освіти і науки України, більш ніж 70 авторських свідоцтв і патентів на винаходи. Понад 100 праць видано у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних «ISI Web of Knowledge» і «Scopus».

Його досягнення визнані не тільки в Україні, а і за кордоном. Він є членом Президії НАПН України, Наукової Ради МОН України, Ради Північно-Східного наукового центру НАН і МОН України, керівником семінару «Електромагнітні та електромеханічні процеси в електричних машинах і апаратах» Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», членом Академічної ради вищої школи європейських і регіональних студій (Чеські Будейовиці, Чехія).

Загірняк М. В. – голова спеціалізованої ради з захисту докторських і кандидатських дисертацій у КрНУ, головний редактор чотирьох і член редакційних колегій чотирьох вітчизняних видань, член редакційних колегій чотирьох закордонних видань. Керівник наукових проектів у рамках Програми науково-технічного співробітництва між Україною та Словенією. Читав лекції в Маріборському університеті (Словенія). Дійсний член чотирьох міжнародних та українських громадських академій і трьох міжнародних професійних співтовариств (у тому числі IEEE Senior member).

За плідну науково-педагогічну і громадську діяльність М.В. Загірняк нагороджений орденами «За заслуги» усіх трьох ступенів, Почесними грамотами Кабінету Міністрів України та Верховної Ради України, державними та відомчими медалями, знаками і грамотами. Йому присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки України». 2016 року за особистий внесок у розвиток науки й освіти міста М.В. Загірняку присвоєно звання «Почесний громадянин міста Кременчук».

Колектив Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, редколегія журналу «Електротехніка і електромеханіка», друзі та колеги щиро вітають Михайла Васильовича з ювілеєм та бажає міцного здоров'я, успіхів, довгих років, активної та плідної роботи!



00008

**Матеріали приймаються за адресою:**

**Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПИ", вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна**

**Електронні варіанти матеріалів по e-mail: [a.m.grechko@gmail.com](mailto:a.m.grechko@gmail.com)**

**Довідки за телефонами: +38 050 653 49 82 Клименко Борис Володимирович**

**+38 067 359 46 96 Гречко Олександр Михайлович**

