

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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



«ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS»

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

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

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

NATIONAL EDITORIAL BOARD*

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

* Members of National Editorial Board work in leading Ukrainian scientific, educational and research institutions

Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна
Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Frunze Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine

тел. / phone: +38 057 7076281, +38 067 359 46 96, e-mail: a.m.grechko@mail.ru (Гречко Олександр Михайлович / Grechko O.M.)

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

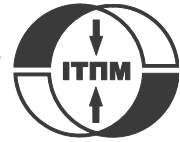
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2016
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2016

Підписано до друку 25.04.2016 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-02-2016. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки Вировець Л.П. e-mail: vsv_2007@ukr.net

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



ЗМІСТ

Електротехніка. Визначні події. Славенні імена

- Баранов М.И.** Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 31:
Портрет харьковского физика Александра Ильича Ахиезера 3

Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка

- Жемеров Г.Г., Тугай Д.В.** Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии
в пространственных pqr координатах 11

Теоретична електротехніка та електрофізика

- Grinchenko V.S., Chunikhin K.V., Grinchenko N.V.** Low-frequency magnetic field shielding by a circular passive
loop and closed shells 20
- Ерисов А.В., Пелевина Е.Д., Пелевин Д.Е.** Метод расчета индукции магнитного поля линий
электропередачи на основе цилиндрических пространственных гармоник 24

Техніка сильних електричних та магнітних полів. Кабельна техніка

- Баранов М.И.** Новая гипотеза и физические основы возникновения четочной молнии в атмосфере Земли 28
- Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S.** Estimating the limit possibilities of the step charging system
for capacitive energy storage 35
- Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г.** Релаксационные потери в полиэтиленовой изоляции кабелей коаксиальной
конструкции в условиях повышенной влажности 38

Електричні станції, мережі і системи

- Olszowiec P.** Модификации вентильных схем непрерывного контроля изоляции сетей низкого напряжения
с изолированной нейтралью 43
- Саенко Ю.Л., Каложный Д.Н.** Численный анализ математических моделей распределения фактических вкладов
в несимметрию и отклонение напряжений в точках общего присоединения систем электроснабжения 47
- Сендерович Г.А., Дяченко А.В.** Актуальность определения ответственности за нарушение качества
электроэнергии по показателям колебаний напряжения 54
- Сокол Е.И., Гриб О.Г., Швец С.В.** Структурно-параметрическая организация элементов энергосистемы
в условиях сетцентризма 61
- Сокол Е.И., Резинкина М.М., Гриб О.Г., Васильченко В.И., Зуев А.А., Бортников А.В., Сосина Е.В.** Методика
комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины с целью повышения
безопасности ее функционирования 65

Дискусії

- Gurevich V.I.** The problem of correct choice of ferrite beads 71

TABLE OF CONTENTS

Electrical Engineering. Great Events. Famous Names

- Baranov M.I.** An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 31:
Portrait of the Kharkiv physicist Alexander Ilyich Akhiezer 3

Electrotechnical complexes and systems. Power Electronics

- Zhemerov G.G., Tugay D.V.** Components of total electric energy losses power in pqr spatial coordinates 11

Theoretical Electrical Engineering and Electrophysics

- Grinchenko V.S., Chunikhin K.V., Grinchenko N.V.** Low-frequency magnetic field shielding by a circular passive
loop and closed shells 20
- Yerisov A.V., Pielievina K.D., Pelevin D.Ye.** Calculation method of electric power lines magnetic field strength
based on cylindrical spatial harmonics 24

High Electric and Magnetic Field Engineering. Cable Engineering

- Baranov M.I.** A new hypothesis and physical bases of origin of rosary lightning in the atmosphere of Earth 28

Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage	35
Bezprozvannyh G.V., Kyessayev A.G. Relaxations losses in polyethylene insulation of coaxial cable structure during aging in high humidity conditions	38

Power Stations, Grids and Systems

Olszowiec P. Modifications of diode rectifier circuits for continuous insulation measurement in live AC IT networks.....	43
Sayenko Yu.L., Kalyuzhnyi D.N. Numerical analysis of mathematical models of the factual contribution distribution in asymmetry and deviation of voltage at the common coupling points of energy supply systems.....	47
Senderovich G.A., Diachenko A.V. The relevance of determining responsibility for violation of power quality in terms of voltage fluctuations	54
Sokol Y.I., Gryb O.G., Shvets S.V. The structural and parametrical organization of elements of a power supply system in the conditions of network centrism.....	61
Sokol E.I., Rezikina M.M., Gryb O.G., Vasilchenko V.I., Zuev A.A., Bortnikov A.V., Sosina E.V. A method of complex automated monitoring of Ukrainian power energy system objects to increase its operation safety	65

Discussions

Gurevich V.I. The problem of correct choice of ferrite beads	71
--	----

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал «Електротехніка і Електромеханіка» – передплатне видання. Вартість передплати на 2016 рік – 289,26 грн., на два місяці – 48,21 грн., на чотири місяці – 96,42 грн., на шість місяців – 144,63 грн., на вісім місяців – 192,84 грн., на десять місяців – 241,05 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

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

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

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

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

Журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory, представлений у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка Наукова», реферативному журналі «Джерело», індексується у міжнародних наукометричних базах даних Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИНЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, Elektronische Zeitschriftenbibliothek 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.uran.ua/>). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу.

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 31: ПОРТРЕТ ХАРЬКОВСКОГО ФИЗИКА АЛЕКСАНДРА ИЛЬИЧА АХИЕЗЕРА

Наведено короткий науково-історичний нарис про відомого фізика-теоретика Харківщини – академіка АН УРСР (НАН України) Ахієзера О.І. і його видатний внесок в світову фізичну науку. Бібл. 33, рис. 10.

Ключові слова: історія, фізика, Харківщина, видатні наукові досягнення.

Приведен краткий научно-исторический очерк об известном физике-теоретике Харьковщины – академике АН УССР (НАН Украины) Ахиезере А.И. и его выдающемся вкладе в мировую физическую науку. Библ. 33, рис. 10.

Ключевые слова: история, физика, Харьковщина, выдающиеся научные достижения.

Введение. В [1] автором были описаны портреты выдающихся физиков «высоковольтной бригады» Украинского физико-технического института (УФТИ) – А.К. Вальтера, К.Д. Синельникова, А.И. Лейпунского и Г.Д. Латышева, которых в большей степени можно назвать физиками-экспериментаторами, нежели физиками-теоретиками. Безусловно, таким весьма условным подходом к делению физиков на экспериментаторов и теоретиков не умаляется роль указанных выше легендарных харьковских ученых в разработке ими многих теоретических вопросов в области ядерной физики, ускорительной техники, физики высоких энергий и плазменной техники. Для достижения в УФТИ научных результатов мирового уровня с самого начала организации в нашей стране этого физического института нового поколения (1928 г.) в его структуре впервые в СССР был специально выделен теоретический отдел или структурно организована в период повального увлечения в 1930-е гг. бригадной формой организации труда в СССР так называемая «теоретическая бригада» [1, 2]. Заслуга в структурном образовании такого чисто теоретического подразделения в УФТИ принадлежит его первому директору, будущему академику АН СССР (1958 г.) Ивану Васильевичу Обреимову (1894-1981 гг.). Первым руководителем теоретического отдела УФТИ в период 1928-1931 гг. был известный советский физик Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904-1994 гг.), впервые в мире предложивший в 1932 г. протонно-нейтронную модель ядра атома вещества [2, 3]. В период 1932-1937 гг. теоретический отдел УФТИ возглавлял талантливый советский физик и будущий лауреат Нобелевской премии по физике (за 1962 г.) Лев Давидович Ландау (1908-1968 гг.) [2, 4, 5]. После переезда Ландау Л.Д. в г. Москву (1937 г.), где он стал руководителем теоретического отдела Института физических проблем (ИФП) АН СССР (директор ИФП – всемирно известный ученый, академик АН СССР и будущий лауреат Нобелевской премии по физике (за 1978 г.) Петр Леонидович Капица (1894-1984 гг.) [4]), теоретический отдел УФТИ с 1938 г. возглавил его ученик, к.ф.-м.н. и будущий академик АН УССР Александр Ильич Ахиезер [2]. Заметим, что в УФТИ в 1941 г. был создан и второй теоретический отдел, во главе которого стал д.ф.-м.н. и будущий академик АН СССР Илья Михайлович Лифшиц (1917-1982 гг.) [2]. Сотрудники этих теоретических отделов «плечом к плечу» и в тесном научно-производственном контакте

с сотрудниками всех других отделов УФТИ эффективно решали возложенные на них директивными органами советской страны сложные научно-технические задачи в области приоритетных направлений ядерной и экспериментальной физики, носящих преимущественно специальный (закрытый) характер. «Чистой» наукой сотрудники теоретических отделов УФТИ занимались только после решения своих непосредственных задач по научному сопровождению выполняемых в институте конструкторских разработок и изготовления на их основе в «металле» запланированных директивными решениями изделий. Используя форму краткого научно-исторического очерка, в меру своих физических знаний и эпистолярных способностей постараемся «нарисовать» многогранный портрет выдающегося отечественного физика-теоретика А.И. Ахиезера (рис. 1), ставшего одной из ярких легенд г. Харькова.



Рис. 1. Выдающийся советский и украинский физик-теоретик, д.-ф.м.н., проф., академик АН УССР (НАН Украины), заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственных премий Украины в области науки и техники Александр Ильич Ахиезер (1911-2000 гг.) [7]

Основные этапы жизненного и творческого пути харьковского физика. Родился Ахиезер А.И. 31 октября 1911 г. в г. Черикове Могилевской губернии (ныне Республика Беларусь), входившей тогда в состав

© М.И. Баранов

Российской империи, в семье земского врача Ильи Александровича и Натальи Григорьевны Ахиезеров [6]. В 1934 г. он окончил энергетический факультет Киевского политехнического института и после экзаменационного собеседования на знание физики и математики у придирчивого Л.Д. Ландау начал работать в теоретическом отделе УФТИ. В 1936 г. Ахиезер А.И. (рис. 2) успешно защитил кандидатскую диссертацию, посвященную изучению рассеяния фотонов на фотонах в области высоких частот (область низких частот для физического случая по рассеянию «света на свете» была намного раньше рассмотрена выдающимися немецкими физиками Леонардом Эйлером (1707-1783 гг.) и Вернером Гейзенбергом (1901-1976 гг.) [8]), и стал к.ф.-м.н. Эта научная задача перед ним была поставлена его научным руководителем, заведующим теоретическим отделом УФТИ, д.ф.-м.н., проф. Л.Д. Ландау. Кстати, Ахиезер А.И. оказался третьим физиком, сдавшим Ландау Л.Д. «теорминимум» (два экзамена по спецматематике и семь экзаменов по основным разделам теоретической физики [4, 5]). Первым физиком, сдавшим Ландау Л.Д. «теорминимум», был Компанец Александр Соломонович (1914-1974 гг.), а вторым – Лифшиц Евгений Михайлович (1915-1985 гг.), которые в будущем стали известными советскими физиками-теоретиками [6, 9]. Далее внимание читателя следует обратить на работавшего в 1930-е гг. в одном с Ахиезером А.И. теоретическом отделе УФТИ (период 1935-1937 гг.) венгра Ласло Тисса (см. рис. 2), окончившего в 1928 г. Геттингентский университет, добровольно приехавшего на работу в один из лучших тогда в Европе научных физических центров – УФТИ и ставшего в 1960 г. профессором физики в Массачусетском технологическом институте (США). Именно американский долгожитель, проф. Л. Тисса оказался для истории развития в УФТИ науки и техники последним из свидетелей того бурного для УФТИ времени 1930-х гг. и действующих в нем научно-исторических лиц [7, 10].



Рис. 2. К.ф.-м.н. Ахиезер А.И. (слева) и в будущем известный американский физик-теоретик Ласло Тисса (1907-2009 гг.) – сотрудники одного теоротдела УФТИ, руководимого талантливым физиком-теоретиком д.-ф.м.н., проф. Ландау Л.Д. (лабораторный корпус УФТИ на старой институтской площадке по ул. Чайковского, 1936 г., г. Харьков) [7, 10]

В конце 1930-х гг. в центре научных интересов Ахиезера А.И. оказывается взаимодействие ультразвука с кристаллами. В 1938 г. им было получено

кинетическое уравнение для газа квазичастиц в кристаллах. Он развил кинетическую теорию поглощения энергии звука в диэлектриках и металлах. Разработанный им механизм поглощения энергии звука в кристаллах получил в физике название «механизм поглощения Ахиезера» [6, 8, 11]. В 1940 г. Ахиезер А.И. по этой тематике успешно защитил докторскую диссертацию, а в 1941 г. стал профессором Харьковского государственного университета (ХГУ) им. В.Н. Каразина [11]. В период 1936-1990 гг. он преподавал в ХГУ им. В.Н. Каразина, а в период 1951-1964 гг. – в Военной инженерной радиотехнической академии [11]. В 1940 г. он основал кафедру теоретической ядерной физики на физико-математическом факультете ХГУ им. В.Н. Каразина и заведовал ею до 1975 г. В период военной эвакуации УФТИ (1941-1943 гг.) в г. Алма-Ату (Казахстан) параллельно с основной работой в должности заведующего теоретическим отделом УФТИ-ФТИ (период 1938-1988 гг.) по совместительству преподавал в Казахском горном институте [11]. В период 1944-1952 гг. он по приглашению академика АН СССР Игоря Васильевича Курчатова как командированный от УФТИ-ФТИ работал в г. Москве в специальной Лаборатории №2 (ныне РИЦ «Курчатовский институт») над решением физических задач в рамках Атомного проекта СССР [12]. Как видим, он, в отличие от своего старшего брата-математика Наума Ильича Ахиезера (1901-1980 гг.) [13], от поступившего ему предложения от научного руководителя этого грандиозного по масштабам решаемых проблем и капиталовложений научно-технического проекта, выдающегося советского ученого и организатора науки И.В. Курчатова не отказался. С учетом наступившего раскочеривания в РФ и Украине многих работ периода 1940-1950-х гг. по этому закрытому суперпроекту [3] и появления в открытой печати и сети Интернет многих сведений о них сейчас можно говорить о том, что одной из важных проблемных задач, решаемых в «московский период» трудовой деятельности Ахиезера А.И. (рис. 3), была задача по рассеянию «медленных» нейтронов в кристаллах [14]. Эта задача Ахиезером А.И. решалась совместно с талантливым советским физиком-теоретиком и будущим академиком АН СССР Исааком Яковлевичем Померанчуком (1913-1966 гг.), также работавшим в 1930-е гг. в теоретическом отделе УФТИ под руководством легендарного советского физика-теоретика Л.Д. Ландау [4].

О важности данной физической задачи, успешно решенной Ахиезером А.И. и Померанчуком И.Я., может свидетельствовать то, что без ее решения невозможно было правильно разработать и создать в СССР как надежно функционирующий ядерный реактор для получения плутония-239 (ядерной взрывчатки №1), так и ядерную технологию применения урана-235 (ядерной взрывчатки №2) для первых советских атомных бомб [3, 14]. При этом они (Ахиезер А.И. и Померанчук И.Я.) независимо от выдающегося итальянского физика-теоретика, лауреата Нобелевской премии по физике (за 1938 г.) Энрико Ферми [4] установили возможность получения с помощью некоторых кристаллических материалов (например, сверхчистого графита [4, 8]) «холодных» нейтронов, развили

теорию рефракции нейтронов (термин «*рефракция*» происходит от лат. слова «*refractus*» – «*преломленный*» и обозначает «*преломление*» [15]) и теорию поглощения нейтронов в однородных твердых средах [14]. Часть результатов этих исследований вошла в их совместную научную монографию «*Некоторые вопросы теории ядра*» (1948 г.), удостоенную в 1949 г. премии им. Л.И. Мандельштама АН СССР [14].



Рис. 3. Д.ф.-м.н., проф. Ахиезер А.И. в рабочем кабинете заведующего отделом теоретической физики УФТИ (в дни краткосрочного приезда из г. Москвы на «побывку» с семьей и сотрудниками института), возобновившего свою постоянную работу после тяжелых лет войны и военной эвакуации в г. Алма-Ату (1946 г., УФТИ-ФТИ, г. Харьков) [7]

Совмещая до 1952 г. работу в УФТИ-ФТИ (в своем теоретическом отделе и организованной в 1945 г. по инициативе научного руководителя Атомного проекта СССР, академика АН СССР И.В. Курчатова под началом директора института, д.ф.-м.н., проф. Кирилла Дмитриевича Синельникова [1] специальной Лаборатории №1, просуществовавшей в УФТИ-ФТИ до 1950 г.) и московской специальной Лаборатории №2, руководимой легендарным И.В. Курчатовым и занимающейся исключительно проблемами Атомного проекта СССР, Ахиезер А.И. расширяет «поле» своей научной деятельности. Оно стало включать квантовую электродинамику и физику элементарных частиц, ядерную физику и теорию линейных ускорителей, физику твердого тела и магнетизм, физику плазмы, магнитную гидродинамику и теорию взаимодействия заряженных частиц с кристаллами [14]. Используя данные материалов нынешних Интернет-сообщений [6, 9-12, 16] и ряда научных статей Ахиезера А.И. [17-27] укажем некоторые полученные лично им и совместно с его любимыми учениками (рис. 4) фундаментальные результаты в указанных областях физики за многолетний период их теоретических исследований.

Основные научные достижения харьковского физика. Научную известность в СССР и за рубежом д.ф.-м.н., проф., академика АН УССР Ахиезеру А.И. принесли его теоретические разработки в названных выше областях физики. Сформулируем в сжатом виде с учетом опубликованных материалов в [6, 9-12, 16-27] основные научные достижения, полученные им в течение 1930-1990-х гг. в области современной физики:

- Строго решены задачи о рассеянии фотонов высоких энергий на фотонах (квантовофизические задачи рассеяния «света на свете» для высоких частот) и о когерентном рассеянии фотонов на ядрах атомов (совместно с И.Я. Померанчуком, 1936-1938 гг.);
- Разработал основы новой кинетической теории поглощения звука в твердых телах («*механизм поглощения Ахиезера*», 1938 г.);
- Изучены процессы рассеяния и поглощения «медленных» нейтронов кристаллами вещества (совместно с И.Я. Померанчуком, 1944-1947 гг.);
- Предсказал (независимо от неизвестных ему тогда результатов Э. Ферми) возможность стабильного получения в ядерных экспериментах и ядерных реакторах «холодных» нейтронов (1944-1947 гг.);
- Ввел новую концепцию магнонов (квантов спиновых волн) в ферродиелектриках и рассмотрел их взаимодействие с фононами и между собой (1946 г.);
- Предсказал расчетным путем электронный циклотронный резонанс, имеющий важное значение в физике (совместно с Л.Э. Паргамаником, 1947 г.);
- Развил теорию резонансных ядерных реакций и теорию дифракции при рассеянии заряженных частиц на ядрах атомов (совместно с И.Я. Померанчуком, «*модель Ахиезера – Померанчука*», 1948-1949 гг.);
- Установил условия эволюционности и критерии устойчивости магнитогидродинамических волн в веществе (совместно с Г.Я. Любарским и Р.В. Половинным, 1948 г.);
- Теоретическим путем предсказал экспоненциальный рост флуктуаций в плазме под действием электронного пучка (совместно с Я.Б. Файнбергом, «*пучковая неустойчивость плазмы*», 1949 г.);
- Внес существенный вклад в развитие теории ударных электромагнитных волн в плазме (1949 г.);
- Теоретически предсказал дифракционное расщепление дейтрона (ядра атома тяжелого водорода – дейтерия, содержащего один протон и один нейтрон [8, 15]) (совместно с А.Г. Ситенко, 1955 г.);
- Предсказал теоретическим путем эффект магнитоакустического резонанса в веществе, признанный в СССР как *научное открытие* №46 с приоритетом от 1956 г. и подтвержденный экспериментально (совместно с В.Г. Барьяхтаром, С.В. Пелетминским, 1956 г.);
- Положил начало исследованиям в СССР в новой для советских ученых физической области проблемных задач по электронной акустике (1956 г.);
- Развил теорию поглощения энергии ультразвука в металлах, диэлектриках и магнитных кристаллах вещества (совместно с Г.Я. Любарским и М.И. Кагановым, 1957 г.);
- Изучил расчетным путем рассеяние электромагнитных волн на флуктуациях плазмы (совместно с А.Г. Ситенко и И.Г. Проходой, 1957 г.);
- Построил уточненную теорию релаксационных и кинетических процессов в магнитоупорядоченных кристаллах вещества (1959 г.);
- Внес значительный научный вклад в теорию линейных ускорителей электронов и более тяжелых частиц – протонов и ионов (совместно с Я.Б. Файнбергом, Н.А. Хижняком, Г.Я. Любарским, К.Д. Синельниковым и А.К. Вальтером, 1950-1960-е гг.);

- Развил ряд теорий квантовой электродинамики и на их основе рассчитал радиационные поправки для ряда квантово-электродинамических эффектов в области взаимодействия элементарных частиц высоких энергий (совместно с Р.В. Половиним, 1963 г.);

- Рассчитал ряд электромагнитных характеристик для адронов (элементарных частиц, подверженных сильному физическому воздействию – барионов и мезонов [8, 15]) и обобщил кварковую модель строения элементарных частиц с учетом процессов электромагнетизма (совместно с М.П. Рекало, 1964 г.);

- Развил теорию рассеяния пионов (элементарных частиц, имеющих массу около 270 масс покоя электрона и являющихся переносчиками ядерных сил взаимодействия в веществе [8, 15]) в ядерной материи вещества (совместно с И.А. Ахиезером, 1964 г.);

- Изучил теоретическим путем процессы излучения каналированных электронов и позитронов в кристаллах вещества (совместно с Н.Ф. Шульгой и В.Ф. Болдышевым, 1974-1982 г.);

- Разработал теорию квантовых электродинамических явлений взаимодействия частиц в кристаллах вещества (совместно с Н.Ф. Шульгой, 1975-1995 г.).



Рис. 4. Академик АН УССР Ахиезер А.И. (второй слева) со своими учениками-докторами наук и будущими украинскими академиками в области теоретической физики за обсуждением полученного решения важной физической задачи (слева-направо: В.Г. Барьяхтар, С.В. Пелетминский и К.Н. Степанов) (1960-е годы, УФТИ-ФТИ, г. Харьков) [28]

Вот тот основной и разумеется не совсем полный перечень значимых для мирового физического сообщества научных результатов, полученных академиком АН УССР (НАНУ) Ахиезером А.И. за многие десятилетия его активного творческого труда в указанных выше актуальных областях современной физики. Сформулированные здесь в концентрированном виде выдающиеся научные достижения и заслуги д.ф.-м.н., проф. Ахиезера А.И. (рис. 5) перед нашими странами, отечественной наукой и высшим образованием были отмечены следующими почетными знаками отличия и высокими государственными наградами [6, 9, 14]:

- Медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг.» (1945 г.);

- Премией им. Л.И. Мандельштама АН СССР (за книгу «Некоторые вопросы теории ядра», 1949 г.);

- Орденом «Знак Почета» (1954 г.);

- Избранием член-корреспондентом (1958 г.) и академиком АН УССР (1964 г.);

- Двумя орденами Трудового Красного Знамени (1971 и 1981 гг.);

- Премией им. К.Д. Синельникова АН УССР (за цикл работ «Высокочастотные релаксационные процессы в магнетиках», 1978 г.);

- Государственной премией УССР в области науки и техники (за работу «Открытие и исследование динамических явлений, связанных с фононными взаимодействиями в магнитных кристаллах», 1986 г.);

- Присвоением почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники Украины» (1986 г.);

- Почетной грамотой Президиума Верховного Совета УССР (1991 г.);

- Премией им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины (за цикл работ «Квантовые и стохастические эволюционные системы в теории возмущений», 1995 г.);

- Орденами Украины «За заслуги» III-ей (1996 г.) и II-ой (1999 г.) степеней;

- Международной премией ИТЭФ им. И.Я. Померанчука РАН (1998 г.);

- Премией им. А.С. Давыдова НАН Украины (за цикл работ «Взаимодействие частиц высокой энергии с атомными ядрами и кристаллами», 2000 г.);

- Государственной премией Украины в области науки и техники (2002 г., посмертно).



Рис. 5. Академик АН УССР Ахиезер А.И. в мыслях и раздумьях над сложными проблемами отечественной физической науки, путями ее выживания и дальнейшего развития в современных условиях (1970-е годы, ХФТИ, г. Харьков) [7]

Харьковская научная школа теоретической физики. Академик АН УССР (НАНУ) Ахиезер А.И. стал основателем признанной в мире харьковской физической школы [11, 14, 28]. Он большое внимание уделял подготовке кадров высшей квалификации. В рамках этой научной школы под научным руководством Ахиезера А.И. физиками-теоретиками были успешно защищены более 72 кандидатских и 33 докторских диссертаций [9, 11]. Представителями этой известной физической школы были изданы в ведущих научных журналах СССР, Украины, ближнего и дальнего зарубежья сотни научных статей и десятки научных монографий. Остановимся на некоторых из этих печатных изданий. Так, первой научной монографией, изданной Ахиезером А.И. в 1948 г. по настоянию академика АН СССР И.В. Курчатова, оказалась книга «Некоторые вопросы теории ядра» (в соавторстве с И.Я. Померанчуком). В 1953 г. Ахиезером А.И. была издана важная книга «Квантовая электродинамика»

(в соавторстве с В.Б. Берестецким). Это была первая монография, обобщившая накопленный в этой суперактуальной области опыт мировой физической науки. Она была переведена на многие языки мира и не раз переиздавалась. Кроме того, Ахиезер А.И. сам и в соавторстве со своими учениками и коллегами издал следующие научные монографии на актуальные темы [6, 9, 11]: «*Спиновые волны*» (совместно с В.Г. Барьяхтаром и С.В. Пелетминским, 1968 г.); «*Электродинамика плазмы*» (в соавторстве с И.А. Ахиезером, Р.В. Половинным, А.Г. Ситенко и К.Н. Степановым, 1974 г.); «*Курс общей физики. Механика и молекулярная физика*» (в соавторстве с Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем, 1969 г.); «*Методы статистической физики*» (в соавторстве с С.В. Пелетминским, 1977 г.); «*Электродинамика адронов*» (в соавторстве с М.П. Рекало, 1977 г.); «*Биография элементарных частиц*» (в соавторстве с М.П. Рекало, 1983 г.); «*Электромагнетизм и электромагнитные волны*» (в соавторстве с И.А. Ахиезером, 1985 г.); «*Поля и фундаментальные взаимодействия*» (в соавторстве с С.В. Пелетминским, 1986 г.); «*Атомная физика*» (1988 г.); «*Электродинамика ядер*» (в соавторстве с А.Г. Ситенко и В.К. Тартаковским, 1989 г.); «*Теория фундаментальных взаимодействий*» (в соавторстве с С.В. Пелетминским, 1993 г.); «*От квантов света до цветных кварков*» (в соавторстве с Ю.П. Степановским, 1993 г.); «*Электродинамика высоких энергий в веществе*» (в соавторстве с Н.Ф. Шульгой, 1993 г.); «*Теория ядра*» (в соавторстве с Ю.А. Бережным, 1995 г.); «*Введение в теорию мультиплицирующих систем (реакторов)*» (в соавторстве с И.Я. Померанчуком, 2002 г.) и др.

Ряд учеников Ахиезера А.И. стали академиками и член-корреспондентами АН УССР (НАН Украины) [2, 6, 11]: В.Г. Барьяхтар, Д.В. Волков, Э.А. Кураев, С.В. Пелетминский, А.Г. Ситенко, Н.Ф. Шульга, Я.Б. Файнберг, П.И. Фомин, К.Н. Степанов и др. Укажем также и то, что в настоящее время академик НАНУ Виктор Григорьевич Барьяхтар (см. рис. 4) возглавляет Институт магнетизма НАН Украины (г. Киев), а академик НАНУ Николай Федорович Шульга – Институт теоретической физики им. А.И. Ахиезера ННЦ «ХФТИ» НАН Украины (г. Харьков), созданный 31 января 1996 г. на основе Указа Президента Украины от 23 июня 1993 г. [2, 29]. Имя академика НАНУ А.И. Ахиезера ему (Институту теоретической физики – ИТФ) было присвоено соответствующим Постановлением Кабинета Министров Украины от 2003 г.

Многочисленные ученики, научная общественность ХФТИ-УФТИ и ведущих ВУЗов г. Харькова, являющегося одним из крупнейших центров образования и науки Украины, тепло приветствовали выдающегося физика-теоретика современности, академика АН УССР (НАНУ) Ахиезера А.И. в юбилейные дни его 60-, 70- и 80-летия, продолжавшего активно трудиться на своем рабочем месте (рис. 6 и 7) [30, 31]. На рис. 8 запечатлены друзья по жизни и совместной работе, физики-теоретики ХФТИ, академики АН УССР Ахиезер А.И. и Волков Д.В., много сделавшие для формирования харьковской школы теоретической физики, развития физической науки в СССР и Украине и укрепления их обороноспособности [9].

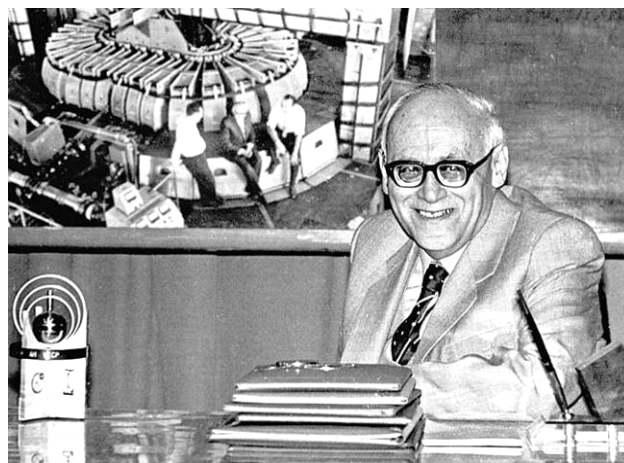


Рис. 6. Научный мэтр, академик АН УССР Ахиезер А.И. принимает поздравления от коллег в день чествования своего 70-летия и торжественного заседания по этому важному для научной общественности юбилейному событию Ученого совета ХФТИ (октябрь 1981 г., ХФТИ, г. Харьков) [7]



Рис. 7. Академик АН УССР Ахиезер А.И. (справа) на заседании Ученого совета ХФТИ принимает поздравления по случаю своего 70-летия (юбилейные адреса своему учителю вручает его талантливый ученик-академик АН УССР Барьяхтар В.Г. (слева), октябрь 1981 г., ХФТИ, г. Харьков) [28]



Рис. 8. Харьковские физики-теоретики, академики АН УССР Ахиезер А.И. (слева) и Волков Д.В. (справа) в рабочем кабинете лабораторного корпуса ХФТИ на старой площадке института по ул. Чайковского за обсуждением материалов новой проблемной задачи (1991 г., г. Харьков) [7]

Уйдя на заслуженную пенсию и домашний покой, Александр Ильич, несмотря на свою практическую слепоту в конце 1990-х гг. (сделанные хирургические операции его зрение не спасли), благодаря ясному уму, своему техническому секретарю и одновременно родной дочери Зое Александровне Спольник, постоянно поддерживал людские и научные контакты с родным ему ИТФ ННЦ «ХФТИ» НАН Украины (прежде всего, со своими преданными учениками и ставшими известными учеными – С.В. Пелетминским, Н.Ф. Шульгой и К.Н. Степановым) [28, 32]. На рис. 9 приведен один из таких случаев, связанных с участием академика НАН Украины Ахиезера А.И. в торжественных мероприятиях ХФТИ по случаю 90-летия со дня рождения Льва Давидовича Ландау [28].



Рис. 9. Академик НАНУ Ахиезер А.И. на заседании Ученого совета ХФТИ делится своими воспоминаниями о великом физике-теоретике современности и своем учителе Льве Давидовиче Ландау, 90-летней годовщине со дня рождения которого были посвящены данные торжественные сборы научно-технической общественности института, ВУЗов и г. Харькова в целом (январь 1998 г., ХФТИ, г. Харьков) [7]

Особенности личности и образа жизни харьковского физика. Американский физик-теоретик, проф. Л. Тисса (1907-2009 гг.), работавший в 1930-е гг. вместе с А.И. Ахиезером в теоретическом отделе УФТИ, руководимом тогда Л.Д. Ландау, в своих воспоминаниях от 2001 г. как один из «старых» свидетелей о нашем герое-ученом отмечал следующее [10]: «...Он сохранил традиции Л.Д. Ландау как в отношении качества, так и широты приложений во всех областях теоретической физики. Л.Д. Ландау, очевидно, им гордился». Вспоминая своего учителя, академик АН УССР (НАНУ) А.И. Ахиезера, его талантливые ученики-академики НАНУ В.Г. Барьяхтар (1930 г.р.) и С.В. Пелетминский (1931 г.р.) говорили [28, 33]: «...Он был замечательным учителем, он был учителем, который знал всю физику, он был строгим и требовательным учителем и он нас любил, как своих детей». Александр Ильич своим ученикам часто напоминал [28]: «...Работать надо с полной отдачей и очень тщательно продумывать изложение результатов. Надо тщательно выбирать место их публикации. Надо уметь выслушивать критику оппонентов». Он был деликатен со своими сотрудниками (рис. 10), защищал их во всех начальственных кабинетах и умел

их ценить. Постоянно прививал им следующие принципы ведения научной работы [28]: «*Овладевай новой техникой исследований. Имей смелость отказаться от своего результата, даже если ты уже получил одобрение классика естествознания. Умей ценить дискуссии с коллегами*». Преподавание в ХГУ-ХНУ им. В.Н. Каразина и в Военной инженерной радиотехнической академии для Александра Ильича было святым делом в течение всей его жизни. К педагогической деятельности он привлекал и своих маститых учеников [28]. Он любил студенческую молодежь и любил читать ей лекции [16, 28]. Общение А.И. Ахиезера со студентами всегда доставляло ему немалую радость. В кругу коллег он придерживался жесткой принципиальной позиции [28]: «...*Если вы не любите студентов, вам надо немедленно бросать преподавательскую работу. Нельзя самоутверждаться на студентах. Это аморально*». Александр Ильич был требовательным педагогом высшей школы. Он исключительно прозрачно и доступно объяснял своим студентам сложный материал. Он говорил, что им материал объяснять надо [16]: «...*По-работничьи, так, чтобы пролетариату было понятно*». Он любил хорошую шутку и юмор. Шутки были неотъемлемой частью его лекций. Этот ученый делал свои лекции незабываемыми. Он полагал, что «*студенту надо иногда дать отдохнуть от конспектирования, поэтому в лекции необходимо делать перерывы для рассказа какого-нибудь анекдота или истории из жизни*» [16]. Использовал в своем лексиконе надолго запоминающиеся высказывания [16]: «*Сколько поле не квантуй, все равно получишь... нуль!*» Добрячком для студентов и коллег Александр Ильич не был.



Рис. 10. Одна из последних прижизненных фотографий академика НАНУ Ахиезера А.И. в день его рождения 31 октября 1999 г., сделанная в рабочем кабинете ученого на старой площадке ХФТИ по ул. Чайковского (слева-направо: А.П. Рекало, Н.Ф. Шульга, А.А. Яценко, Л.Н. Давыдов, А.И. Ахиезер, З.А. Спольник – дочь Александра Ильича Ахиезера, Л.Г. Зазунов, С.В. Пелетминский, К.Н. Степанов и А.Н. Ахиезер – сын математика Наума Ильича Ахиезера) [7, 28]

Он «не терпел никакой фальши, иногда он был готов буквально растоптать собеседника. Обычно добродушный Ахиезер умел проявить бескомпромиссность и жесткость» [16]. Карьеризмом Александр Ильич никогда не отличался. Важным штрихом к его портрету является то, что он «*никогда не пытался обязательно вписать себя в соавторы работы и не выезжал на шеях аспирантов*» [16]. Он интересовался не только физикой. Ему были интересны любые

достижения ученых естественных наук. Он проявлял большой интерес к биографиям известных ученых всего научного мира. Александр Ильич хорошо знал русскую и зарубежную классическую литературу. Очень любил и высоко ценил классическую музыку [16]. Любимая работа в области указанных нами ранее актуальных для общества и сложных для изучения разделов современной физики была главным смыслом всей его долгой жизни и успешного научного творчества. Согласно воспоминаниям упомянутых чуть выше близких ему по человеческому духу его любимых учеников-академиков [28, 33]: «...Он никогда не занимался рекламой своих работ, своих результатов, никогда не «надувал щеки» и терпеть не мог людей, «надувающих» щеки. Он никогда не предавал интересы науки, интересы образования и, конечно, друзей». Друзья, коллеги, родные и близкие были с ним – этим выдающимся украинским ученым-физиком и замечательным человеком до его последнего вздоха и физического присутствия в нашей земной жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 28: Портреты легендарных физиков «высоковольтной бригады» УФТИ // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №5. – С. 3-17.
2. <http://kipt.kharkov.ua/itp.html>.
3. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
5. Баранов М.И. Лев Давидович Ландау (1908-1968 гг.) // Газета «Політехнік». – 2008. – №1-2. – С. 3-4.
6. https://ru.wikipedia.org/wiki/Ахиезер,_Александр_Ильич.
7. <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/photo>.
8. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
9. http://www.quickwiki.com/ru/Александр_Ильич_Ахиезер.
10. <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/about/tisza>.
11. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/277240>.
12. <http://cendomzn.ucoz.ru/index/0-30108>.
13. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 27: Портрет харьковского математика Наума Ильича Ахиезера // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №4. – С. 3-6.
14. http://ufn.ru/ufn92/ufn92_2/Russian/r922g.pdf.
15. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
16. <http://smart.kyivstar.ua/books/10961/read/7#2>.
17. Ахиезер А.И., Померанчук И.Я. Дифракционное рассеяние быстрых нейтронов и заряженных частиц // *Успехи физических наук*. – 1949. – Вып. 10. – Том 39. – С. 153-200.
18. Ахиезер А.И., Файнберг Я.Б. Медленные электромагнитные волны // *Успехи физических наук*. – 1951. – Вып. 7. – Том 44. – С. 321-368.
19. Ахиезер А.И., Половин Р.В. Устранение расходимостей в квантовой электродинамике // *Успехи физических наук*. – 1953. – Вып. 9. – Том 51. – С. 3-40. doi: 10.3367/ufnr.0051.195309a.0003.
20. Ахиезер А.И., Померанчук И.Я. Дифракционные явления при столкновениях быстрых частиц с ядрами // *Успехи физических наук*. – 1958. – Вып. 8. – Том 65. – С. 593-630. doi: 10.3367/ufnr.0065.195808b.0593.
21. Ахиезер А.И., Барьяхтар В.Г., Каганов М.И. Спиновые волны в ферромагнетиках и антиферромагнетиках // *Успехи физических наук*. – 1960. – Вып. 8. – Том 71. – С. 533-579. doi: 10.3367/ufnr.0071.196008a.0533.
22. Ахиезер А.И., Половин Р.В. Критерии нарастания волн // *Успехи физических наук*. – 1971. – Вып. 6. – Том 104. – С. 185-200. doi: 10.3367/ufnr.0104.197106a.0185.
23. Ахиезер А.И., Рекало М.П. Электрический заряд элементарных частиц // *Успехи физических наук*. – 1974. – Вып. 11. – Том 114. – С. 487-508. doi: 10.3367/ufnr.0114.197411d.0487.
24. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Излучение релятивистских частиц в монокристаллах // *Успехи физических наук*. – 1982. – Вып. 8. – Том 137. – С. 561-604. doi: 10.3367/ufnr.0137.198208a.0561.
25. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Влияние многократного рассеяния на излучение релятивистских частиц в аморфных и кристаллических средах // *Успехи физических наук*. – 1987. – Вып. 3. – Том 151. – С. 385-424. doi: 10.3367/ufnr.0151.198703a.0385.
26. Ахиезер А.И., Красильников В.В., Пелетминский С.В., Яценко А.А. Теория сверхтекучей ферми-жидкости // *Успехи физических наук*. – 1993. – Вып. 2. – Том 163. – С. 1-32. doi: 10.3367/ufnr.0163.199302a.0001.
27. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф., Трутень В.И., Гриненко А.А., Сыщенко В.В. Динамика заряженных частиц высоких энергий в прямых и изогнутых кристаллах // *Успехи физических наук*. – 1995. – Вып. 10. – Том 165. – С. 1165-1192. doi: 10.3367/ufnr.0165.199510c.1165.
28. <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/about/baryakhtar-peletminskiy>.
29. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
30. Иванов В.Е., Файнберг Я.Б., Ситенко А.Г., Любарский Г.Я., Берестецкий В.Б., Волков Д.В., Пелетминский С.В., Половин Р.В., Степанов К.Н. Александр Ильич Ахиезер (К шестидесятилетию со дня рождения) // *Успехи физических наук*. – 1971. – Вып. 10. – Том 105. – С. 371-372. doi: 10.3367/ufnr.0105.197110i.0371.
31. Барьяхтар В.Г., Волков Д.В., Зеленский В.Ф., Лазарев Б.Г., Пелетминский С.В., Ситенко А.Г., Степанов К.Н., Файнберг Я.Б., Фомин П.И. Александр Ильич Ахиезер (К восьмидесятилетию со дня рождения) // *Успехи физических наук*. – 1992. – Вып. 2. – Том 162. – С. 191-192. doi: 10.3367/ufnr.0162.199202g.0191.
32. <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/about/stepanov>.
33. Барьяхтар В.Г., Лазарев Б.Г., Лапшин В.И., Пелетминский С.В., Ситенко А.Г., Степанов К.Н., Файнберг Я.Б., Фомин П.И., Шульга Н.Ф., Болотовский Б.М., Иоффе Б.Л., Фейнберг Е.Л. Памяти Александра Ильича Ахиезера // *Успехи физических наук*. – 2000. – Вып. 8. – Том 170. – С. 917-918. doi: 10.3367/ufnr.0170.200008h.0917.

REFERENCES

1. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 28: Portraits of legendary physicists of «high-voltage brigade» of UPhTI. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.5, pp. 3-17. (Rus).
2. Available at: <http://kipt.kharkov.ua/itp.html> (accessed 21 May 2012). (Rus).
3. Baranov M.I. *Antologija vydaushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1*. [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
4. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiia v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushchiesja fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008. 252 p. (Rus).
5. Baranov M.I. Lev Davidovich Landau (1908-1968 yy.). *Gazeta «Politehnika» – Newspaper «Politehnika»*, 2008, no.1-2, pp. 3-4. (Rus).

6. Akhiezer Aleksandr Il'ich (Akhiezer Aleksandr Il'ich) Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Akhiezer_Aleksandr_Il'ich (accessed 15 June 2012). (Rus).
7. Available at: <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/photo> (accessed 10 April 2014). (Rus).
8. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
9. Available at: http://www.quickwiki.com/ru/Aleksandr_Il'ich_Akhiezer (accessed 21 May 2012). (Rus).
10. Available at: <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/about/tisza> (accessed 10 May 2013). (Rus).
11. Available at: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/277240> (accessed 22 February 2010). (Rus).
12. Available at: <http://cendomzn.ucoz.ru/index/0-30108> (accessed 21 April 2008). (Rus).
13. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 27: Portrait of the Kharkov mathematician Naum Il'ich Akhiezer. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 3-6. (Rus).
14. Available at: http://ufn.ru/ufn92/ufn92_2/Russian/r922g.pdf (accessed 18 September 2013). (Rus).
15. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
16. Available at: <http://smart.kyivstar.ua/books/10961/read/7#2> (accessed 11 May 2011). (Rus).
17. Akhiezer A.I., Pomeranchuk I.Ya. Diffraction scattering of fast neutrons and charged particles. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1949, no.10, Vol.39, pp. 153-200. (Rus).
18. Akhiezer A.I., Feinberg Ya.B. Slow electromagnetic waves. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1951, no.7, Vol.44, pp. 321-368. (Rus).
19. Akhiezer A.I., Polovin R.V. Elimination of divergences in quantum electrodynamics. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1953, no.9, Vol.51, pp.3-40. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0051.195309a.0003**.
20. Akhiezer A.I., Pomeranchuk I.Ya. Diffraction phenomena in collisions of fast particles with nucleus. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1958, no.8, Vol.65, pp. 593-630. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0065.195808b.0593**.
21. Akhiezer A.I., Bar'yakhtar V.G., Kaganov M.I. Spin waves in ferromagnets and antiferromagnets. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1960, no.8, Vol.71, pp. 533-579. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0071.196008a.0533**.
22. Akhiezer A.I., Polovin R.V. Criteria growth of the waves. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1971, no.6, Vol.104, pp. 185-200. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0104.197106a.0185**.
23. Akhiezer A.I., Rekalov M.P. The electric charge of elementary particles. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1974, no.11, Vol.114, pp. 487-508. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0114.197411d.0487**.
24. Akhiezer A.I., Shul'ga N.F. The radiation of relativistic particles in single crystals. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1982, no.8, Vol.137, pp. 561-604. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0137.198208a.0561**.
25. Akhiezer A.I., Shul'ga N.F. The effect of multiple scattering on the radiation of relativistic particles in amorphous and crystalline media. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1987, no.3, Vol.151, pp. 385-424. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0151.198703a.0385**.
26. Akhiezer A.I., Krasil'nikov V.V., Peletminskiy S.V., Yatsenko A.A. The theory of superfluid Fermi-liquid. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1993, no.2, Vol.163, pp. 1-32. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0163.199302a.0001**.
27. Akhiezer A.I., Shul'ga N.F., Truten' V.I., Grinenko A.A., Syshchenko V.V. Dynamics of high energy charged particles in

- straight and bent crystals. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1995, no.10, Vol.165, pp. 1165-1192. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0165.199510c.1165**.
28. Available at: <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/about/baryakhtar-peletminskiy> (accessed 15 July 2010). (Rus).
29. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
30. Ivanov V.E., Feinberg Ya.B., Sitenko A.G., Lyubarskiy G.Ya., Beresteckiy V.B., Volkov D.V., Peletminskiy S.V., Polovin R.V., Stepanov K.N. Alexander Il'ich Akhiezer (On his sixtieth birthday). *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1971, no.10, Vol.105, pp.371-372. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0105.197110l.0371**.
31. Bar'yakhtar V.G., Volkov D.V., Zelenskiy V.F., Lazarev B.G., Peletminskiy S.V., Sitenko A.G., Stepanov K.N., Feinberg Ya.B., Fomin P.I. Alexander Il'ich Akhiezer (On his eightieth birthday). *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 1992, no.2, Vol.162, pp.191-192. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0162.199202g.0191**.
32. Available at: <http://www.kipt.kharkov.ua/itp/akhiezer/ru/about/stepanov> (accessed 22 May 2012). (Rus).
33. Bar'yakhtar V.G., Lazarev B.G., Lapshin V.I., Peletminskiy S.V., Sitenko A.G., Stepanov K.N., Feinberg Ya.B., Fomin P.I., Shul'ga N.F., Bolotovskiy B.M., Ioffe B.L., Feinberg E.L. In memory of Alexander Il'ich Akhiezer. *Uspehi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences*, 2000, no.8, Vol.170, pp. 917-918. (Rus). doi: **10.3367/ufnr.0170.200008h.0917**.

Поступила (received) 17.08.2015

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

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

An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 31: Portrait of the Kharkiv physicist Alexander Il'ich Akhiezer.

Purpose. Description is in the short form of the basic distinguished scientific achievements, features of personality and way of life of the known Kharkov physicist-theorist A.I. Akhiezer. **Methodology.** Existent scientific approaches for treatment and systematization of physical knowledges. Methods of historical method at research of development in human society of basic sections of theoretical physics. **Results.** Short information is resulted about the basic creative and vital stages, and also fundamental scientific achievements of the indicated prominent physicist of the XX century. Some personal qualities of this Kharkov physicist-theorist, becoming a founder known in the world of physical school are described. **Originality.** First the Kharkov scientist-electro-physicist for the wide circle of readers imagined a short scientifically-historical essay the known physicist of contemporaneity, being based on his scientific labours and published materials about him. **Practical value.** Scientific popularization of creative activity of the known Kharkov physicist and his achievements in area of theoretical physics. Next reminder a wide reader on the example of creative life in science and got prominent scientific results of labour of one human personality known in the scientific world about incessant in modern society connection of times and generations. References 33, figures 10.

Key words: history, physics, Kharkov region, distinguished scientific achievements.

Г.Г. Жемеров, Д.В. Турай

СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ СУММАРНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ PQR КООРДИНАТАХ

Мета. Метою статті є отримання співвідношень для визначення складових сумарної потужності втрат з використанням р-q-г теорії потужності для трифазних чотирипровідних систем електропостачання, що однозначно зв'язують чотири компоненти: мінімально можливу потужність втрат; потужність втрат, обумовлену реактивною потужністю; потужність втрат, обумовлену пульсаціями миттєвої активної потужності; потужність втрат, обумовлену протіканням струму в нульовому проводі. *Методика.* Для проведення досліджень використовувалися положення р-q-г теорії потужності, теорія електричних кіл, математичне моделювання в пакеті Matlab. *Результати.* Отримано точне розрахункове співвідношення, що дозволяє визначати сумарну потужність втрат у трифазній системі електропостачання через три складові, відповідні проекціям узагальнених векторів струму і напруги на осі pqr системи координат. *Наукова новизна.* Вперше встановлено математичний зв'язок між просторовим векторним поданням миттєвих величин і складовими потужності сумарних втрат в трифазних чотирипровідних системах електропостачання. *Практичне значення.* Використання запропонованої методики дозволить створити вимірвальний прилад для визначення поточного значення складових потужності сумарних втрат в трифазних системах, що оперує виміральною інформацією про миттєві значення струмів і напруг. Бібл. 14, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: система електропостачання, р-q-г теорія потужності, мінімально можливі втрати, потужність сумарних втрат, Matlab-модель трифазної системи електропостачання.

Цель. Целью статьи является получение соотношений для определения составляющих суммарной мощности потерь с использованием р-q-г теории мощности для трехфазных четырехпроводных систем электроснабжения, однозначно связывающих четыре компонента: минимально возможную мощность потерь; мощность потерь, обусловленную реактивной мощностью; мощность потерь, обусловленную пульсациями мгновенной активной мощности; мощность потерь, обусловленную протеканием тока в нулевом проводе. *Методика.* Для проведения исследований использовались положения р-q-г теории мощности, теория электрических цепей, математическое моделирование в пакете Matlab. *Результаты.* Получено точное расчетное соотношение, позволяющее рассчитать суммарную мощность потерь в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения через три составляющие, соответствующие проекциям обобщенных векторов тока и напряжения на оси pqr системы координат. *Научная новизна.* Впервые установлена математическая связь между пространственным векторным представлением мгновенных величин и составляющими мощности суммарных потерь в трехфазных четырехпроводных системах электроснабжения. *Практическое значение.* Использование предложенной методики позволит создать измерительный прибор для определения текущего значения составляющих мощности суммарных потерь в трехфазных системах, оперирующий измерительной информацией о мгновенных значениях токов и напряжений. Библ. 14, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: система электроснабжения, р-q-г теория мощности, минимально возможные потери, мощность суммарных потерь, Matlab-модель трехфазной системы электроснабжения.

Введение. Появление современных теорий мгновенных активной и реактивной мощностей в 1983, 1984 годах [1, 2] позволило специалистам электротехнического направления пересмотреть взгляды на такие понятия как «реактивная мощность», «полная мощность», «мощность несимметрии», «мощность искажения» [1-5]. На основе новых теорий получили дальнейшее развитие способы управления устройствами активной фильтрации для систем электроснабжения (СЭ), использующие преобразования пространственных систем координат, что открыло новые направления и послужило развитию силовой электроники. Разработанные теории, оперирующие пространственными векторами токов и напряжений, среди которых можно выделить р-q теорию, р-q усвершенствованную теорию мощности, i_d-i_q метод, кросс-векторную теорию и р-q-г теорию мгновенной мощности [6-9], легли в основу создания алгоритмов управления преобразовательными системами с близким к единице коэффициентом мощности [10]. Показана принципиальная возможность повышения энергетической эффективности СЭ с нелинейными потребителями при подключении силового активного фильтра (САФ) [6, 10, 11, 15]. Пока нет законченной

общей теории, связывающей потери электрической энергии в СЭ с положениями современных теорий мгновенной активной и реактивной мощностей. Повышение энергоэффективности систем электроснабжения средствами САФ для конкретных условий эксплуатации решает ряд практических задач, среди которых определение необходимости и места установки силового компенсатора, создание алгоритмов управления силовыми активными фильтрами, обеспечивающих работу распределенных систем электроснабжения с максимально возможным коэффициентом полезного действия.

Целью работы является развитие положений современных теорий мгновенной активной и реактивной мощностей и получение расчетных соотношений для определения составляющих мощности дополнительных потерь электроэнергии в трехфазных СЭ через пространственные pqr координаты.

Эквивалентная схема трехфазной СЭ с САФ. Сложная разветвленная схема системы электроснабжения потребителей низкого и среднего напряжений может быть представлена в виде простой эквивалентной схемы, показанной на рис. 1. Трехфазный источник

© Г.Г. Жемеров, Д.В. Турай

синусоидального напряжения *Source* через линию *Line* с активным сопротивлением R_s подключается к блоку нагрузки *Load*, который может включать в себя активные сопротивления, реакторы, конденсаторные батареи, нелинейные элементы, источники тока и напряжения. Активное сопротивление нулевого провода учтено сопротивлением R_n . Если учесть, что источник питания и нагрузка могут работать как в симметричном так и в несимметричном режимах, то при однонаправленном потоке энергии в СЭ от источника в нагрузку возможны 96 различных вариантов сочетаний параметров системы «источник-нагрузка», в которых возникают дополнительные потери [13]. В эквивалентной схеме по рис. 1 индуктивность линии L_s вынесена в нагрузку, что в общем случае является приемлемым допущением и облегчает дальнейший анализ СЭ. В точке подключения блока нагрузки подсоединяется параллельный САФ, силовая схема которого представляет собой автономный инвертор напряжения на силовых транзисторных модулях, с конденсаторным накопителем в звене постоянного тока. Для контроля состояния СЭ и выработки управляющих воздействий в схеме по рис. 1 используются датчики токов и напряжений, с помощью которых измеряются фазные напряжения на зажимах подключения источника u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} , фазные напряжения на зажимах подключения нагрузки u_{La}, u_{Lb}, u_{Lc} , а также фазные токи нагрузки i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} и силового компенсатора i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} .

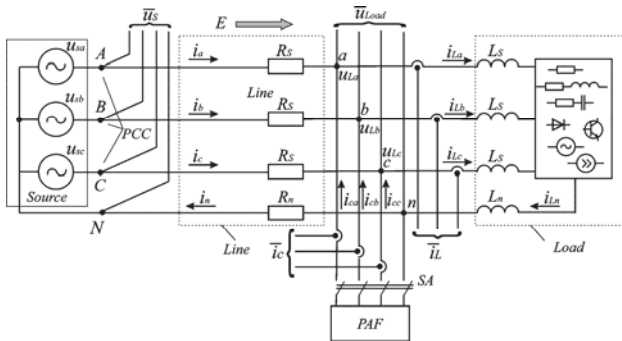


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной СЭ с САФ

При разомкнутом выключателе *SA* фазные токи нагрузки равны соответствующим фазным сетевым токам.

Измеренные мгновенные величины позволяют в любой момент времени получать информацию о величине мгновенной активной мощности и мгновенной реактивной мощности. Первая определяется как скалярное произведение двух пространственных векторов напряжения и тока трехфазной СЭ, представленный, например, в системе координат *a, b, c*, а вторая, как векторное произведение этих же векторов:

$$P_S = \vec{u}_S \cdot \vec{i} \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

$$\vec{q}_S = \vec{u}_S \times \vec{i} = \begin{bmatrix} q_{sa} \\ q_{sb} \\ q_{sc} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_b & i_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sc} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_a & i_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} \\ i_c \end{bmatrix}$$

где

$$\vec{u}_S = [\vec{i} u_{sa} \quad \vec{j} u_{sb} \quad \vec{k} u_{sc}]^T - \quad (3)$$

пространственный вектор сетевого напряжения в системе координат *a, b, c*, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты направления по осям *a, b, c* системы координат;

$$\vec{i} = [\vec{i} i_a \quad \vec{j} i_b \quad \vec{k} i_c]^T - \quad (4)$$

пространственный вектор тока в системе координат *a, b, c*.

Составляющие мощности дополнительных потерь электроэнергии в трехфазной СЭ. При отсутствии в трехфазной СЭ расчетной реактивной мощности и при постоянном во времени графике мгновенной активной мощности система работает с максимально возможным КПД, величина которого определяется отношением мощности трехфазного резистивного короткого замыкания P_{sc} к средней, вычисленной в периоде повторяемости, полезной активной мощности нагрузки P_{usf} [13]

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}}, \quad (5)$$

где

$$k_{sc} = \frac{P_{sc}}{P_{usf}}. \quad (6)$$

Указанное условие

$$P_{puls} = 0 \quad \Delta P_{usf} = \text{const}, \quad (7)$$

$$q = 0,$$

выполняется в СЭ с симметричным трехфазным источником и симметричной резистивной нагрузкой. Нарушение условия (7) ведет к возникновению в СЭ мощности дополнительных потерь

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\min} + \Delta P_{add}, \quad (8)$$

где ΔP_{\min} – минимально возможная мощность потерь, определяемая из соотношения (5); ΔP_{add} – мощность дополнительных потерь.

В [13], после принятия ряда допущений, было получено универсальное расчетное соотношение определяющее мощность суммарных потерь как сумму четырех составляющих, представленное в долях полезной активной мощности P_{usf}

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \Delta P_{\min}^* \times \left(1 + Q_{RMS}^2 + P_{pulsRMS}^2 \right) + \Delta P_n^* \Big|_{P_{usf} = \text{const}}, \quad (9)$$

где

$$\Delta P_{puls}^* = \Delta P_{\min}^* \cdot P_{pulsRMS}^2 - \quad (10)$$

относительная составляющая мощности дополнительных потерь, обусловленная переменной составляющей мгновенной активной мощности трехфазной СЭ, $P_{pulsRMS}^*$ – относительное среднеквадратическое значение переменной составляющей активной мощности, вычисленное в периоде повторяемости;

$$\Delta P_Q^* = \Delta P_{\min}^* \cdot Q_{RMS}^2 - \quad (11)$$

относительная составляющая мощности дополнительных потерь, обусловленная мгновенной реактивной мощностью трехфазной СЭ, Q_{RMS}^* – относительное

среднеквадратическое значение модуля вектора реактивной мощности $|\vec{q}|$, вычисленное в периоде повторяемости;

$$\Delta P_{n^*} = \frac{\Delta P_n}{P_{usf}} = \frac{R_S}{T \cdot P_{usf}} \int_t^{t+T} i_n^2 dt - \quad (12)$$

относительная мощность потерь в нулевом проводе, вычисленная в периоде повторяемости T , обусловленная протеканием тока i_n .

Проверка формулы (9) на специально созданной математической модели показала высокую точность определения суммарной мощности потерь для трехфазных трехпроводных СЭ в симметричном режиме работы трехфазного источника. Использование формулы (9) для четырехпроводных СЭ, при некоторых сочетаниях параметров, приводит к значительной погрешности, возникающей из-за отсутствия учета в (9) взаимного влияния электромагнитных процессов в фазных проводах и нулевом проводе.

В [14] было предложено уточнение формулы (9) введением дополнительной пятой составляющей мощности дополнительных потерь, обусловленной взаимным влиянием электромагнитных процессов в фазных проводах и нулевом проводе трехфазной СЭ, ΔP_{mut^*}

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{usf}} = \Delta P_{min^*} + \Delta P_{puls^*} + \Delta P_{q^*} + \Delta P_{n^*} + \Delta P_{mut^*} \Big| P_{usf} = const \quad (13)$$

Указанным способом удалось минимизировать погрешность расчета суммарной мощности потерь для четырехпроводных СЭ, однако усложнился алгоритм расчета, и возникли практические трудности использования уточненного соотношения.

Представление составляющих мощности дополнительных потерь трехфазной СЭ в пространственных pqr координатах. Наибольшие возможности для выделения составляющих мгновенной мощности потерь и составляющих, требующих компенсации, в трехфазных четырехпроводных системах представляет p - q - r теория мгновенной активной и реактивной мощностей [9]. Математический аппарат p - q - r теории, подробно описанный в литературных источниках, связан с пространственным переходом из декартовой abc системы координат в pqr систему. Преобразование систем координат осуществляется в два этапа: обобщенные пространственные векторы напряжений и токов из abc системы координат при помощи матрицы прямого преобразования Кларк переносятся в неподвижную пространственную $\alpha\beta 0$ систему:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

после чего осуществляется переход из системы координат $\alpha\beta 0$ во вращающуюся координатную систему pqr .

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_0 & u_{\alpha} & u_{\beta} \\ 0 & -\frac{u_{\alpha\beta 0} u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta 0} u_{\alpha}}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_0 u_{\alpha}}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2 + u_0^2}, \quad (17)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}. \quad (18)$$

В симметричном режиме работы трехфазного источника четырехпроводной СЭ система pqr позволяет выделить четыре составляющих мгновенной мощности:

$$\begin{bmatrix} P_{AV} + P_{puls} \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix} = u_p \cdot \begin{bmatrix} i_{p-} + i_{p\sim} \\ i_r \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$$u_p = u_{\alpha\beta 0} = u_s = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2 + u_0^2} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2} = const \quad (20)$$

модуль пространственного вектора напряжения, который в pqr координатах совпадает по направлению с осью p ; P_{AV} и P_{puls} – соответственно постоянная, вычисленная в периоде повторяемости, и переменная составляющие мгновенной активной мощности СЭ; i_{p-} и $i_{p\sim}$ – соответственно постоянная и переменная составляющие проекции обобщенного пространственного вектора тока на ось p pqr системы координат; q_q и q_r – соответственно мгновенные реактивные мощности по оси q и оси r .

Передача электрической энергии от источника в нагрузку с минимально возможными потерями обусловливает постоянную составляющую мгновенной активной мощности, остальные три составляющие, в общем случае, подлежат компенсации. Исключение из системы переменной составляющей мгновенной активной мощности позволит скомпенсировать амплитудную асимметрию сетевых токов. Исключение из системы реактивной мощности по оси q позволит компенсировать ток нулевого провода. Исключение из системы реактивной мощности по оси r позволит компенсировать угол сдвига фаз между соответствующими фазными напряжениями и токами.

Выразим дополнительные составляющие мощности потерь в pqr координатах. Суммарная мощность

потерь в трехфазной четырехпроводной СЭ по эквивалентной схеме (рис. 1) может быть представлена двумя составляющими:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_s + \Delta p_n = i^2 \cdot R_s + i_n^2 \cdot R_n, \quad (21)$$

где Δp_s и Δp_n – соответственно мгновенная мощность потерь в трехфазной линии и мгновенная мощность потерь в нулевом проводе;

$$i^2 = \begin{bmatrix} i_a^2 & i_b^2 & i_c^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_p^2 & i_q^2 & i_r^2 \end{bmatrix}^T - \quad (22)$$

квадрат модуля сетевого тока;

$$i_n = i_a + i_b + i_c - \quad (23)$$

мгновенное значение тока нулевого провода.

Будем рассматривать случай, когда активное сопротивление нулевого провода равно сопротивлению линейного провода

$$R_n = R_s. \quad (24)$$

При симметричном режиме работы источника ток нулевого провода в системе pqr может быть выражен из (15) через проекцию результирующего вектора тока на ось r , в соответствии с тем, что ось r вращающейся системы координат pqr является неподвижной и совпадает по направлению с осью 0 координатной системы $\alpha\beta 0$:

$$i_n = \sqrt{3} \cdot i_r. \quad (25)$$

Тогда, подставив (22) – (25) в (21), получим

$$\Delta p_{\Sigma} = R_s \cdot (i_p^2 + i_q^2 + 4 \cdot i_r^2). \quad (26)$$

Выразив проекции токов в системе pqr через соответствующие мощности в (19), и, перейдя к относительным единицам, можно записать соотношение для определения мгновенной относительной суммарной мощности потерь в pqr координатах

$$\Delta p_{\Sigma^*} = \frac{1}{k_{sc}} \cdot (p_*^2 + q_*^2 + 4 \cdot q_*^2). \quad (27)$$

или для среднего, вычисленного в периоде повторяемости, значения

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \frac{1}{k_{sc}} \cdot (P_{RMS^*}^2 + Q_{rRMS^*}^2 + 4 \cdot Q_{qRMS^*}^2). \quad (28)$$

Таким образом, относительная суммарная мощность потерь в pqr системе координат может быть представлена суммой трех составляющих, соответствующих мощностям потерь по каждой из координатных осей

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \Delta P_{p^*} + \Delta P_{q^*} + \Delta P_{r^*}. \quad (29)$$

Сопоставим соотношение (28) с ранее полученным соотношением (13). Квадрат среднеквадратического значения активной мощности по оси p pqr системы координат может быть разложен на две составляющие

$$P_{RMS^*}^2 = P_{AV^*}^2 + P_{pulsRMS^*}^2 = (1 + \Delta P_{\Sigma^*})^2 + P_{puls^*}^2. \quad (30)$$

Коэффициент, выражающий отношение мощности резистивного короткого замыкания трехфазной СЭ, может быть определен через относительную мощность минимально возможных потерь

$$\frac{1}{k_{sc}} = \frac{\Delta P_{\min^*}}{(1 + \Delta P_{\min^*})^2}. \quad (31)$$

Квадрат модуля вектора относительной среднеквадратической реактивной мощности

$$Q_{RMS^*}^2 = Q_{qRMS^*}^2 + Q_{rRMS^*}^2. \quad (32)$$

Относительная средняя мощность потерь в нулевом проводе

$$\Delta P_{n^*} = \frac{3 \cdot Q_{qRMS^*}^2}{k_{sc}}. \quad (33)$$

Подставив (30)-(33) в (28) и, вычислив корни квадратного уравнения, можно записать соотношение для расчета относительной суммарной мощности потерь, через принятые ранее составляющие

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \frac{1 + \Delta P_{\min^*} - \sqrt{(1 - \Delta P_{\min^*})^2 - 4 \cdot \Delta P_{\min^*} \times \left(\frac{\Delta P_{puls^*} + \Delta P_{q^*} + \Delta P_{n^*} \cdot (1 + \Delta P_{\min^*})^2}{2 \cdot \Delta P_{\min^*}} \right)}}{2 \cdot \Delta P_{\min^*}} \Bigg|_{P_{usf} = const} \quad (34)$$

Точное расчетное соотношение (34) с незначительной погрешностью может быть заменено упрощенным соотношением

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \Delta P_{\min^*} + \Delta P_{puls^*} + \Delta P_{q^*} + \Delta P_{n^*} \cdot (1 + \Delta P_{\min^*})^2 \Bigg|_{P_{usf} = const}. \quad (35)$$

Сравнение (35) с предложенным ранее соотношением (13) позволяет выразить дополнительную пятую составляющую, обусловленную взаимным влиянием электромагнитных процессов в линиях и нулевом проводе,

$$\Delta P_{mut^*} = \Delta P_{n^*} \cdot (\Delta P_{\min^*}^2 + 2 \cdot \Delta P_{\min^*}). \quad (36)$$

Запишем соотношения, выражающие составляющие мощностей дополнительных потерь универсального уравнения, через соответствующие составляющие в координатах pqr

$$\Delta P_{Q^*} = (1 + \Delta P_{\min^*})^2 \cdot \left(\Delta P_{r^*} + \frac{\Delta P_{q^*}}{4} \right), \quad (37)$$

$$\Delta P_{puls^*} = (1 + \Delta P_{\min^*})^2 \cdot \Delta P_{p^*} - \Delta P_{\min^*} \cdot (1 + \Delta P_{p^*} + \Delta P_{q^*} + \Delta P_{r^*})^2, \quad (38)$$

$$\Delta P_{n^*} = \frac{3}{4} \cdot \Delta P_{q^*}, \quad (39)$$

$$\Delta P_{mut^*} = \frac{3}{4} \cdot (\Delta P_{\min^*}^2 + 2 \cdot \Delta P_{\min^*}) \cdot \Delta P_{q^*}. \quad (40)$$

Составляющие мощности дополнительных потерь по универсальному соотношению (37) – (40) и в координатном представлении (28) зависят от величины мощности минимально возможных потерь, которая в свою очередь является функцией активного сопротивления линии. В связи с тем, что измерение активного сопротивления линии в реальном времени является трудноосуществимой задачей, выразим мощность минимально возможных потерь через мгновенные величины токов и напряжений, измеряемых согласно рис. 1. Подставив соотношение (31) в (28) и выполнив преобразования, получим формулу для расчета относительной мощности минимально возможных потерь

$$\Delta P_{\min}^* = \frac{P_{pqr}^* - 2 \cdot \Delta P_{\Sigma}^* - \sqrt{P_{pqr}^{*2} - 4 \cdot \Delta P_{\Sigma}^* \cdot P_{pqr}^*}}{2 \cdot \Delta P_{\Sigma}^*}, \quad (41)$$

где

$$P_{pqr}^* = P_{RMS}^2 + Q_{RMS}^2 + 4 \cdot Q_{Q_{RMS}}^2. \quad (42)$$

Относительная мощность суммарных потерь может быть определена мгновенными величинами токов и напряжений, измеряемыми согласно рис.1, или проекциями на ось p обобщенных пространственных векторов токов и напряжений в pqr системе координат:

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} ((i_{pL} + i_{pc}) \cdot u_{ps} - i_{pL} \cdot u_{pL}) dt, \quad (43)$$

где i_{pL} , i_{pc} – соответственно проекции на ось p pqr системы координат обобщенных пространственных векторов тока нагрузки и тока компенсатора; u_{ps} , u_{pL} – соответственно проекции на ось p pqr системы координат обобщенных пространственных векторов сетевого напряжения и напряжения на клеммах подключения нагрузки.

С помощью положений p - q - r теории мгновенных активной и реактивной мощностей, а также соотношений (37)-(43) суммарная мощность потерь в СЭ может быть разложена на отдельные составляющие, описываемые универсальным расчетным соотношением (13). Для того, чтобы воспользоваться предложенной методикой достаточно информации о мгновенных величинах токов и напряжений, измеряемых в СЭ при использовании САФ.

Резерв повышения КПД СЭ при подключении САФ. Экономическая эффективность подключения

САФ с позиции уменьшения мощности потерь в СЭ будет достигаться в случае, когда суммарная мощность потерь в СЭ после подключения компенсатора будет меньше, чем до его подключения

$$\Delta P_{on}^* < \Delta P_{\Sigma}^*. \quad (44)$$

Если после подключения САФ полезная мощность нагрузки остается неизменной, то неравенство (44) можно представить как

$$\Delta P_{c}^* + \Delta P_{saf}^* < \Delta P_{add}^*, \quad (45)$$

где ΔP_{c}^* – мощность потерь, необходимая для поддержания напряжения на конденсаторе звена постоянного тока САФ выше амплитудного значения сетевого напряжения; ΔP_{saf}^* – мощность потерь силового компенсатора.

Определим максимально возможный эффект повышения КПД, приняв компенсатор идеальным, а полезную мощность неизменной до и после подключения САФ. На рис. 2 приведена Matlab-модель эквивалентной схемы трехфазной СЭ с САФ, по своим характеристикам отвечающая схеме по рис.1. Модель состоит из силовой схемы, датчиков тока и напряжения, измерительной подсистемы, подсистемы задания режима работы СЭ, подсистемы расчета составляющих суммарной мощности потерь и виртуальных измерительных приборов. Matlab-модель позволяет исследовать работу трехфазной СЭ в 96 указанных вариантах, в которых могут возникнуть дополнительные потери. Для моделирования была выбрана трехфазная четырехпроводная СЭ с симметричным трехфазным источником напряжений при $R_n = R_s$. Параметры элементов модели: $k_{sc} = 5 \div 30$; $U_m = 311.13$ V; $f_s = 50$ Hz; $P_{usf} = \text{const} = 400.1$ kW.

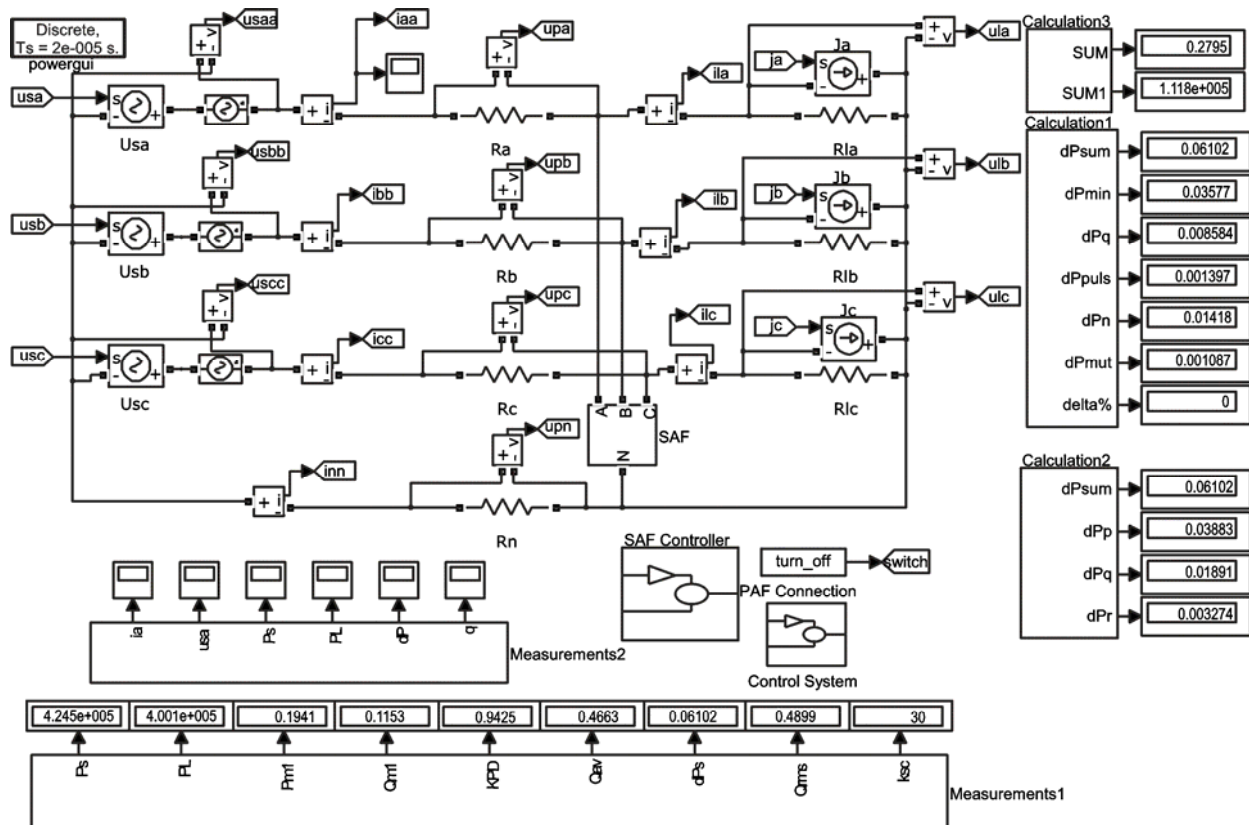


Рис. 2. Matlab-модель эквивалентной схемы трехфазной СЭ с САФ

Рассмотрим в качестве примера три отдельных фактора возникновения дополнительных потерь в СЭ:

1. Симметричная активно-реактивная нагрузка. Примем $\varphi = 20^\circ$.

2. Асимметричная резистивная нагрузка. Примем активные сопротивления трех фаз нагрузки

$$\begin{aligned} R_{La} &= k_{La} \cdot R_L, \\ R_{Lb} &= k_{Lb} \cdot R_L, \\ R_{Lc} &= k_{Lc} \cdot R_L, \\ k_{La}^2 + k_{Lb}^2 + k_{Lc}^2 &= 3, \end{aligned} \quad (46)$$

$k_{La} = 1, k_{Lb} = 1.3, k_{Lc} = 0.5568$.

3. Симметричная нелинейная нагрузка. Примем ток фазы А

$$i_a = \sum_{n=2k \mp 1} i_k = \sum_{n=2k \mp 1} \frac{U_m}{n \cdot (R_s + R_L)} \cdot \sin(n \cdot \vartheta), \quad (47)$$

$k = 1, 2, 3 \dots 18$.

Для обобщения результатов моделирования были приняты 6 режимов работы СЭ, соответствующие сочетаниям трех указанных факторов:

Режим 1 – симметричная активно-реактивная нагрузка.

Режим 2 – асимметричная резистивная нагрузка.

Режим 3 – симметричная нелинейная нагрузка.

Режим 4 – асимметричная активно-реактивная нагрузка.

Режим 5 – симметричная смешанная (активно-индуктивная и нелинейная) нагрузка.

Режим 6 – асимметричная нелинейная нагрузка.

С использованием модели были рассчитаны составляющие суммарной мощности потерь по универсальной формуле (13) и в р-q-г координатах (29). Результаты расчета для шести принятых режимов, в процентном выражении, сведены в табл. 1

Из таблицы видно, что в рассматриваемых режимах наибольший вклад в суммарную мощность потерь вносят две составляющие: составляющая мощности дополнительных потерь, обусловленная мгновенной реактивной мощностью, и составляющая мощности дополнительных потерь, обусловленная протеканием тока в нулевом проводе.

На рис. 3 показан резерв повышения КПД для рассматриваемых шести режимов работы СЭ: большая площадь зоны повышения КПД, залитая на рисунке темным цветом, соответствует более выгодным технико-экономическим условиям при использовании САФ. Экономическая целесообразность использования САФ растет для СЭ, где одновременно могут присутствовать несколько факторов, приводящих к появлению дополнительных потерь электрической энергии. Примером таких СЭ могут служить городские коммунальные сети на уровне отдельных потребителей или групп потребителей.

Выводы.

1. Обоснована методика представления составляющих мощности суммарных потерь в трехфазных СЭ, основанная на использовании р-q-г теории мгновенной активной и реактивной мощностей. Согласно предложенной методике суммарная мощность потерь может быть представлена в виде суммы трех

составляющих $\Delta P_{p*}, \Delta P_{q*}, \Delta P_{r*}$, определяемых проекциями обобщенных пространственных векторов тока и напряжения на оси р-q-г системы координат.

2. С помощью пространственных преобразований координат р-q-г теории мгновенной активной и реактивной мощностей получено точное соотношение (34), учитывающее четыре составляющие мощности суммарных потерь: мощность минимально возможных потерь; мощность дополнительных потерь, обусловленных мгновенной реактивной мощностью; мощность дополнительных потерь, обусловленных пульсациями мгновенной активной мощности; мощность дополнительных потерь, обусловленных протеканием тока в нулевом проводе.

3. Сопоставление точного расчетного соотношения (34) с предложенной ранее универсальной формулой (15) позволило определить пятую составляющую мощности дополнительных потерь, обусловленную взаимным влиянием электромагнитных процессов в линиях трехфазной СЭ и нулевом проводе.

4. Определен способ расчета дополнительных составляющих суммарной мощности потерь, основанный на использовании измерительной информации о значениях мгновенных токов и напряжений в СЭ с САФ. Использование указанного способа позволит разработать измерительный прибор, регистрирующий составляющие мощности потерь в текущий момент времени, область применения которого может быть связана с разработкой алгоритмов управления режимами работы СЭ с минимальными потерями электроэнергии.

5. Предложена методика определения резерва повышения КПД СЭ при использовании САФ, позволяющая обосновывать экономическую эффективность его установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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](https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460).
3. Nabae A., Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive 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](https://doi.org/10.1109/61.517477).
4. 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](https://doi.org/10.1109/TIM.1987.6312797).
5. Czarnecki L.S. Misinterpretations of some power properties of electric circuits // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – vol.9. – no.4. – pp. 1760-1769. doi: [10.1109/61.329509](https://doi.org/10.1109/61.329509).
6. Ghassemi F. Should the theory of power be reviewed? // L'energia elettrica. – 2004. – vol.81. – pp. 85-90.
7. 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](https://doi.org/10.1109/63.728344).

Результаты определения составляющих суммарной мощности потерь

k_{sc}	ΔP_{Σ^*}	Составляющие суммарной мощности потерь по универсальной формуле (13), %					В координатах pqr, %			
		$\Delta P_{min^*} / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_{q^*} / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_{puls^*} / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_{n^*} / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_{mut^*} / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_p^* / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_q^* / \Delta P_{\Sigma^*}$	$\Delta P_r^* / \Delta P_{\Sigma^*}$	
Режим 1										
5	0.4792	79.71	16.60	0	0	3.72	91.32	0	8.69	
10	0.1514	83.89	15.79	0	0	0.00	87.58	0	12.43	
15	0.09199	84.12	15.75	0	0	0.00	86.43	0	13.57	
20	0.0662	84.18	15.74	0	0	0.00	85.89	0	14.12	
25	0.05172	84.22	15.72	0	0	0.00	85.56	0	14.44	
30	0.04245	84.24	15.71	0	0	0.00	85.35	0	14.65	
Режим 2										
5	0.4465	85.55	4.32	2.64	2.64	4.87	95.10	3.52	1.38	
10	0.1559	81.47	5.89	2.67	7.58	2.41	87.81	10.10	2.10	
15	0.09752	79.35	6.44	2.65	9.81	1.73	84.64	13.07	2.28	
20	0.07126	78.20	6.74	2.63	11.06	1.35	82.89	14.75	2.36	
25	0.05621	77.50	6.92	2.62	11.85	1.11	81.64	15.79	2.40	
30	0.04644	77.00	7.04	2.61	12.39	0.94	81.05	16.52	2.43	
Режим 3										
5	0.5046	75.70	10.29	0.15	4.81	9.06	89.79	6.41	3.79	
10	0.1801	70.53	12.12	0.14	13.04	4.19	77.40	17.39	5.19	
15	0.1141	67.82	12.62	0.13	16.52	2.94	72.65	22.02	5.37	
20	0.084	66.34	12.86	0.12	18.39	2.27	70.07	24.51	5.40	
25	0.06655	65.46	12.99	0.12	19.58	1.84	68.50	26.07	5.41	
30	0.05514	64.85	13.10	0.12	20.37	1.55	67.43	27.20	5.41	
Режим 4										
5	0.6077	62.85	23.33	1.87	1.74	10.21	86.05	2.32	11.64	
10	0.1902	66.78	22.13	2.05	6.47	2.55	76.08	8.63	15.27	
15	0.1185	65.30	22.26	2.00	8.67	1.71	72.11	11.55	16.30	
20	0.08644	64.47	22.32	1.97	9.92	1.31	70.06	13.22	16.72	
25	0.06816	63.91	22.36	1.95	10.72	1.07	68.76	14.29	16.96	
30	0.0563	63.52	22.38	1.93	11.27	0.89	67.87	15.03	17.10	
Режим 5										
5	0.5046	75.70	9.45	1.05	4.81	9.00	90.25	6.41	3.35	
10	0.1801	70.53	11.35	0.96	13.04	4.14	78.01	17.39	4.59	
15	0.1141	67.82	11.89	0.91	16.52	2.89	73.27	22.02	4.74	
20	0.084	66.34	12.15	0.88	18.39	2.22	70.70	24.51	4.77	
25	0.06655	65.46	12.31	0.86	19.58	1.79	69.12	26.09	4.78	
30	0.05514	64.85	12.42	0.84	20.37	1.50	68.04	27.20	4.78	
Режим 6										
5	0.5663	67.45	11.07	3.53	5.72	12.24	88.49	7.62	3.89	
10	0.2	63.51	13.10	2.87	15.42	5.09	74.25	20.56	5.17	
15	0.1266	61.12	13.61	2.58	19.23	3.47	69.07	25.63	5.32	
20	0.0931	59.86	13.85	2.44	21.21	2.64	66.36	28.27	5.35	
25	0.0737	59.11	13.98	2.35	22.43	2.13	64.74	29.88	5.36	
30	0.06102	58.60	14.07	2.29	23.24	1.78	63.63	30.99	5.37	

8. Afonso J., Couto C., Martins J. Active filters with control based on p-q theory // IEEE Industrial Electronics Society Newsletter. – 2000. – vol.47. – no.3. – pp. 5-10.

9. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – vol.15. – no.4. – pp. 660-669. doi: 10.1109/63.849036.

10. Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames // Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475). – 1999. – pp. 422-427. doi: 10.1109/PEDS.1999.794600.

11. Шидловский А.К. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью. К.: Наук.

думка, 1993. – 272 с.

12. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частот із широтно-імпульсною модуляцією. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.

13. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Физический смысл понятия «реактивная мощность» применительно к трехфазным системам электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 36-42.

14. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Уточнение универсальной формулы для определения мощности потерь в трехфазных системах электроснабжения // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – №12. – С. 339-343.

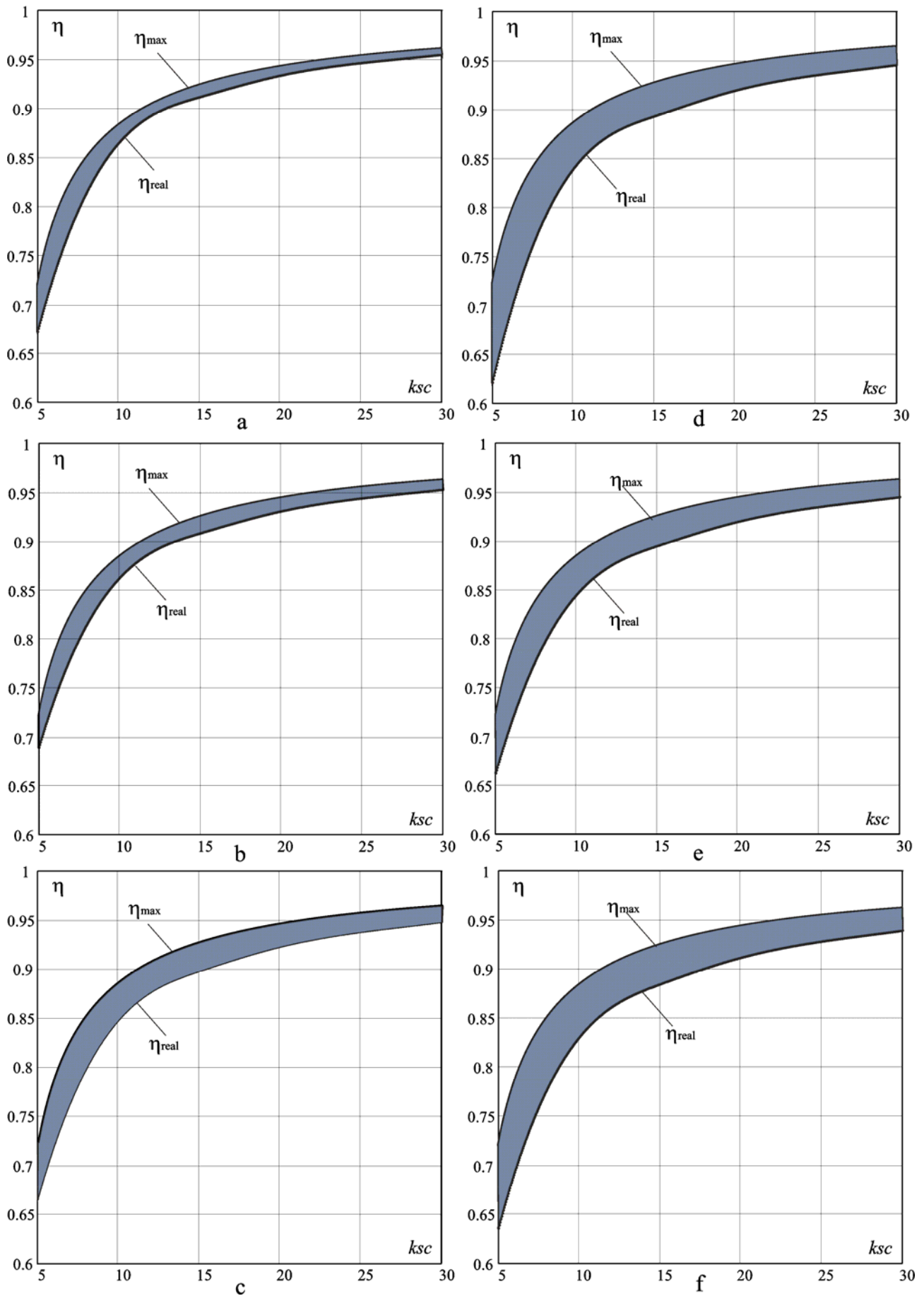


Рис. 3. Резерв повышения КПД трехфазной четырехпроводной СЭ:
a – в режиме 1; *b* – в режиме 2; *c* – в режиме 3; *d* – в режиме 4; *e* – в режиме 5; *f* – в режиме 6

15. Артеменко М.Ю., Батрак М.Л., Михальський В.М., Поліщук С.Й. Аналіз можливості збільшення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення засобами паралельної активної фільтрації // Технічна електродинаміка. – 2015. – №6. – С. 12-18.

REFERENCES

1. 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.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol.1A-20, no.3, pp. 625-630. doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
3. 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.
4. 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.
5. Czarnecki L.S. Misinterpretations of some power properties of electric circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol.9, no.4, pp. 1760-1769. doi: 10.1109/61.329509.
6. Ghassemi F. Should the theory of power be reviewed? *L'energia elettrica*, 2004, vol.81, pp. 85-90.
7. 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.
8. Afonso J., Couto C., Martins J. Active filters with control based on p-q theory. *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, 2000, vol.47, no.3, pp. 5-10.
9. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, vol.15, no.4, pp. 660-669. doi: 10.1109/63.849036.
10. Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. *Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475)*, 1999, pp. 422-427. doi: 10.1109/PEDS.1999.794600.
11. Shidlovskii A.K. *Tranzistornye preobrazovateli s uluchshennoi elektromagnitnoi sovmestimost'iu* [Transistor converters with improved electromagnetic compatibility]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1993. 272 p. (Rus).
12. Mykhal's'kyi V.M. *Zasoby pidvyshchennya yakosti elektroenerhiyi na vkhodi i vykhodi peretvoryuvachiv chastot iz shyroto-impul'snoyu modulyatsiyeyu* [Means improve power quality input to output frequency converters with pulse-width modulation]. Kiev, Instytut elektrodynamiky NAN Ukrayiny Publ., 2013. 340 p. (Ukr).
13. Zhemerov G.G., Tugay D.V. Physical meaning of the «reactive power» concept applied to three-phase energy supply systems with non-linear load. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 36-42. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.06.

14. Zhemerov G.G., Tugay D.V. An universal formula clarification to determine the power losses in the three-phase energy supply systems. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.12, pp. 339-343. (Rus).

15. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Mykhalskyi V.M., Polishchuk S.Y. Analysis of possibility to increase the efficiency of three-phase four-wire power system by means of shunt active filter. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodyamics*, 2015, no.6, pp. 12-18. (Ukr).

Поступила (received) 02.02.2016

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,

Тугай Дмитрий Васильевич², к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076312, e-mail: zhemerov@gmail.com

²Харьковский национальный университет

городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,

61002, Харьков, ул. Революции, 12,

тел/phone +38 057 7073111, e-mail: tugaydv@yandex.ua

G.G. Zhemerov¹, D.V. Tugay²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Components of total electric energy losses power in pqr spatial coordinates.

Purpose. To obtain relations determining the components of the total losses power with p-q-r power theory for three-phase four-wire energy supply systems, uniquely linking four components: the lowest possible losses power, losses power caused by the reactive power, losses power caused by the instantaneous active power pulsations, losses power caused by current flowing in the neutral wire. **Methodology.** We have applied concepts of p-q-r power theory, the theory of electrical circuits and mathematical simulation in Matlab package. **Results.** We have obtained the exact relation, which allows to calculate the total losses power in the three-phase four-wire energy supply system using three components corresponding to the projections of the generalized vectors of voltage and current along the pqr axis coordinates. **Originality.** For the first time, we have established a mathematical relationship between spatial representation of instantaneous values of the vector components and the total losses power in the three-phase four-wire energy supply systems. **Practical value.** We have elucidated an issue that using the proposed methodology would create a measuring device for determining the current value of the components of total losses power in three-phase systems. The device operates with measuring information about instantaneous values of currents and voltages. References 14, tables 1, figures 3.

Key words: energy supply system, p-q-r power theory, the minimum possible losses, total losses power, Matlab-model of the three-phase energy supply system.

V.S. Grinchenko, K.V. Chunikhin, N.V. Grinchenko

LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELD SHIELDING BY A CIRCULAR PASSIVE LOOP AND CLOSED SHELLS

Purpose. To analyze the shielding factors for a circular passive loop and conductive closed shells placed in a homogeneous low-frequency magnetic field. *Methodology.* We have obtained simplified expressions for the shielding factors for a circular passive loop and a thin spherical shell. In addition, we have developed the numerical model of a thin cubical shell in a magnetic field, which allows exploring its shielding characteristics. *Results.* We have obtained dependences of the shielding factors for passive loops and shells on the frequency of the external field. Analytically determined frequency of the external magnetic field, below which field shielding of a passive loop is expedient to use, above which it is advisable to use a shielding shell. References 10, figures 4.

Key words: shielding factor, magnetic field, circular passive loop, thin shell.

Проведен сравнительный анализ эффективности экранирования однородного низкочастотного магнитного поля электропроводящим кольцом и замкнутыми оболочками. Получены упрощенные выражения для эффективности экранирования магнитного поля электропроводящим кольцом и тонкостенной сферической оболочкой. Разработана численная модель тонкостенной кубической оболочки в магнитном поле, позволяющая исследовать её экранирующие характеристики. Приведены зависимости эффективности экранирования кольцом и замкнутыми оболочками от частоты внешнего поля. Аналитически определена частота внешнего магнитного поля, ниже которой для экранирования поля целесообразно использовать электропроводящее кольцо, выше которой целесообразно использовать замкнутую оболочку. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: эффективность экранирования, магнитное поле, электропроводящее кольцо, тонкостенная оболочка.

Introduction. Negative effect of the magnetic field (MF), in particular the low-frequency magnetic field, on the human health [1] as well as limitations on levels of MF in which the stable operation of modern equipment is guaranteed [2] require reducing values of magnetic flux density to accepted ones.

Let's consider a problem of the homogeneous low-frequency MF mitigation in a local domain. Shielding systems are divided into passive and active by the way of power supply. In some works [3, 4] there is proposed to use systems of active shielding for the MF mitigation in the local domain. However, in this work the consideration will be limited by passive electromagnetic shielding. To reduce the external MF in the local domain the electromagnetic shields are manufactured as thin closed shells and usually they have shape of a box or a cylinder with equipment located inside them [5-9]. In [9] there was proposed to use a circular passive loop for the low-frequency MF shielding. In [10] an expression for the shielding factor was written more exactly, and radius of the domain within the circular passive loop in which it is recommended to place equipment was determined.

The goal of this work is to compare shielding properties of the circular passive loop (see Fig. 1,a) and thin closed shells (see Fig. 1,b,c) at various frequencies of the external MF as well as to determine a criterion of utilization of one or another shielding element.

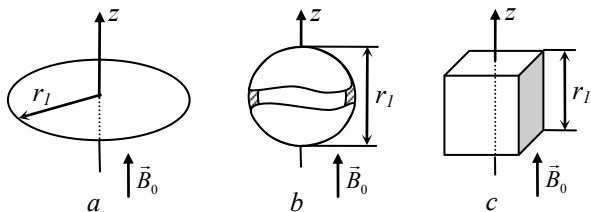


Fig. 1

At the analysis shells of cubic and spherical shapes are considered. A shielding shell has the spherical shape

seldom but frequently closed shields of various shape can be approximately substituted by a spherical shield of the equivalent volume in such a way that three coordinate dimensions of the substituted shield approach to the diameter of spherical one [5].

The MF shielding by a circular passive loop. Shielding factor SF is the ratio of the RMS value of the external magnetic flux density to the RMS value of the magnetic flux density at the utilization of the shield. Let's assume that a circular passive loop of the radius r_1 with a round cross-section of the radius r_2 is placed in the homogeneous low-frequency MF (see Fig. 1,a). The loop's plane is oriented perpendicular to the external MF, and the magnetic flux density complex amplitude is $\vec{B}_0 = \vec{e}_z \cdot B_0$, where B_0 is the external MF amplitude, \vec{e}_z is the ort. The frequency of the external MF is f , Hz. Then, the shielding factor for the circular passive loop [10] in the sighting point (r, z) equals to

$$SF = \frac{B_0}{\sqrt{|B_0 + \dot{B}_z^{coil}|^2 + |\dot{B}_r^{coil}|^2}}, \quad (1)$$

where

$$\dot{B}_z^{coil} = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi\sqrt{(r_1+r)^2+z^2}} \cdot \left[\frac{r_1^2-r^2-z^2}{(r_1-r)^2+z^2} \cdot E(k) + K(k) \right],$$

$$\dot{B}_r^{coil} = \frac{\mu_0 \dot{I} z}{2\pi r \sqrt{(r_1+r)^2+z^2}} \cdot \left[\frac{r_1^2+r^2+z^2}{(r_1-r)^2+z^2} \cdot E(k) - K(k) \right],$$

are components of MF created by the induced in the passive loop current; the complex amplitude of the current is

$$\dot{I} = \frac{\pi}{\mu_0} \cdot \frac{r_1 B_0}{\frac{7}{4} - \ln \frac{8r_1}{r_2} + j \cdot \frac{1}{\mu_0 \pi f \sigma r_2^2}};$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}, \quad E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi,$$

are complete elliptic integrals of the 1st and the 2nd kind, respectively; $k = \frac{4r_1 r}{\sqrt{(r_1 + r)^2 + z^2}}$ is the numerical coefficient; σ is the loop's conductivity, S/m; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m is the magnetic constant; j is the imaginary unit.

As it was shown in [10], if r_1 is the passive loop radius then it is useful to limit the shielding domain located in its central part by a sphere of radius $r_1/2$. The shielding factor SF is a function of the sighting point coordinates. Minimal SF takes places on the shielding domain's bound

on the circular loop's axis: $SF_{coil} = SF\left(r=0, z=\frac{r_1}{2}\right)$.

Using (1) we obtain the final expression for the circular passive loop's shielding factor:

$$SF_{coil} = \left[1 + \frac{\frac{16\pi^2}{125} + \frac{8\pi}{5\sqrt{5}} \left(\frac{7}{4} - \ln \frac{8r_1}{r_2} \right)}{\left(\frac{7}{4} - \ln \frac{8r_1}{r_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{\mu_0 \pi f \sigma r_2^2} \right)^2} \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

The MF shielding by a conductive spherical shell.

A problem of the MF determination within a thin conductive spherical shell placed in the homogeneous low-frequency MF (see Fig. 1,b) is considered in [5]. In this work the calculation of the shielded MF is carried out at the following assumptions. Firstly, the shell thickness d_s is supposed to be much less than the MF penetration depth to the conductor δ . Secondly, the thickness d_s is supposed to be much less than the shell radius R . At these assumptions the MF within the shell is homogeneous, and the shielding factor equals to

$$SF_{sphere}^{(Kaden)} = \left| \operatorname{ch} kd_s + \frac{1}{3} \cdot \left(K + \frac{2}{K} \right) \cdot \operatorname{sh} kd_s \right|, \quad (3)$$

where $K = kR$ and $k = \sqrt{j \mu_0 2\pi f \sigma + \frac{2}{R^2}}$ are the nondimensional coefficient and the coefficient with dimensionality m^{-1} , respectively; σ is the spherical shell conductivity, S/m. In (3) the spherical shell relative permeability is assumed to be equal 1.

For the considered in the present work dimensions and frequencies the following relation takes place: $\delta \ll R$. Considering the expansion of the second member of (3) by the small parameter δ/R , we obtain the expression for the shielding factor for the conductive spherical shell placed in the homogeneous low-frequency MF:

$$SF_{sphere} = \sqrt{1 + \left(\frac{\mu_0 2\pi f \sigma R d_s}{3} \right)^2}. \quad (4)$$

The MF shielding by a conductive cubic shell.

Analytical calculation of the MF within a conductive cubic shell placed in the external MF (see Fig. 1,c) is very difficult. Therefore, it is useful to use the numerical modeling. Because of the exciting field is low-frequency, the MF is described by the equation obtained from the Am-

per's circuital law in quasi-static approach:

$$\begin{cases} \Delta \dot{A}^{(i)} = -j \mu_0 2\pi f \sigma \dot{A}^{(i)}, \\ \Delta \dot{A}^{(e)} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

where $\dot{A}^{(i)}, \dot{A}^{(e)}$ are complex amplitudes of the vector potential of the electromagnetic field inside and outside the cubic shell's walls, respectively; σ is its conductivity, S/m. In (5) the cubic shell relative permeability is assumed to be equal 1.

To «link» solutions of the system (5) it is necessary to set conditions on the interface of the air region and conductive shell's walls:

$$\begin{cases} \dot{A}_\tau^{(i)} = \dot{A}_\tau^{(e)}, \\ \operatorname{rot}(\dot{A}^{(i)})_\tau = \operatorname{rot}(\dot{A}^{(e)})_\tau, \end{cases} \quad (6)$$

where the index τ indicates that tangential for the interface vectors components are taken.

On the calculation region's bound the MF is supposed to be undisturbed, and the magnetic potential is set to equal to

$$\begin{cases} \dot{A}_x = -y \cdot B_0/2, \\ \dot{A}_y = x \cdot B_0/2, \\ \dot{A}_z = 0, \end{cases} \quad (7)$$

where x, y are coordinates of the point on the calculation region's bound. For the correct utilization of (7), the calculation region's dimension is selected much more than the cubic shell edge.

The described problem is solved by the Finite Element Method using the software package *COMSOL Multiphysics*. To solve the problem, the interface «*Magnetic Fields*» which is a part of the «*AC/DC Module*» was used. This interface permits to model processes described by the equations (5). Building the 3D model for the option «*Space Dimension*», the variant «*3D*» was set. In all domains the mesh «*Free Tetrahedral*» was used, and within the cubic shell walls the mesh was finest.

Input parameters of the model are the amplitude B_0 and the frequency f of the external MF, the conductivity σ , the edge length a , and the walls thickness d_c of the cubic shell. The calculation result is the distribution of the RMS value of the magnetic flux density $B_{rms}(x,y,z)$.

The cubic shell placed in the homogeneous MF $\vec{B}_0 = \vec{e}_z \cdot B_0$ is shown in Fig. 2. The MF frequency is equal to 150 Hz. The borders of the cubic shell are shown by a dashed line. The shell is made of copper, the edge length is equal to 0.3 m, and the wall thickness is equal to 0.27 mm. The isolines in the Fig. 2 correspond to values

of $SF^{-1}(x,y,z) = \frac{B_{rms}(x,y,z)}{B_0/\sqrt{2}}$ from 0.8 to 1.05. The distribution is built in the plane $y = 0$. In the center of the shell under consideration $SF^{-1} = 0.81$. Hence, the variation of SF^{-1} within the shell is less than 1 %. Therefore, the shielding factor for the cubic shell is determined as

$$SF_{cube} = \min \left\{ \frac{B_0/\sqrt{2}}{B_{rms}(x,y,z)} \left| \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < \frac{a}{3} \right. \right\}.$$

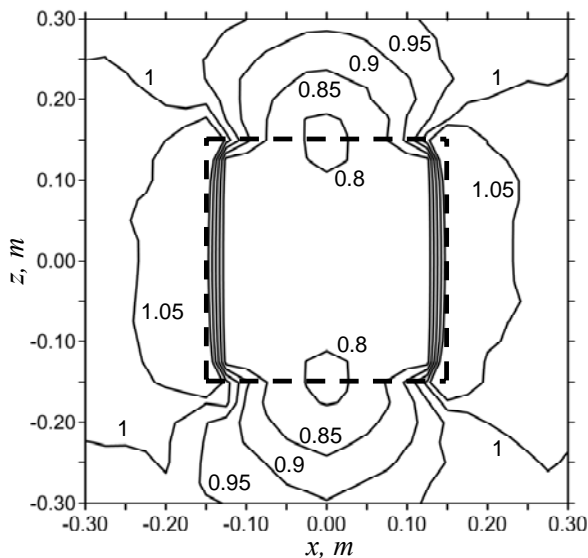


Fig. 2

The comparison of shielding factors for a passive loop and shells. Let's determine the dependence of the shielding factors on the external field frequency for a circular passive loop and conductive shells (spherical and cubic) placed in the homogeneous low-frequency MF. We assume that a passive loop and shells are made from copper with conductivity $\sigma = 5.41 \cdot 10^7$ S/m. The passive loop radius is assumed to be $r_1 = 0.3$ m. We consider two cases when the loop's cross-section radius r_2 equals to 2.5 mm and 5 mm. Because of the domain of the shielding by the circular passive loop is a sphere of the radius of $r_1/2$ [10], for the comparison of the passive loop's and shells' shielding characteristics let's assume the spherical shell radius $R = r_1/2$ and the cube edge length $a = r_1$. Besides, for the correctness of the shielding characteristics comparison, the passive loop's and shells' metal intensities should be the same. Therefore, the spherical shell thickness d_s and cubic shell one d_c are determined as follows:

$$d_s = 2\pi r_2^2 / r_1,$$

$$d_c = (\pi r_2)^2 / (3r_1).$$

In Fig. 3 the shielding factor dependence on the external MF frequency in the case $r_2 = 2.5$ mm is represented. The full line corresponds to SF_{coil} , the dashed line corresponds to SF_{sphere} , and dots correspond to SF_{cube} . The dependences $SF_{coil}(f)$ and $SF_{sphere}(f)$ are obtained by using analytical expressions (2) and (4), respectively. The dependence $SF_{cube}(f)$ is obtained by interpolation of numerical modeling results depicted by dots in Fig. 3.

From the presented dependences it can be seen that at frequencies less than $f_0 = 217$ Hz the effectiveness of the shielding by the circular passive loop is higher than the effectiveness of the shielding by the spherical shell. From physical point of view, it can be explained by the change of the mechanism of the MF mitigation in the shielded domain. At $f < f_0$ the MF mitigation is determined by the induced conduction current only, but at $f > f_0$ it is necessary to take into account the contribution of the MF attenuation in the shell's walls. As it is shown from Fig. 3 at frequencies 200-250 Hz the shielding factor equals to 1.15-1.20.

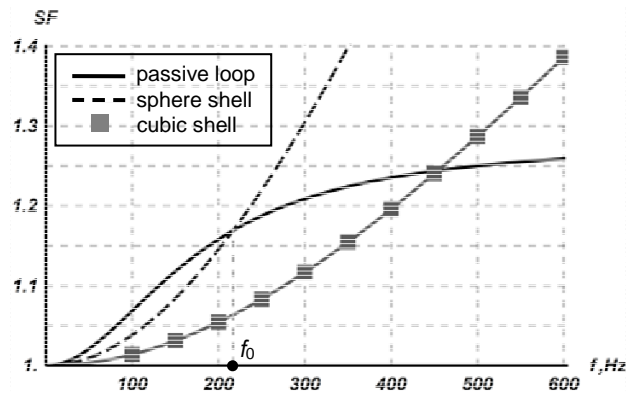


Fig. 3

As it was supposed the cubic shell's shielding characteristics are lower in the comparison with spherical one's at all frequency spectrum. In its turn, the cubic shell's shielding characteristics are lower than passive loop's ones at frequencies less than 454 Hz that is two times greater than f_0 (see Fig. 3).

In Fig. 4 the shielding factor dependence on the external MF frequency in the case $r_2 = 5$ mm is represented. In this case, f_0 equals to 56 Hz.

The shielding factor is higher than in the previous case that is explained by the metal intensity increase in four times. However, the curves' character is the same. As it can be seen from Fig. 4 the shielding factor of 1.15-1.20 is reached at frequencies 50-60 Hz.

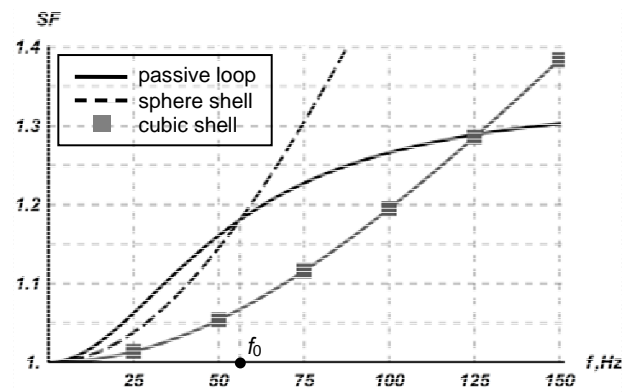


Fig. 4

As the shells' metal intensity increases, their walls' thickness increases too. As a result, the penetration depth δ at which the absorption mechanism becomes prevailing in the MF shielding increases, too. Therefore, as the metal intensity increases the value of the frequency f_0 decreases. The value of the frequency f_0 can be obtained analytically from the equation

$$SF_{coil}|_{f=f_0} = SF_{sphere}|_{f=f_0}.$$

Using (2) and (4) we obtain:

$$f_0 = \frac{6}{\mu_0 \sigma} \cdot \frac{R}{V} \times \sqrt{\frac{-\left(\frac{4}{9} + \frac{16}{125}\right) \cdot \pi^2 + \frac{8\pi}{5\sqrt{5}} \cdot \left(-\frac{7}{4} + \ln(32\pi) + \frac{1}{2} \ln \frac{R^3}{V}\right)}{-\frac{4\pi}{5\sqrt{5}} - \frac{7}{4} + \ln(32\pi) + \frac{1}{2} \ln \frac{R^3}{V}},$$

where $V = 2\pi r_1 \cdot \pi r_2^2 = 4\pi R^2 \cdot d_s$ is the metal intensity of the circular passive loop and shell; R is the radius of the shielded domain.

Calculating the numerical coefficients with precision till three significant digits, we obtain the final expression for f_0 :

$$f_0 = \frac{12,7}{\mu_0 \sigma} \cdot \frac{R}{V} \cdot \frac{\sqrt{0,694 + \ln \frac{R^3}{V}}}{3,47 + \ln \frac{R^3}{V}}.$$

So, in the region $f > f_0$ in order to mitigate the MF in the region of the radius R at given metal intensity V it is useful to use the closed conductive shell. If the external MF frequency $f < f_0$, it is useful to use the circular passive loop with radius $2R$.

Conclusions.

1. Analytical expressions for shielding factors for the circular passive loop and conductive spherical shell are obtained which together with developed numerical model of the cubic shell permit to compare their effectiveness of the external MF shielding at various frequencies.

2. The external MF frequency f_0 is determined which can serve as a criterion of the expediency of the circular passive loop utilization. At the MF frequency less than f_0 , the passive loop shielding factor is higher than the shielding factor for the equivalent volume spherical shell. At the MF frequency less than $2f_0$, passive loop shielding factor is higher than the shielding factor for the equivalent volume cubic shell.

REFERENCES

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz-100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol.99, no.6, pp. 818-836. doi: **10.1097/HP.0b013e3181f06c86**.

2. Korol' E.G., Pantelyat M.G. EMC requirements of technical devices at electric power facilities and industrial. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.15, pp. 35-60. (Rus).

3. Rozov V.Yu. Assuirov D.A. Method of the active shielding of technical objects external magnetic field. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).

4. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V., Voloshko A.V., Vinichenko E.V., Kotliarov D.A. Active screening of magnetic field near power station generator buses. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 66-71. (Rus).

5. Kaden H. Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. – Springer Berlin Heidelberg, 1959. doi: **10.1007/978-3-540-32570-3**.

6. Buccella C., Feliziani M., Maradei F., Manzi G. Magnetic field computation in a physically large domain with thin metallic shields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol.41, no.5, pp. 1708-1711. doi: **10.1109/TMAG.2005.846059**.

7. Kistenmacher P., Schwab A. Low-frequency shielding effectiveness of inhomogeneous enclosures. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1996, pp. 347-352. doi: **10.1109/ISEMC.1996.561256**.

8. Clairmont B.A., Lordan R.J. 3-D modeling of thin conductive sheets for magnetic field shielding: calculations and measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol.14, no.4, pp. 1382-1393. doi: **10.1109/PESW.1999.747382**.

9. Roginskiy V.Yu. *Ekranirovanie v radioustroystvakh* [Shielding in radio devices]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 112 p. (Rus).

10. Grinchenko V.S., Chunikhin K.V. Shielding of a uniform alternating magnetic field using a circular passive loop. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.2, pp. 31-34. (Rus).

Received 11.01.2016

V.S. Grinchenko¹, Candidate of Technical Science,
K.V. Chunikhin¹,
N.V. Grinchenko², Candidate of Technical Science,
¹State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,
19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine,
e-mail: vsgrinchenko@gmail.com, kvchunikhin@gmail.com
²Ukrainian State University of Railway Transport,
7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine.

А.В. Ерисов, Е.Д. Пелевина, Д.Е. Пелевин

МЕТОД РАСЧЕТА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК

На основі просторового гармонічного аналізу магнітного поля в циліндричній системі координат запропоновано метод розрахунку індукції магнітного поля ліній електропередачі. Показано, що магнітне поле ліній електропередачі з достатньою для інженерних розрахунків точністю описується першою циліндричною просторовою гармонікою. Використання запропонованого методу дозволяє істотно спростити визначення впливу конструкції опор ліній електропередачі на величину їх магнітного поля та на ширину смуг відчуження земельних ділянок. Бібл. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: лінія електропередачі, магнітне поле, циліндричні просторові гармоніки.

На основе пространственного гармонического анализа магнитного поля в цилиндрической системе координат предложен метод расчета индукции магнитного поля линий электропередачи. Показано, что магнитное поле линий электропередачи с достаточной для инженерных расчетов точностью описывается первой цилиндрической пространственной гармоникой. Использование предложенного метода позволяет существенно упростить определение влияния конструкции опор линий электропередачи на величину их магнитного поля и на ширину полос отчуждения земельных участков. Библ. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: линия электропередачи, магнитное поле, цилиндрические пространственные гармоники.

Введение. Одной из задач, решаемых проектировщиками воздушных линий электропередачи (ЛЭП) при оценке их экологической безопасности, является определение размеров $\pm X_s$ ширины полосы отчуждения, как показано на рис. 1. К числу факторов, которые определяют ширину этих полос, относятся установленные на их границе $\pm X_s$ ограничения [1, 2] величины модуля вектора индукции B_l магнитного поля (МП), создаваемого ЛЭП на высоте h_0 от поверхности земли. В соответствии с этими ограничениями, величина модуля B_l на удалении $-X_s \leq x \leq X_s$ от ЛЭП должна быть меньше установленного значения индукции B_s . Границы $(-X_s; +X_s)$ полосы отчуждения по параметру B_s определяют по расчетным зависимостям (магнитограммам) модуля магнитной индукции B_l ЛЭП (рис. 1).

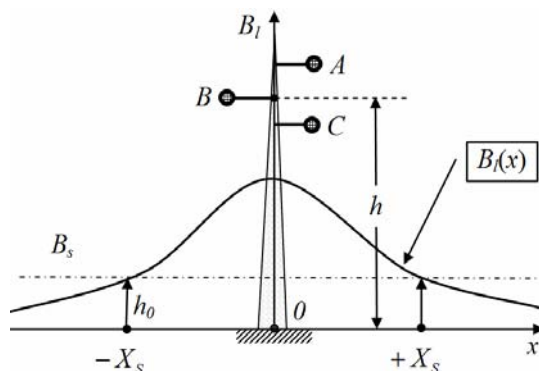


Рис. 1. Магнитограммы ЛЭП

Постановка задачи. Для упрощения расчета МП ЛЭП в дальней зоне (на границе зон отчуждения ЛЭП) применяют мультидипольные модели ЛЭП [3], основанные на использовании сферических пространственных гармоник. При этом расчетные соотношения являются достаточно сложными, а конечные результаты расчета представляются, как правило, в численном формате, что усложняет практически необходимое установление причинно - следственных связей между конструктивными параметрами ЛЭП и распределением индукции их МП.

Целью работы является упрощение расчетных соотношений для определения индукции МП ЛЭП и оценки их экологической безопасности.

Реализацию цели работы предлагается осуществить на основе использования цилиндрических пространственных гармоник для расчета индукции магнитного поля ЛЭП.

Изложение материала исследований. При описании магнитного поля ЛЭП предположим, что:

- проводники фаз линии – это параллельные токовые нити бесконечной протяженности и бесконечно малого диаметра.
- токи линии $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ образуют симметричную систему:

$$\dot{I}_A = I, \dot{I}_B = \alpha^2 I, \dot{I}_C = \alpha I, \quad (1)$$

где $\alpha = e^{j4\pi/3}$.

При таких допущениях пространственный гармонический анализ магнитного поля ЛЭП может быть выполнен в цилиндрической системе координат (r, φ, Y) , ось Y , которой проходит через центр окружности минимального радиуса r_{\min} , куда вписываются все токовые нити (рис. 2).

Соотношение (1) позволяет представить модуль магнитной индукция $B_l(x)$ трехфазной линии в произвольной точке пространства P , как модуль суммы магнитных индукций $\vec{B}_{A-0}(P), \vec{B}_{B-0}(P), \vec{B}_{C-0}(P)$ соответственно, трех независимых замкнутых протяженных цепей $A-0, B-0$ и $C-0$ (см. рис. 2).

$$B_s(P) = \left| \vec{B}_{A-0}(P) + \vec{B}_{B-0}(P) + \vec{B}_{C-0}(P) \right|. \quad (2)$$

При выбранной трассе (вдоль оси Y) прохождения обратных проводов с токами $-\dot{I}_A, -\dot{I}_B$ и $-\dot{I}_C$ положение каждой из трех цепей определяют, соответственно, координаты нитей фаз A, B, C .

Пространственный гармонический анализ МП замкнутой токовой цепи. Имеется токовая замкнутая цепь, например, $A-0$ (рис. 2).

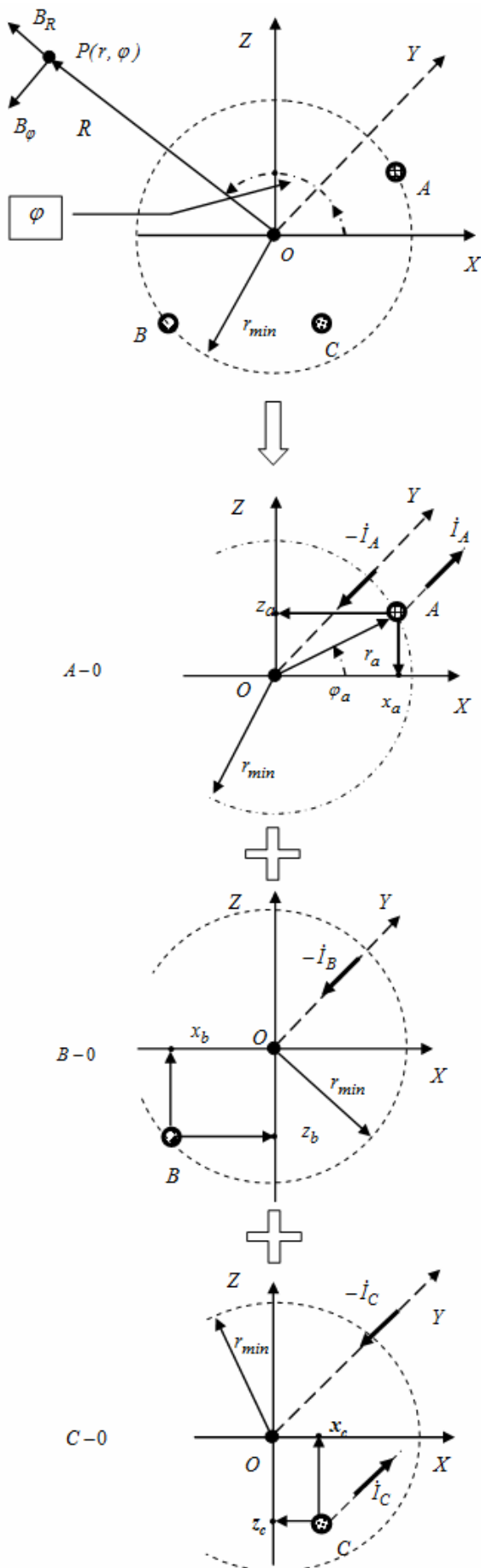


Рис. 2. Представление трехфазной линии в виде трех независимых цепей

Векторный потенциал $A_{(A-0)Y}$ магнитного поля такой цепи в произвольной точке пространства $P(r, \varphi, Y)$, определяется как сумма соответствующих векторных потенциалов A_{ay} , $A_{a\bar{y}}$ - тока фазы A и обратного ей тока и с учетом [4] может быть определен соотношением

$$A_{(A-0)Y} = A_{ay} + A_{a\bar{y}} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln r - \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \sqrt{(r^2 + (r_a)^2 - 2rr_a \cos(\varphi - \varphi_a))}. \quad (3)$$

Соотношение (3) можно представить в виде ряда Фурье, после чего для внешней области ($r \geq r_{\min}$) оно примет известный вид [5]

$$A_{(A-0)Y} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{r}\right)^n \left(\frac{a_{an} \cos n\varphi + b_{an} \sin n\varphi}{n}\right), \quad (4)$$

где a_{an} , b_{an} - амплитуды n -го порядка гармоник векторного потенциала магнитного поля токовой цепи $A-0$

$$a_{an} = (r_a)^n \cos n\varphi_a, \quad b_{an} = (r_a)^n \sin n\varphi_a. \quad (5)$$

Гармоники векторного потенциала (4), определяют и соответствующие гармоники компонент ее магнитной индукции B_{ar} и $B_{a\varphi}$:

$$B_{ar} = \frac{\mu_0}{r} \frac{dA_{(A-0)Y}}{d\varphi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[a_{an} \sin n\varphi + b_{an} \cos n\varphi]}{r^{n+1}}, \quad (6)$$

$$B_{a\varphi} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dA_{(A-0)Y}}{dr} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a_{an} \cos n\varphi + b_{an} \sin n\varphi)}{r^{n+1}}. \quad (7)$$

Модуль индукции B_{an} магнитного поля n гармоники в точке $P(r, \varphi, Y)$ при этом будет зависеть от координаты r

$$B_{an} = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r^{n+1}} \sqrt{(a_{an})^2 + (b_{an})^2}. \quad (8)$$

В табл. 1 приведены значения амплитуд a_{an} , b_{an} двух первых гармоник для цепи $A-0$ в системе координат X, Y, Z (рис. 2).

Таблица 1
Амплитуды гармоник магнитной индукции токовой цепи $A-0$

Амплитуда гармоник	Соотношения для цепи с координатами x_a, z_a
a_{a1}	x_a
b_{a1}	z_a
a_{a2}	$(x_a)^2 - (z_a)^2$
b_{a2}	$2x_a z_a$

Такой формат представления амплитуд a_{an} , b_{an} хорошо гармонируется с конструкторской документацией на опоры ЛЭП, которая регламентирует координаты точек подвеса ее проводов относительно земной поверхности.

По аналогии с (5), определяются и амплитуды гармоник a_{bn} , b_{bn} и a_{cn} , b_{cn} цепей $B-0$ и $C-0$, соответственно:

$$a_{bn} = \alpha^2 \cdot (r_b)^n \cos n\varphi_b, \quad b_{bn} = \alpha^2 \cdot (r_b)^n \sin n\varphi_b, \quad (9)$$

$$a_{cn} = \alpha^2 \cdot (r_c)^n \sin n\varphi_c, \quad b_{cn} = \alpha^2 \cdot (r_c)^n \cos n\varphi_c.$$

Структура ряда (6), (7) такова, что с ростом r вклад гармоник высоких порядков в компоненты магнитной индукции B_r и B_φ снижается.

Так, магнитная индукция двухпроводной линии на удалении $x \geq r_{\min}$ описывается, в основном, ее первой ($n = 1$) гармоникой, что иллюстрируют построен-

ные по соотношению (8) магнитогаммы на рис. 3. Здесь же представлены результаты расчета по закону Био-Савара-Лапласа в соответствии с [6].

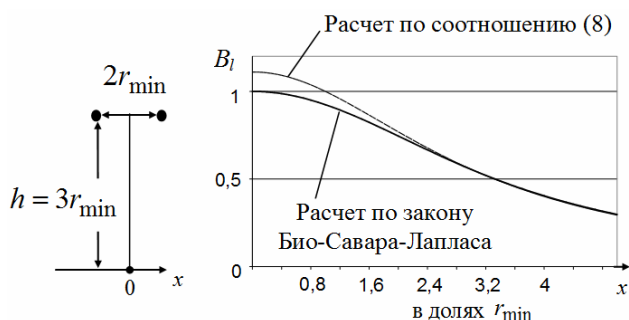


Рис. 3. Магнитогаммы B_l двухпроводной линии при единичном токе I

Сравнение результатов расчета (рис. 3) показывает, что при удалении от оси ЛЭП на расстояние более r_{\min} , погрешность предложенного метода по сравнению с точным методом [6] не превышает 10%, что подтверждает возможность использования первой цилиндрической пространственной гармоники для расчета МП ЛЭП на границе их охранных зон.

Магнитное поле одноцепных ЛЭП. Одноцепные линии имеют один комплект фазных проводов. Их взаимное расположение друг относительно друга и земной поверхности определяет конструктивное исполнение (профиль) опоры ЛЭП.

Согласно представленной на рис. 2 «магнитной» интерпретации ЛЭП, амплитуды a_{ln} и b_{ln} гармоник ее магнитного поля, с учетом (1) и (2), представляются в виде суммы соответствующих амплитуд ее независимых цепей $A-0$, $B-0$, $C-0$:

$$a_{ln} = a_{an} + \alpha^2 a_{bn} + \alpha a_{cn}, \quad b_{ln} = b_{an} + \alpha^2 b_{bn} + \alpha b_{cn}. \quad (10)$$

Первой значимой гармоникой одноцепных ЛЭП является гармоника порядка ($n = 1$). Ее амплитуды a_{l1} и b_{l1} с учетом (5), (10) будут равны:

$$a_{l1} = x_a + \alpha^2 \cdot x_b + \alpha \cdot x_c, \quad b_{l1} = z_a + \alpha^2 \cdot z_b + \alpha \cdot z_c. \quad (11)$$

Здесь следует обратить внимание на то, что величины амплитуды a_{l1} и b_{l1} первой гармоники ($n = 1$) не зависят от начала выбранной системы координат X, Y, Z .

Знание амплитуд a_{l1} и b_{l1} первой гармоники магнитного поля ЛЭП позволяет, по соотношению (7) построить ее магнитогаммы

$$B_l(x) \approx B_{l1}(x) = \mu_0 I \frac{\sqrt{(a_{l1})^2 + (b_{l1})^2}}{2\pi \cdot ((h - h_0)^2 + x^2)}, \quad (12)$$

где h – расстояние от уровня земной поверхности (рис. 1) до центра окружности r_{\min} , в которую вписываются все токовые линии ЛЭП.

Для удобства расчетов расстояние h можно положить равным средней высоте h_a, h_b, h_c подвеса соответственно проводов фаз A, B и C

$$h \approx 1/3(h_a + h_b + h_c). \quad (13)$$

После несложных, но громоздких преобразований соотношение (12) можно привести к виду:

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{d_{rms}}{2\sqrt{2}\pi \cdot ((h - h_0)^2 + x^2)}, \quad (14)$$

где d_{rms} – среднее квадратичное расстояние между проводами ЛЭП

$$d_{rms} = \sqrt{(d_{AB})^2 + (d_{BC})^2 + (d_{CA})^2},$$

где d_{AB}, d_{BC}, d_{CA} – расстояние между точками подвеса на опоре проводов фаз A и B, B и C, C и A , соответственно.

Аналитическое представление магнитогамм (14) позволяет определить размер $\pm X_s$ полосы отчуждения при заданном параметре B_l

$$\pm X_s = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot I \cdot d_{rms}}{2\sqrt{2} \cdot \pi \cdot B_l} - (h - h_0)^2}. \quad (15)$$

Это соотношение устанавливает взаимную связь между размерами $\pm X_s$ полосы отчуждения и характеристиками ЛЭП – ее токовой (I) нагрузкой и конструктивным исполнением (профилем) ее опор, а именно средней высотой h точек подвеса проводов и среднеквадратичным расстоянием d_{rms} между ними.

Подземные кабельные ЛЭП. Магнитогаммы подземных кабельных линий, по аналогии с воздушными одноцепными ЛЭП определяются первой ($n = 1$) гармоникой их магнитной индукции.

Ниже приведены соотношения для магнитогамм двух наиболее часто применяемых укладок их кабелей (рис. 4) полученные с учетом (8) и (14).

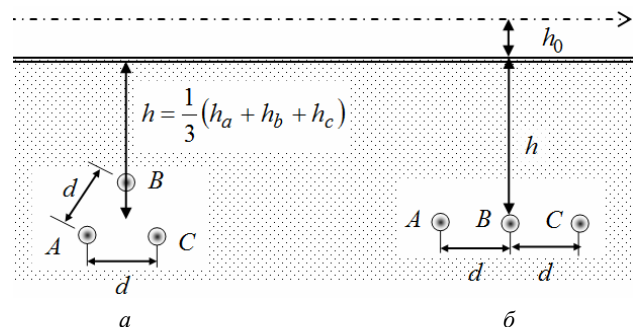


Рис. 4. «Треугольная» (а) и «плоская» (б) укладка кабельной линии

Для «плоской укладки» кабелей

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2\pi \cdot ((h + h_0)^2 + x^2)}. \quad (16)$$

Для укладки кабелей «треугольником»

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2\sqrt{2} \cdot \pi \cdot ((h + h_0)^2 + x^2)}. \quad (17)$$

Выводы.

1. Показано, что для расчета индукции магнитного поля ЛЭП на границе охранных зон с ограниченной погрешностью (менее 10%) может быть использована первая цилиндрическая пространственная гармоника ее магнитного поля.

2. Предложены упрощенные расчетные соотношения индукции магнитного поля ЛЭП на основе цилиндрических пространственных гармоник, позволяющие упростить расчет распределения магнит-

ного поля ЛЭП и оценку влияния конструктивных особенностей ЛЭП на ширину полосы отчуждения земельного участка для обеспечения экологической безопасности.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – 5-те вид., переробл. й доповн. (станом на 22.08.2014). – Х.: Форт, 2014. – 800 с.
2. Степанов И.М. Конструктивные меры снижения интенсивности магнитных полей по трассам воздушных и кабельных линий электропередач. // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №3. – С. 36-41.
3. Розов В.Ю., Реуцкий В.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. – 2013. – №2. – С. 3-8.
4. Штафль М. Электродинамические задачи в электрических машинах и трансформаторах. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 200 с.
5. Jabłoński P. Cylindrical conductor in an arbitrary time-harmonic transverse magnetic field // Przegląd elektrotechniczny (Electrotechnical Review). – 2011. – №5. – pp. 49-53.
6. Розов В.Ю., Реуцкий В.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 11-13.

REFERENCES

1. *Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok 5-te vyd., pererobl. j dopovn. (stanom na 22.08.2014)* [Electrical Installation Regulations. 5 edition, Revised and enlarged (as of 22/08/2014)]. Kharkiv, Fort Publ., 2014. 800 p. (Ukr).
2. Stepanov I.M. Constructive modification reducing the intensity of the magnetic field on the tracks of overhead and cable power lines. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2009, no.3. pp. 36-41. (Rus).
3. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2013, no.2, pp. 3-9. (Rus).

4. Shtafel M. *Elektrodinamicheskie zadachi v elektricheskikh mashinakh i transformatorakh* [Electrodynamic problems in electrical machines and transformers]. Moscow, Leningrad, Energiia Publ., 1966. 200 p. (Rus).
5. Jabłoński P. Cylindrical conductor in an arbitrary time-harmonic transverse magnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny – Electrotechnical Review*, 2011, no.5, pp. 49-53.
6. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pyliugina O.Yu. Method of calculating the magnetic field of three-phase power lines. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

Поступила (received) 04.12.2015

Ерисов Анатолий Васильевич¹,
Пелевина Екатерина Дмитриевна¹,
Пелевин Дмитрий Евгеньевич¹, к.т.н.,
¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная 19, тел/phone: +38 0572 992162, e-mail: erisov@yandex.ua, pelevindmitro@ukr.net

A.V. Yerisov¹, K.D. Pielievina¹, D.Ye. Pelevin¹

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

Calculation method of electric power lines magnetic field strength based on cylindrical spatial harmonics.

Purpose. Simplification of accounting ratio to determine the magnetic field strength of electric power lines, and assessment of their environmental safety. **Methodology.** Description of the transmission lines of the magnetic field by using techniques of spatial harmonic analysis in the cylindrical coordinate system is carried out. **Results.** For engineering calculations of electric power lines magnetic field with sufficient accuracy describes their first spatial harmonic magnetic field. **Originality.** Substantial simplification of the definition of the impact of the construction of transmission line poles on the value of its magnetic field and the bands of land alienation sizes. **Practical value.** The environmentally friendly projection electric power lines on the level of the magnetic field. References 6, tables 1, figures 4.

Key words: electric power line, magnetic field, environmental safety, cylindrical spatial harmonics.

М.И. Баранов

НОВАЯ ГИПОТЕЗА И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧЁТОЧНОЙ МОЛНИИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Наведено нова гіпотеза і фізичні основи виникнення в повітряній атмосфері Землі четочної блискавки (ЧБ). Показано, що в основі електрофізичного механізму формування цього виду блискавки знаходиться хвильовий подовжній розподіл вільних електронів, що рухаються в плазмовому каналі лінійної блискавки (ЛБ) на стадії протікання в ній тривалою компонентою струму грозового розряду. Из-за малої щільності струму в плазмовому каналі на даній стадії розряду в ній відбувається утворення таких відносно тривало існуючих хвильових електронних пакетів, які характеризуються порівняно великими і тому візуально видимими спостережачими спочатку ЛБ і потім ЧБ розмірами своїх періодично розподілених уздовж каналу блискавки «гарячих» («світлих») і «холодних» («темних») подовжніх ділянок. Бібл. 15, рис. 4.

Ключові слова: лінійна блискавка, четочна блискавка, фізичні основи, плазмовий канал грозового розряду, вільні електрони, що дрейфують, хвильові електронні пакети, «гарячі» («світлі») і «холодні» («темні») подовжні ділянки хвильових електронних пакетів каналу грозового розряду.

Приведены новая гипотеза и базирующиеся на ней физические основы возникновения в воздушной атмосфере Земли четочной молнии (ЧМ). Показано, что в основе электрофизического механизма формирования этого вида молнии находится волновое продольное распределение свободных электронов, движущихся в плазменном канале линейной молнии (ЛМ) на стадии протекания в нем длительной компоненты тока грозового разряда. Из-за малой плотности тока в плазменном канале ЛМ на данной стадии разряда в нем происходит образование таких относительно длительно существующих волновых электронных пакетов, которые характеризуются сравнительно большими и поэтому визуально видимыми наблюдателями вначале ЛМ и затем ЧМ размерами своих периодически распределенных вдоль канала молнии «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») продольных участков. Библ. 15, рис. 4.

Ключевые слова: линейная молния, четочная молния, физические основы, плазменный канал грозового разряда, дрейфующие свободные электроны, волновые электронные пакеты, «горячие» («светлые») и «холодные» («темные») продольные участки волновых электронных пакетов канала грозового разряда.

Введение. Общеизвестным и наиболее изученным видом мощного природного электрического кратковременного длинного искрового разряда в воздушной атмосфере Земли является линейная молния (ЛМ) [1-4], внешний вид которой приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид ярко светящегося в атмосфере плазменного канала длинного искрового разряда ЛМ между положительно заряженным облаком и поверхностью земли [5]

Как правило, длина плазменного канала ЛМ между грозовым облаком с отрицательным (положительным) потенциалом U_L до $\pm(30-50)$ МВ и поверхностью земли измеряется сотнями метров и в пределе может достигать нескольких километров [1-5]. Диаметр плазменного канала ЛМ в воздушной атмосфере при этом согласно [1-5] может составлять от десятков сантиметров до нескольких метров. В настоящее время физика ЛМ благодаря результатам теоретических и экспериментальных работ отечественных [2-4] и зарубежных ученых и специалистов [1], представлен-

ном в обзорной монографии [5], изложена на достаточно высоком научно-техническом уровне. Тем не менее, до сих пор в технике и электрофизике высоких напряжений, технике больших (малых) импульсных токов, а также в слабо- и сильноточной технике длинных (коротких) искровых разрядов в газовых (воздушных) средах отсутствуют научно-технические данные, строго или хотя бы приближенно объясняющие трансформацию (правда, не так часто и не всегда) в воздушной атмосфере ЛМ в дальнейшем в четочную молнию (ЧМ). Возникновение ЧМ или «цепочечной» молнии («bead lightning» [1]) в электрически активной воздушной атмосфере является твердо установленным научным фактом, задокументированным многочисленными визуальными наблюдателями этого относительно редкого и интересного природного атмосферного явления [1, 5, 6]. Существующие на сегодня теории ЧМ базируются на том, что этот вид молнии в сверхвысоковольтной двухэлектродной системе «заряженное облако – земля» [1, 6]:

1) является результатом периодического прерывания плазменного канала грозового разряда облаком или дождем;

2) обусловлен нестабильностью плазменного канала грозового разряда с продольным током из-за возникающего в нем пинч-эффекта, приводящего к его поперечной «перетяжке» и образованию канала «сосисочного» типа;

3) представляет собой ряд сфероподобных дуговых электрических разрядов, появляющихся на месте ранее «отработанного» с большим импульсным током грозового разряда плазменного канала ЛМ на завер-

шающей стадии длительного протекания в нем небольшого непрерывного тока;

4) вызван относительно большим временем свечения продольных участков цилиндрического плазменного канала ЛМ, имеющих необычно большой радиус. Прошедшие десятилетия с момента появления в научном мире указанных теорий ЧМ показали, что эти теоретические подходы оказались слабо аргументированными и в итоге научно не состоятельными.

В этой связи разработка нового подхода к научному объяснению возникновения и короткого во времени существования в воздушной атмосфере такого природного явления как ЧМ является **актуальной** научно-технической задачей, научно расширяющей наши представления об окружающей нас природе и физических процессах в ней протекающих.

1. Постановка задачи исследования. Рассмотрим с электрофизических позиций формирование и протекание ЛМ в воздушной атмосфере на высотах до 1000 м, содержащей в своем составе многочисленные увлекаемые восходящими (нисходящими) воздушными потоками атомы многих химических элементов, в том числе азота *N*, кислорода *O*, углерода *C*, кремния *Si*, серы *S*, железа *Fe*, свинца *Pb* и др. Часть из указанных атомов, образующихся из них молекул и тех или иных окислов вещества оказываются в воздушной атмосфере, прежде всего, за счет вторичных продуктов от сгорания и окисления органического топлива на тепловых электрических станциях и крупных промышленных предприятиях, поднимающихся из высоких дымовых труб в земную атмосферу с горячими дымовыми отходами от их непрерывного функционирования. Отметим, что ток ЛМ на указанных высотах в воздушной атмосфере характеризуется двумя основными компонентами [7, 8]: импульсной *A*-компонентой (с нормированной амплитудой I_{mL} до 200 кА и длительностью τ_p до 0,5 мс) и длительной *C*-компонентой (с усредненным значением I_{mL} до 200 А и длительностью τ_p до 1000 мс). Считаем, что при возникновении в воздушной атмосфере плазменного канала ЛМ указанные атомы (молекулы) вещества и их окислы оказываются задействованными в сложные физические процессы, протекающие на «тонком» атомарном уровне в активной зоне данного канала, имеющей локальную цилиндрическую конфигурацию. Не углубляясь на данном этапе в эти процессы, отметим лишь то, что указанные микрообразования вещества будут за счет высокой температуры в плазменном канале ЛМ (порядка $(20-30) \cdot 10^3$ К [9]) подвергаться сверхбыстрым процессам ударной и термической ионизации. Именно эти атомы (молекулы) вещества будут являться основными «поставщиками» дополнительных свободных электронов в канал ЛМ, электронная температура T_e которых будет поддерживать и определять его указанную выше высокую температуру как на стадии протекания в нем импульсной *A*-компоненты тока, так и на стадии протекания в нем длительной *C*-компоненты тока грозового разряда. Принимаем, что движение свободных электронов по плазменному каналу ЛМ определяет перенос электрического заряда как от отрицательно заряженной части грозового облака к земле («молнии отрицательной

полярности»), так и от отрицательно заряженной поверхности земли к положительно заряженной части грозового облака («молнии положительной полярности»). Требуется рассмотреть на основе известных научных положений возможность образования ЧМ путем определенной трансформации в нее ЛМ на стадии протекания в ее плазменном канале длительной *C*-компоненты тока молнии, а также установить основные электрофизические условия в плазменном канале ЛМ и воздушной атмосфере, обеспечивающие такую трансформацию одного вида молнии в другую.

2. Формулировка предлагаемой гипотезы возникновения ЧМ в воздушной атмосфере. Согласно [10] понятие «*гипотеза*» происходит от греческого слова «*hypothesis*», обозначающего «предположение». Применительно к рассматриваемому нами случаю это понятие будет обозначать научное предположение, выдвигаемое для объяснения природного физического явления в виде ЧМ, иногда протекающего в электрически активной воздушной атмосфере. По определению данное предположение требует экспериментальной проверки и теоретического обоснования для того, чтобы стать достоверной научной теорией. Опытная проверка явления ЧМ была осуществлена ранее его многочисленными зарубежными наблюдателями [1, 6]. Согласно опытным данным, приведенным в [5, 6], ЧМ возникает в конце протекания ЛМ. ЧМ по сравнению с ЛМ характеризуется относительно большим временем своего существования [1, 6]. На рис. 2, *a* и *b* показаны основные фазы протекания ЛМ и ЧМ, заснятые наблюдателями этих природных электрофизических явлений и приведенные в [5, 6]. На рис. 3 в укрупненном виде на месте бывшего плазменного канала ЛМ представлены отдельные «светлые» четки ЧМ, разделенные в зоне указанного канала молнии друг от друга «темными» четками ЧМ. Исходя из имеющихся на сегодня неопровержимых экспериментальных данных, полученных при прямых наблюдениях ЧМ в воздушной атмосфере [1, 6], и установленных фундаментальных теоретических и опытных закономерностей волнового продольного распределения дрейфующих электронов в металлических проводниках с импульсным током [11], предлагаемая здесь гипотеза возникновения и развития в воздушной атмосфере ЧМ включает в себя следующие основные положения:

- ЧМ является специфическим видом электрического кратковременного длинного искрового разряда в воздушной атмосфере, возникающим на финальной стадии протекания в воздушной атмосфере ЛМ;
- ЧМ возникает на стадии протекания в плазменном канале ЛМ цилиндрической формы относительно большого диаметра длительной *C*-компоненты тока грозового разряда, характеризующейся непрерывными токами в сотни и десятки ампер при длительности их канального протекания не менее 1 с;
- Зоной возникновения ЧМ является главный плазменный канал ЛМ, а длительность существования ЧМ в воздушной атмосфере Земли определяется длительностью протекания малого непрерывного тока на стадии длительной *C*-компоненты тока молнии;

- Электронный ток проводимости в плазменном цилиндрическом канале ЛМ и в последующем возникающем на его основе видоизмененном плазменном канале ЧМ подчиняется закономерностям квантовой физики и характеризуется в данных каналах соответствующими волновыми периодическими продольными и радиальными распределениями своих дрейфующих свободных электронов вначале в сильноточном канале ЛМ, а затем и в слаботочном канале ЧМ;

- ЧМ появляется в результате электрофизической трансформации возникающих в плазменном канале ЛМ с большим импульсным током A - компоненты волновых электронных пакетов (ВЭП) с малыми и невидимыми наблюдателями ЛМ длинами своих периодически распределенных вдоль канала грозового разряда относительно «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») продольных участков в ВЭП с большими и поэтому визуально видимыми с земли наблюдателями ЧМ длинами своих относительно «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») продольных участков, периодически расположенных вдоль видоизмененного плазменного канала ЧМ.

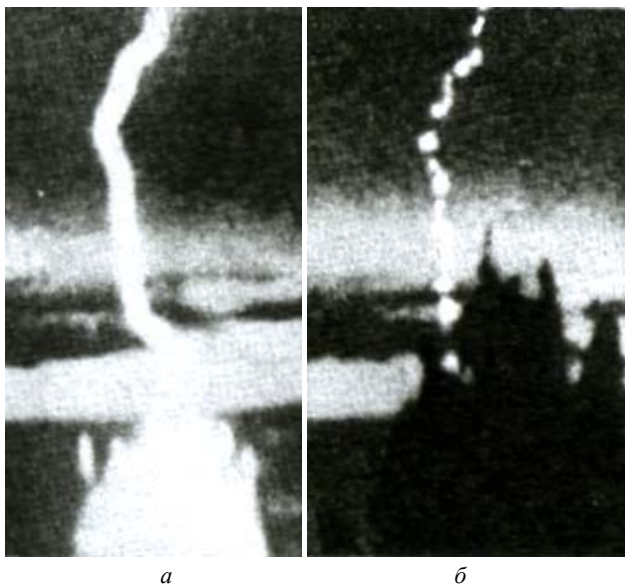


Рис. 2. Основные фазы протекания в зоне одного плазменного криволинейного канала грозового разряда вначале ЛМ (а), а затем и ЧМ (б) в воздушной атмосфере Земли [5, 6]



Рис. 3. Общий вид отдельных «светлых» и «темных» чётков ЧМ, наблюдаемых с земли в воздушной атмосфере [5, 6]

3. Научное обоснование предлагаемой гипотезы возникновения ЧМ в воздушной атмосфере.

Начнем с того, что ВЭП в плазменном канале грозового разряда на его начальной и финальной стадиях протекания по аналогии с ВЭП, введенными и использованными при изучении в [11] периодических волновых продольных и радиальных распределений дрейфующих свободных электронов в кристаллической структуре металлических проводников с постоянным, переменным и импульсным электрическим током, характеризуются относительно «горячими» длиной Δz_{hn} и «холодными» длиной Δz_{cn} квантованными продольными участками. Сумма длин этих участков ($\Delta z_{hn} + \Delta z_{cn}$) образует квантованный шаг продольной периодической структуры ВЭП в плазменном канале молнии. Причем, величина данного шага ($\Delta z_{hn} + \Delta z_{cn}$) будет всегда равна длине квантованной полуволны $\lambda_{en}/2$ де Бройля для дрейфующих в канале молнии свободных электронов. В свою очередь, для величины $\lambda_{en}/2$ в плазменном канале молнии выполняется следующее квантовомеханическое соотношение:

$$\lambda_{en}/2 = l_k / n, \quad (1)$$

где l_k – длина цилиндрического плазменного канала грозового разряда; $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$ – целое квантовое число; $n_m = 2n_k^2$ – максимальное значение квантового числа n [11]; n_k – главное квантовое число для ионизированных атомов вещества [12], присутствующих в плазменном канале грозового разряда в воздушной атмосфере Земли на стадии протекания в нем импульсной A - и длительной C - компонент тока молнии.

Из (1) видно, что минимальное значение длины дебройлевской электронной полуволны $\lambda_{en}/2$ в плазменном канале молнии будет соответствовать максимальному значению квантового числа $n = n_m$. При оценочных расчетах минимальной усредненной длины $\lambda_e/2$ дебройлевской полуволны для дрейфующих свободных электронов в плазменном канале грозового разряда может быть использовано следующее классическое квантовомеханическое соотношение [12]:

$$\lambda_e/2 = h / 2(m_e v_D), \quad (2)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона; $v_D = \delta_m / (e_0 n_{e0})$ – максимальное значение средней скорости дрейфа свободных электронов в плазменном канале молнии, формирующимся при электрическом пробое длинного воздушного промежутка в разрядной системе «заряженное облако – земля»; $\delta_m \approx 4I_{mL} / (\pi d_k^2)$ – максимальное значение плотности тока в плазменном канале молнии диаметром d_k ; $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль электрического заряда электрона; n_{e0} – усредненное значение плотности дрейфующих свободных электронов в плазменном канале молнии.

3.1. Оценка минимальных длин «горячих» Δz_{hL} и «холодных» Δz_{cL} продольных участков ВЭП для ЛМ. Согласно расчетным и экспериментальным данным, приведенным в [11, 13], «горячие» продольные участки ВЭП в круглом металлическом проводнике с импульсным током большой плотности по сравнению с его «холодными» продольными участками существенно отличаются уровнем электронной

температуры T_e (примерно в 3,5 раза). Вызвана эта особенность повышенной по сравнению с усредненной первоначальной (до протекания тока) в цилиндрическом объеме проводника концентрацией дрейфующих свободных электронов на «горячих» продольных участках ВЭП, середины которых соответствуют амплитудам распространяющихся вдоль проводника электронных полуволн де Бройля. При этом на «холодных» продольных участках проводника из-за волнового характера распределения по его цилиндрическому объему дрейфующих свободных электронов имеет место пониженная объемная плотность рассматриваемых микронесителей заряда. В результате такого волнового продольного периодического распределения дрейфующих свободных электронов в проводнике формируется неоднородное продольное периодическое температурное поле. Кроме того, согласно [14] при экспериментальном исследовании явления электрического взрыва (ЭВ) в воздухе тонких круглых медных проволочек (длина – 60 мм; диаметр – 100 мкм) путем пропускания по ним от высоковольтного генератора импульсных токов (ГИТ) синусоидального затухающего по экспоненте разрядного тока большой плотности ($\delta_m \approx 6,4 \cdot 10^{12}$ А/м²) в диспергированных продуктах взрывообразного разрушения твердой меди (фактически в «металлической» плазме) методом скоростного фоторегистрирования были зафиксированы продольные периодические страты, состоящие из слоистой продольной периодической дискообразной структуры различной светимости, содержащей чередующиеся между собой «светлые» шириной Δz_h и «темные» шириной Δz_c продольные участки. Данные участки попарно образовывали в сильноточном разрядном воздушном промежутке ГИТ с «металлической» плазмой шаг периодической структуры ВЭП длиной около $(\Delta z_h + \Delta z_c) \approx 1,76$ мм. Очевидно, что в случае указанного ЭВ тонких медных проволочек «светлые» продольные участки его «металлической» плазмы в разрядном воздушном промежутке соответствовали «горячим» участкам ВЭП, а его «темные» продольные участки – «холодным» участкам ВЭП. В этой связи достаточно обоснованно можно говорить о том, что «горячие» продольные участки минимальной длиной Δz_{hL} в плазменном канале молнии, возникающем в сверхвысоковольтном разрядном воздушном промежутке системы «заряженное облако – земля», будут соответствовать его «светлым» продольным участкам, а «холодные» продольные участки минимальной длиной Δz_{cL} в плазменном канале молнии – его «темным» продольным участкам. На рис. 4 в схематическом виде качественно изображены «горячие» («светлые») и «холодные» («темные») периодические продольные участки ВЭП плазменного канала молнии, возникающего в воздушной атмосфере Земли.

Минимальная длина Δz_{hL} «горячего» («светлого») продольного участка ВЭП в плазменном канале ЛМ, образовавшемся в сверхвысоковольтном разрядном воздушном промежутке системы «заряженное облако – земля», на основании квантовомеханического соотношения неопределенности Гейзенберга [12] применительно к дрейфующим в нем (этом канале) свободным электронам может быть приближенно определена из следующего аналитического выражения [13]:

$$\Delta z_{hL} \approx e_0 n_{e0} h (m_e \delta_m)^{-1} / [8 + (\pi - 2)^2]. \quad (3)$$

Для численной оценки по (3) значений Δz_{hL} примем, что сильноточный плазменный канал ЛМ на стадии протекания в нем импульсной A -компоненты тока молнии имеет следующие исходные геометрические и электрофизические параметры [1, 8, 12]: $d_k \approx 1$ м; $n_{e0} \approx 10^{25}$ м⁻³; $I_{mL} \approx 100$ кА; $\delta_m \approx 1,27 \cdot 10^5$ А/м². Тогда из (3) следует, что $\Delta z_{hL} \approx 1$ мм. С учетом (2) минимальная усредненная длина $\lambda_e/2$ электронной полуволны де Бройля для рассматриваемого нами случая окажется примерно равной $\lambda_e/2 \approx 0,5 e_0 n_{e0} h (m_e \delta_m)^{-1} \approx 4,6$ мм. В результате минимальная длина Δz_{cL} «холодного» («темного») продольного участка ВЭП в плазменном канале ЛМ на указанной стадии развития ее плазменного канала будет принимать численное значение, равное около $\Delta z_{cL} \approx \lambda_e/2 - \Delta z_{hL} \approx 3,6$ мм. Видно, что величины Δz_{hL} и Δz_{cL} для «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») периодических продольных участков ВЭП практически на три порядка меньше диаметра d_k плазменного канала грозового разряда на стадии формирования и протекания в нем ЛМ. Визуально зафиксировать наблюдателю с земли такие участки ВЭП для ЛМ практически не представляется возможным.

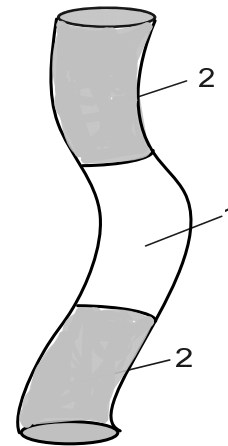


Рис. 4. Схематическое безмасштабное изображение «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») продольных участков периодической структуры ВЭП в плазменном криволинейном канале грозового разряда, развивающемся в воздушной атмосфере Земли (1 – «светлый» («горячий») участок цилиндрического канала молнии; 2 – «темный» («холодный») участок цилиндрического канала молнии)

3.2. Оценка минимальных длин «горячих» Δz_{hL} и «холодных» Δz_{cL} продольных участков ВЭП для ЧМ. Для этого принимаем, что на стадии протекания в плазменном канале грозового разряда длительной C -компоненты тока молнии принятый диаметр $d_k \approx 1$ м данного канала из-за инерционности тепловых процессов в нем и за прошедшее время порядка 0,5 мс не успел измениться и остался таким же как и на предыдущей стадии протекания по нему импульсной A -компоненты тока молнии. Кроме того, считаем, что усредненная концентрация (объемная плотность) n_{e0} свободных электронов в случае протекания по плазменному каналу молнии длительной C -компоненты тока грозового разряда осталась также прежней и примерно равной $n_{e0} \approx 10^{25}$ м⁻³. Пусть в данном случае непрерывный длительный ток молнии характе-

ризуется следующими параметрами [7, 8]: $I_{mL} \approx 100$ А; $\delta_m \approx 1,27 \cdot 10^2$ А/м². Подставив эти исходные данные в (3) получаем, что в рассматриваемом случае минимальная длина Δz_{hL} «горячего» («светлого») продольного участка ВЭП в канале молнии будет численно составлять уже около $\Delta z_{hL} \approx 1$ м. Из расчетного соотношения $\lambda_e/2 \approx 0,5e_0 n_e h(m_e \delta_m)^{-1}$ находим, что на стадии протекания в принятом плазменном канале грозового разряда длительной *C*-компоненты тока молнии минимальная усредненная длина $\lambda_e/2$ дебройлевской электронной полуволны численно составит примерно 4,6 м. Тогда минимальная длина Δz_{cL} «холодного» («темного») продольного участка ВЭП в плазменном канале молнии на финальной стадии ее протекания будет принимать численное значение, равное около $\Delta z_{cL} \approx \lambda_e/2 - \Delta z_{hL} \approx 3,6$ м. Полученные количественные результаты для продольных ВЭП в плазменном канале грозового разряда на стадии протекания по нему длительной *C*-компоненты тока молнии неопровержимо указывают на то, что исследуемый цилиндрический канал молнии может разбиваться на сравнительно большие и поэтому визуально обнаруживаемые с поверхности земли наблюдателями «светлые» и «темные» продольные участки (отдельные чётки), периодически расположенные вдоль пути протекания в воздушной атмосфере описываемого мощного длинного искрового разряда. Поэтому согласно приведенным здесь приближенным расчетным результатам ЧМ «рождается» из ЛМ, протекающей в сверхвысоковольтном длинном разрядном воздушном промежутке двухэлектродной системы «заряженное облако – земля» на заключительной стадии своего существования.

3.3. Оценка возможного числа «горячих» Δz_{hL} и «холодных» Δz_{cL} продольных участков ВЭП для ЧМ. Число n_L отдельных чётков, каждая из которых содержит один «горячий» («светлый») и один «холодный» («темный») продольный участок периодически распределенных ВЭП в плазменном канале грозового разряда, в ЧМ с учетом (1) формально может быть оценено по следующей приближенной формуле:

$$n_L \approx 2l_k / \lambda_e. \quad (4)$$

При $l_k \approx 460$ м и $\lambda_e/2 \approx 4,6$ м из (4) получаем, что $n_L \approx 100$. Полученный нами в первом приближении количественный результат для числа n_L чётков в ЧМ вступает в противоречие с численным показателем максимального значения квантового числа n_m из (1), определяемого главным квантовым числом n_k для ионизированных атомов вещества, оказавшихся в зоне протекания цилиндрического канала ЛМ и затем ЧМ. По-видимому, согласно данным, приведенным выше в постановочном разделе 1 и в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева [12], квантовое число $n_m \geq n_L$ применительно к плазменному каналу грозового разряда в воздушной атмосфере при $n_k \approx 6$ не должно превышать $2n_k^2 \approx 72$. Отсюда вытекают определенные ограничения на численные значения возможной длины l_k цилиндрического плазменного канала грозового разряда для случая возникновения в нем ЧМ, минимальной длины $\lambda_e/2$ электронных полуволн де Бройля, распространяющихся в данном канале, и числа n_L отдельных чётков в плазменном канале ЧМ.

3.4. Оценка температуры «горячих» Δz_{hL} продольных участков ВЭП в плазменном канале ЧМ. Считаем, что данная температура из-за первоначальной неизотермичности электронного и ионного газов в длинном сильноточном разрядном канале ЛМ будет определяться электронной температурой T_e плазменного канала грозового разряда на стадии протекания в нем импульсной *A*-компоненты тока молнии. Учитывая скоротечность этой стадии развития молнии (порядка 0,5 мс), практическое отсутствие на ней радиальной теплоотдачи от канала молнии в окружающее ЛМ воздушное пространство и сравнительно большую инерционность тепловых процессов, для оценки электронной температуры T_e «горячих» («светлых») продольных участков ВЭП длиной Δz_{hL} в плазменном канале ЧМ с учетом результатов приближенного расчета теплового состояния ионизированного квазинейтрального газа в воздушных промежутках высоковольтных искровых разрядников, приведенных в [11], можно воспользоваться следующим соотношением:

$$T_e \approx 5,83 [I_{mL}^{1/3} / (\sigma_c t_m)]^{1/4}, \quad (5)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·(м²·К⁴)⁻¹ – постоянная Стефана-Больцмана [12]; t_m – время (в секундах), соответствующее амплитуде I_{mL} (в амперах) тока молнии на электрофизической стадии протекания в ее длинном воздушном искровом промежутке импульсной *A*-компоненты тока мощного грозового разряда.

Приняв, что на начальной стадии развития ЛМ $I_{mL} \approx 100$ кА, а $t_m \approx 10$ мкс [4], из (5) для электронной температуры T_e «горячих» («светлых») чётков ЧМ в первом приближении находим, что она в рассматриваемом случае составляет около $31 \cdot 10^3$ К. Такой расчетный уровень термодинамической температуры в плазменных каналах ЛМ и ЧМ соответствует известным температурам в искровых каналах сильноточных электрических разрядов в газовых средах [8, 9, 11].

3.5. Оценка длительности существования ЧМ в воздушной атмосфере. Длительность t_L существования ЧМ после финальной стадии протекания ЛМ может быть оценена по следующему соотношению:

$$t_L \approx q_L / I_{mL}, \quad (6)$$

где q_L – электрический заряд, протекающий на стадии непрерывной длительной *C*-компоненты тока грозового разряда с его усредненной величиной I_{mL} через видоизмененный из-за трансформированных продольных участков ВЭП плазменный канал ЛМ.

При $q_L \approx 200$ Кл [7, 8] и принятой нами величине непрерывного тока $I_{mL} \approx 100$ А на указанной токовой стадии формирования ЧМ численное значение длительности t_L протекания этого вида молнии будет составлять по (6) около 2 с. Данное значение t_L оказывается существенно больше длительности протекания ЛМ, включающей длительность ее начальной стадии с большим импульсным током *A*-компоненты тока грозового разряда и ее финальной стадии на начале протекания длительной *C*-компоненты тока молнии.

3.6. Оценка геометрической формы «горячих» и «холодных» продольных участков ВЭП для ЧМ. Геометрическая форма отдельных чётков ЧМ (ее «светлых» и «темных» продольных участков) должна повторять локальную цилиндрическую конфигура-

цию первоначального криволинейного в целом длинного плазменного канала ЛМ. Краевые зоны «светлых» и «темных» продольных участков ВЭП в канале ЧМ вероятно должны содержать эллипсоидальные поверхности (см. рис. 3), обусловленные не скачкообразным изменением в этих зонах объемной плотности n_{e0} дрейфующих свободных электронов, а ее плавным изменением по одному из основных универсальных физических законов нашей природы – экспоненциальному закону [15]. Из-за возможной продольной неоднородности распределения основных носителей электричества (свободных электронов) в плазменном канале ЧМ геометрические размеры (длины и диаметры) его отдельных чётков («светлых» и «темных» продольных участков периодически изменяющихся ВЭП) могут отличаться друг от друга, а сами чётки приобретать деформированный и неканонический вид.

4. Формулировка электрофизических условий появления ЧМ в воздушной атмосфере. Приведем ниже основные электрофизические условия, при которых, по мнению автора, возможна трансформация ЛМ в ЧМ, протекающую в воздушной атмосфере:

- Диаметр d_k цилиндрического канала грозового разряда в длинном воздушном разрядном промежутке сверхвысоковольтной двухэлектродной системы «заряженное облако – земля», величины большого тока на стадии протекания в этом канале импульсной A -компоненты тока молнии и непрерывного слабого тока на стадии протекания по нему длительной C -компоненты тока молнии, а также усредненная объемная плотность n_{e0} дрейфующих свободных электронов в канале грозового разряда должны способствовать формированию в нем (канале молнии) таких периодических ВЭП, продольные «горячие» («светлые») и «холодные» («темные») участки которых изменяются в диапазоне соответственно от тысячных долей метра для ЛМ до единиц и десятков метров для ЧМ;

- Длина l_k цилиндрического плазменного канала грозового разряда в длинном воздушном разрядном промежутке сверхвысоковольтной двухэлектродной системы «заряженное облако – земля» и минимальная усредненная длина дебройлевских электронных полуволн $\lambda_e/2$ в плазменном канале молнии должны удовлетворять квантовомеханическому соотношению (1);

- В длинном воздушном разрядном промежутке сверхвысоковольтной двухэлектродной системы «заряженное облако – земля» и соответственно в цилиндрическом плазменном канале грозового разряда должны главным образом присутствовать такие ионизированные атомы вещества, образовавшиеся с их электронных подболочек и поступающие в плазменный канал молнии свободные электроны будут способствовать выполнению соотношений (1) и $n_{iL} \leq n_m$.

На взгляд автора, невыполнение указанных выше условий во многих случаях протекания в воздушной атмосфере такого наиболее изученного вида молнии как ЛМ и не вызывает появления ЧМ вслед за ЛМ.

Выводы.

1. Предложена новая гипотеза возникновения такого малоисследованного природного атмосферного явления как ЧМ и дано в первом приближении ее на-

учное обоснование, построенное на фундаментальных закономерностях квантовой физики.

2. Показано, что ЧМ может возникать в плазменном канале ЛМ на стадии протекания по нему в течение не менее 1000 мс непрерывной длительной C -компоненты тока грозового разряда с его величинами на ее спаде («хвосте») в сотни и десятки ампер.

3. В основе электрофизического механизма образования ЧМ из ЛМ может лежать трансформация в плазменном канале молнии периодических ВЭП и их коротких (длиной до единиц миллиметров) «горячих» («светлых») и «холодных» («темных») продольных участков на стадии протекания в нем импульсной A -компоненты тока грозового разряда в ВЭП с их длинными (длиной до десятков метров) «горячими» («светлыми») и «холодными» («темными») продольными участками на финальной стадии развития грозового разряда с протеканием в его плазменном канале непрерывной длительной C -компоненты тока молнии.

4. Сформулированы основные электрофизические условия, при выполнении которых возможно формирование в электрически активной воздушной атмосфере Земли ЧМ, возникающей в видоизмененном за счет указанной трансформации продольных периодических ВЭП плазменном канале ЛМ на ее заключительной стадии развития после протекания импульсной A -компоненты тока грозового разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юман М.А. Молния. – М.: Мир, 1972. – 327 с.
2. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 223 с.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с.
4. Кузнецкин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
5. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. – Х.: НТМТ, 2010. – 292 с.
6. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. – М.: Мир, 1983. – 288 с.
7. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85. doi: 10.1134/s0020441208030123.
8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Точка, 2010. – 407 с.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
10. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
11. 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.
12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
13. Баранов М.И. Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током // Электричество. – 2014. – №4. – С. 34-42.
14. Соболев Н.Н. Исследование электрического взрыва тонких провололок // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1947. – Том 17. – №11. – С. 986-997.

15. Баранов М.И. Феномен экспоненциального закона распределения физического поля в природе и учебный процесс // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2004. – №3. – С. 111-115.

REFERENCES

1. Yuman M.A. *Molniya* [Lightning]. Moscow, Mir Publ., 1972. 327 p. (Rus).
2. Bazelyan E.M., Horin B.N., Levitov V.I. *Fizicheskiye i inzhenernyye osnovy molniezashchity* [Physical and engineering bases lightning protection]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 223 p. (Rus).
3. Bazelyan E.M., Raiser Yu.P. *Fizyka molnii i molnyezashchita* [The physics of lightning and lightning protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 319 p. (Rus).
4. Kuzhikin I.P., Larionov V.P., Prokhorov E.N. *Molniya i molnyezashchita* [Lightning and lightning protection]. Moscow, Znack Publ., 2003. 330 p. (Rus).
5. Kravchenko V.I. *Molniya. Elektromagnitny faktory i porazhayushchie vozdeystviya na tekhnicheskie sredstva* [Lightning. Electromagnetic factors and their impact on the striking technical objects]. Kharkov, NTMT Publ., 2010. 292 p. (Rus).
6. Barry J. *Sharovaya molniya y chetochnaya molniya* [Ball lightning and rosary lightning]. Moscow, Mir Publ., 1983. 288 p. (Rus).
7. 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. *Pribory i tehnika eksperimenta – Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
8. Baranov M.I. *Izbrannye 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, NTU «KhPI» Publ., 2010. 407 p. (Rus).
9. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).
10. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
11. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektov 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).
12. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
13. Baranov M.I. Features heating thin bimetallic conductor large pulse current. *Elektrichestvo – Electricity*, 2014, no.4, pp. 34-42. (Rus).
14. Sobolev N.N. The study of electrical explosion of thin wires. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki – Journal of experimental and theoretical physics*, 1947, Vol.17, no.11, pp. 986-997. (Rus).

15. Baranov M.I. Phenomenon of physical fields distributing on the exponential law in nature and educational process. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2004, no.3, pp. 111-115. (Rus).

Поступила (received) 05.10.2015

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

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

A new hypothesis and physical bases of origin of rosary lightning in the atmosphere of Earth.

Purpose. Development and scientific ground of new hypothesis of origin of rosary lightning (RL) is in the air atmosphere of Earth. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high (ever-higher) impulsive voltage and large (weak) impulsive currents, and also theoretical bases of quantum physics. **Results.** The substantive provisions of new hypothesis of origin are formulated RL. Taking into account these positions bases of close electrophysics theory of origin are developed in an air atmosphere RL. Basic electrophysics terms, resulting in the transition of linear lightning (LL) in RL, are indicated. **Originality.** First on the basis of conformities to the law of quantum physics the new electrophysics mechanism of education is offered RL from LL. It is set that this mechanism the wave longitudinal distributing of drifting lone electrons is underlaid in the plasma cylindrical channel of a long spark storm digit in an air atmosphere, resulting in forming in him of «light» («hot») and «dark» («cold») longitudinal areas of periodic electronic wavepackages (EWP). It is shown that for LL information the areas of EWP periodically up-diffused along the channel of lightning are characterized the small and unnoticeable for observers lengths, and for RL – by large lengths and by sight noticeable for observers from earth. **Practical value.** Deepening of scientific knowledges about physics of such global atmospheric phenomenon as lightning. Expansion of scientific presentations of humanity about circumferential tellurians nature and difficult natural physical processes, flowings in it. References 15, figures 4.

Key words: linear lightning, rosary lightning, physical bases, plasma channel of a storm discharge, drifting lone electrons, electronic wavepackages, «hot» («light») and «cold» («dark») longitudinal areas of electronic wavepackages of channel of a storm discharge.

Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, O.S. Sabokar

ESTIMATING THE LIMIT POSSIBILITIES OF THE STEP CHARGING SYSTEM FOR CAPACITIVE ENERGY STORAGE

The aim of the article is to estimate the limit possibilities of step-by-step charging the capacitive energy storage which are caused by the achievement of a balance among the processes of the receiving and losing of electromagnetic energy. Originality. For the first time a step the charging system as a high power converter for pulsed load was considered, that allow to simplify similar charging systems and make its chipper while saving output characteristics and common quality. Methodology of the analysis applied is based on the classic electric circuits theory. All of the resulted carried out, were obtained as the differential equation solutions and its behavior was analyses analytically. Results. The basic diagram of the step-by-step charging system what is an alternative to the traditional variant with the step-up transformer was described. This system realizes the serial charge voltage increasing by the separate portions of energy, which has been, accumulated preliminary in the inductive energy storage. The formulas for estimating the limit possibilities of the step-by-step charging were got. These limits are caused by achieving a balance of the entering and losing electromagnetic energy. The applicability of the formulas was illustrated by numerical examples. Practical value. According to the results that were obtained, it is possible to note, that the step charging system is acceptable to be used as a high power converter for capacitive storage charging. References 5, figures 1.

Key words: capacitive energy storage, step-charged system, analytical analysis, electrical circuits, inductive energy storage.

Описана принципиальная схема ступенчатого заряда емкости, альтернативной традиционному варианту с повышающим трансформатором и предполагающей последовательное повышение зарядного напряжения за счёт подачи отдельных порций энергии, предварительно запасённой в обмотке специального индуктивного накопителя. Получены формулы для оценки предельных возможностей ступенчатого заряда, обусловленных достижением баланса в процессах поступления и потерь электромагнитной энергии. Применимость формул проиллюстрирована численными примерами. Библ. 5, рис. 1.

Ключевые слова: емкостной накопитель энергии, система ступенчатого заряда, аналитический анализ, электрические цепи, индуктивный накопитель энергии.

Introduction, analysis of publications. The traditional scheme of the capacitor storage charge comprises two main components: a voltage step-up transformer and rectifier (Fig. 1,*a*). Not stopping on description of the efficiency and highly successful examples of the long exploitation of the different electrical engineering devices, it should note this scheme is not without shortcomings. Among the most significant shortcomings, the real performance cumbersome is the main (including weight and overall dimensions, electronic components, etc.) and its relatively high cost [1, 2].

So-called step-by-step charging systems for capacitor banks are devoid of these shortcomings. The effectiveness of this charge is based on the «portioned» pumping of the capacitive electromagnetic energy by the voltage pulses the amplitude of which increases in time [3, 4].

However, how it follows from a priori phenomenological considerations the practical possibilities of scheme with the immediate implementation of the step-by-step charging are quite limited.

According to the physical point of view the above mentioned limitations are caused by the fact when the next charging voltage pulse comes to the capacitance input a discharge is occurring simultaneously. Upon the reaching of a balance between the incoming electromagnetic energy level and the level of its loss the charging process must stop, and the amplitude of the voltage on the capacitance (as well as the stored energy!) should be remained unchanged.

The aim of the article is estimating the limit possibilities of step-by-step charging the capacitive energy storage which are caused by the achievement of a balance

among the processes of the receiving and losing of electromagnetic energy.

The calculated relationships, the numerical estimates. At the beginning a brief description of the step-by-step charging scheme for the capacitor energy storage which was adopted as a calculation model and was shown at the Fig. 1,*b* will be given.

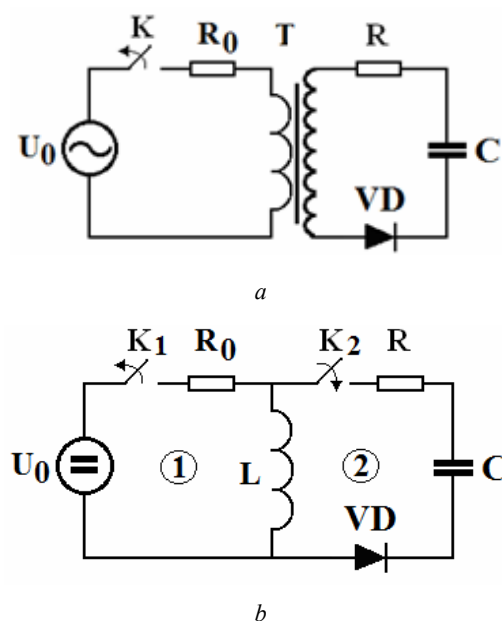


Fig. 1. The schematics charging of the capacitive energy storage: *a* – it is the traditional variant with the step-up charging transformer *T*; *b* – it is a variant without a step-up charging transformer

This scheme consists of 2 major blocks: 1 – inductance L (a block of energy charging) which could be presented by DC or rectified voltage source with an amplitude U_0 and 2 – a block which transforms a pre-stored magnetic energy into electrical energy capacitor storage C (R_0 and R – are current-limiting resistors).

Initially, the switch K_1 is closed, K_2 – open. Through the resistor R_0 the signal from the voltage source U_0 enters in the loop circuit 1 and charges the inductive storage L .

Upon reaching the maximum accumulated magnetic energy the key K_1 is being opened and the key K_2 is being closed. The transformation of inductance energy L into capacitive energy C is occurring. The capacitor is being charged up to some voltage level that is equal to the sum of the initial value and of some increment.

At the end of the charge switch K_2 is opened and the switch K_1 is closed. The circuit takes up the initial state and the above described process is being repeated.

In solving the problem according to the formulated aim the mathematical apparatus of the electrical circuit theory was used [5].

Leaving out the details of integrating the differential equation which describes the transition process in the circuit blocks 1 and the necessary mathematical transformations the final expression for the current in the inductor can be wrote.

$$J(t) = \frac{U_0}{R_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right), \quad (1)$$

where $\tau_0 = L/R_0$ – is the time constant of the « $R_0 - L$ » circuit.

After time to $t \geq 3 \cdot \tau_0$ in accordance with (1) $J(t) \rightarrow J_m = U_0 / R_0$. It means the current and the electromagnetic energy are achieving their maximum.

Further, in accordance with the description of the processes in the step-by-step charging scheme in Fig. 1 the charge of the capacitor storage C is occurring.

Similarly to the above the details integrating of the equation of the transition process in the circuit 2 (for open K_1 and closed K_2) were omitted, and the final expression for the voltage on the capacitance $U_C(t)$ was written.

$$U_C(t) = e^{-\delta t} \left[\left(\left(\frac{J_m}{\omega C} \right) + \frac{\delta}{\omega} \cdot U_{C0} \right) \cdot \sin(\omega t) + U_{C0} \cdot \cos(\omega t) \right], \quad (2)$$

where $\delta = R / 2L$ – is the damping rate; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ – is the oscillation frequency; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

– is the own circuit frequency; U_{C0} – is the initial capacitance voltage; $J_m = U_0 / R_0$ – is the inductor current at the moment of commutation.

The maximum increment of voltage in the arbitrary cycle relatively to the initial value takes place after time equaled to a quarter of the oscillation period – $\omega t = \pi/2$

$$\begin{aligned} \Delta U_C(t) &= U_C \left(t = \frac{\pi}{2\omega} \right) - U_{C0} = \\ &= e^{-\delta_0 \cdot \frac{\pi}{2}} \left[\left(\left(\frac{J_m}{\omega C} \right) + \delta_0 \cdot U_{C0} \right) - U_{C0} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

where $\delta_0 = \delta / \omega$ – is the relative damping rate.

Charging time what is equaled to the quarter of the period is conditioned by the diode presence in the circuit 2.

Accepting the idealization when $\delta_0 \rightarrow 0$ which relates to the maximum possible values of the output parameters of the charge with the lowest possible energy dissipation in the active resistance of the circuit according to the dependence (3) we get

$$\lim_{\delta_0 \rightarrow 0} \Delta U_C \left(t = \frac{\pi}{2\omega} \right) \approx U_0 \cdot \left(\frac{Z}{R_0} \right) - U_{C0}, \quad (4)$$

where $N = \frac{U_{C0}}{U_0} \approx \frac{Z}{R_0} = \frac{1}{R_0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ is the circuit wave resistance.

It is clear the condition of the balance in the process of income and loss of electromagnetic energy is equaled to zero growth in the next charging cycle, that is

$$\lim_{\delta_0 \rightarrow 0} \Delta U_C \left(t = \frac{\pi}{2\omega} \right) \rightarrow 0.$$

If to take into account that the initial value of the voltage on the capacitance in the same charging cycle is the result of accumulation process starting with the voltage of the external source U_0 during the previous cycles it is possible to write $U_{C0} = NU_0$.

According to the remarks above, with help of the relation (4), we find that

$$N = \frac{U_{C0}}{U_0} \approx \frac{Z}{R_0} = \frac{1}{R_0} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5)$$

The dependence (5) is the solution of the formulated aim. It fixes the limiting number of the possible cycles of the capacitor storage charge to achieve the maximum voltage value, which is the highest for the given parameters of the system.

Numerical estimates.

Let us, it is necessary to charge the capacitive energy storage $C = 1200 \mu\text{F}$ of the magnetic pulse plant up to $U_{C0} = 2.2 \text{ kV}$ by the AC source $U_0 = 220 \text{ V}$. An active circuit resistance of the branch with the magnetic energy inductive storage is $R_0 = 0.1 \text{ Ohm}$. [1].

It is necessary to find the next data:

- the required quantity of charging cycles N ;
- the value of inductance that ensures the implementation of the step-by-step charging process L ;
- the maximum charge current of the inductive storage J_m ;
- time of achievement of the maximum inductor current t_L .

From (5) we find the required number of charge cycles:

$$N = \frac{U_{C0}}{U_0} = \frac{2200}{220} = 10. \quad (6)$$

The value of inductance that ensures the implementation of the step-by-step charging process is also determined by (5)

$$L = (N \cdot R_0)^2 \cdot C = (10 \cdot 0.1)^2 \cdot 1200 \cdot 10^{-6} = 0.0012 \text{ H}. \quad (7)$$

The maximum charging current of the inductive storage is based on (1),

$$J_m = \frac{U_0}{R_0} = \frac{220}{0.1} = 2.2 \text{ kA.} \quad (8)$$

The necessary time term to reach the maximum current at the inductive storage could be find as (formula (1))

$$t \geq 3 \cdot \frac{L}{R_0} = 3 \cdot \frac{0.0012}{0.1} = 0.036 \text{ s.} \quad (9)$$

Thus, the charge up of capacity $C = 1200 \mu\text{F}$ up to 2.2 kV with mains voltage equaled to $\sim 220 \text{ V}$ can be carried out during 10 cycles of the step-by-step charge, with a maximum charging current in the inductance circuit $\sim 2.2 \text{ kA}$. The necessary voltage level could be achieved in $\sim 0.036 \text{ s}$.

Conclusions.

1. The work and benefits of the capacitance step-by-step charging system which is a successful alternative to the traditional scheme with step-up transformer and based on the portioned energy charge was described.

2. The estimation of limit possibilities of the step-by-step charging for the capacitive energy storage which are caused by achievement of balance among the processes of receiving and losing the electromagnetic energy was fulfilled.

3. The simple calculated ratios were received. Their applicability was illustrated by some numerical examples.

REFERENCES

1. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Khimenko L.T. *Impul'snyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 1. Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye*. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.1. 2nd edition, revised and enlarged.] Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 284 p. (Rus).
2. Orlov B.D., Dmitriyev Yu.V., Chakalev A.A., Sidyakin V.A., Marchenko A.L. *Tekhnologiya i oborudovaniye kontaktnoy svarki* [Technology and equipment for the contact welding]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1975. 536 p. (Rus).
3. John D. Lenk. *Simplified Design of Switching Power Supplies*. Elsevier Publishing House, 1996. 235 p. Electronic ISBN: 9780080517209.
4. Marasco K. How to Apply DC-to-DC Step-Up (Boost) Regulators. *Analog Devices. AN-1132 Application Note: 2011*. Available at: <http://www.analog.com/media/ru/technical-documentation/application-notes/AN-1132.pdf> (accessed 22 May 2012).
5. Atabekov G.I. *Osnovy teorii tsepei* [The base of the circuits theory]. Moscow. Energy Publ., 1969. 427 p. (Rus).

Yu.V. Batygin¹, Doctor of Technical Science, Professor,
E.A. Chaplygin¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor,
O.S. Sabokar¹,
¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.
phone +38 057 7073727, e-mail: batygin48@mail.ru, chaplygin.e.a@gmail.com, o.s.sabokar@gmail.com

А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ КООКСИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

Виконано вимірювання в діапазоні частот 50 кГц – 20 МГц тангенсу кута діелектричних втрат зразків силового та радіочастотного коаксіального кабелів в початковому стані та після зволоження в умовах 100% вологості. Після старіння встановлено появу додаткових релаксаційних максимумів для суцільної термоактивної та термопластичної поліетиленової ізоляції, що обумовлена групуванням вільної води в кластери відповідної форми та фрактальної розмірності. Для кабелів зі спіненою термопластичною ізоляцією в початковому незістареному стані притаманно прояв релаксаційних втрат за рахунок наявності води, розташованої в повітряних включеннях. Встановлено додатний кореляційний зв'язок між шириною смуги релаксаційних максимумів та швидкістю зменшення опору ізоляції від прикладеної високої постійної напруги. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: водні тринги, зволоження кабелів, суцільна та спінена поліетиленова ізоляція, тангенс кута діелектричних втрат, кластери води, релаксаційні максимуми.

Выполнены измерения в диапазоне частот 50 кГц – 20 МГц тангенса угла диэлектрических потерь образцов силового и радиочастотного коаксиального кабелей в исходном состоянии и после увлажнения в условиях 100% влажности. После старения установлено появление дополнительных релаксационных максимумов для сплошной термоактивной и термопластичной полиэтиленовой изоляции, что обусловлено группированием свободной воды в кластеры соответствующей формы и фрактальной размерности. Для кабелей со вспененной термопластичной полиэтиленовой изоляцией в не состаренном состоянии присуще проявление релаксационных потерь за счет наличия воды в газообразных включениях. Установлена положительная корреляция между шириной полосы релаксационных максимумов и скоростью уменьшения сопротивления изоляции от приложенного высокого постоянного напряжения. Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: водные тринги, увлажнение кабелей, сплошная и вспененная полиэтиленовая изоляция, тангенс угла диэлектрических потерь, кластеры воды, релаксационные максимумы.

Введение. Наличие свободной влаги в силовых кабелях приводит к образованию древовидных структур, – водных трингов (рис. 1) [1-7], которые зарождаются в аморфной фазе полиэтилена, т.е. по границам зерен-кристаллитов (рис. 2), и являются одной из главных причин деструкции полимерной изоляции. Водные тринги – повреждения полимера размером от нескольких микрон (рис. 1, 2) до 1 мм, развивающиеся на технологических дефектах изоляции при совместном действии электрического поля и влаги, диффундирующей из окружающей среды. Вместе с влагой в изоляцию проникают агрессивные вещества. Они разрушают полимерные цепи, приводя к образованию микрополостей, заполненных влагой.



Рис. 1. Фотография зарождающихся водных трингов в сшитой полиэтиленовой изоляции силового кабеля, полученная с помощью силового электронного микроскопа [4]

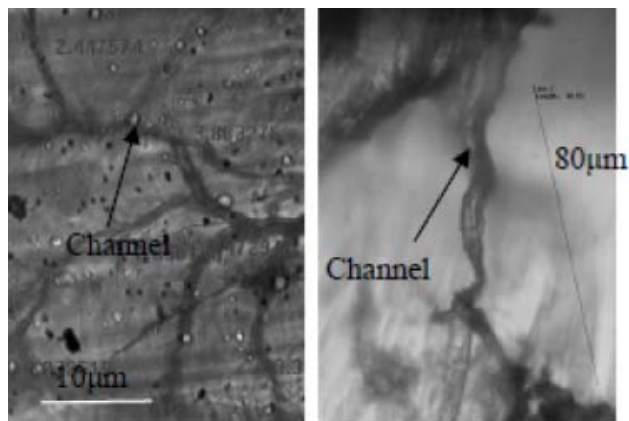


Рис. 2 [6]

Электрическая прочность изоляции в области трингов существенно снижается, что повышает напряженность на неповрежденной части изоляции и ускоряет процесс роста тринга [5]. Старение в условиях эксплуатации или испытаний при повышенной температуре (90 °С) выражено гораздо слабее, чем при низких температурах (20 – 40 °С): водные тринги растут менее интенсивно. Динамика развития водных трингов и их тонкие свойства в значительной мере зависят от состава, морфологии полимерной изоляции, химической природы дефектов, на которых они зарождаются.

Постановка проблемы. Водные тринги количественно могут быть описаны в рамках концепции фрактальной размерности, т.е. величины, характеризующей геометрическое строение стохастических объектов [8, 9]. Современные представления в этой

области связаны с тем, что большинство стохастических природных структур обладают так называемой скейлинговой симметрией (масштабной инвариантностью): выглядят одинаково при различных увеличениях (рис. 3). С помощью алгоритма построения стохастических фракталов с использованием системы итерированных функций возможно моделирование сложной фрактальной структуры водных триингов в полимерной изоляции кабелей.

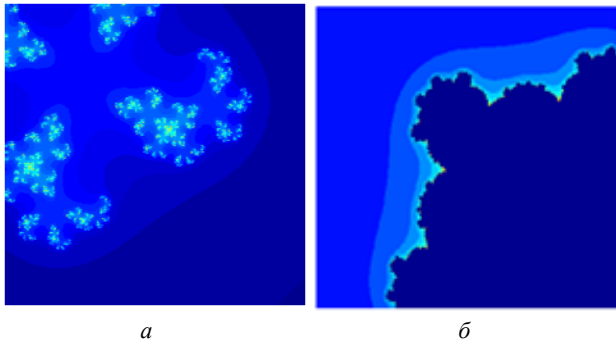


Рис. 3. Результаты построения классических фракталов Жюлиа (а) и Мальденброта (б) в среде Matlab

В соответствии с релаксационной теорией Диссадо – Хилла [10] за счет сил притяжения в жидкостях (воде) образуются области с локально-упорядоченной структурой – кластеры, структура, состав и значение энергии химических связей между молекулами в которых зависит от типа жидкости и твердой среды, в которой она находится. В каждой из жидкости существуют основные, типичные для нее, кластеры, которые и определяют ее строение.

В двухуровневой модели релаксация группы атомов или молекул (кластера) связана с переходами из одного минимума в другой для двух вариантов ориентации, соответствующих минимумам на потенциальной кривой (рис. 4).

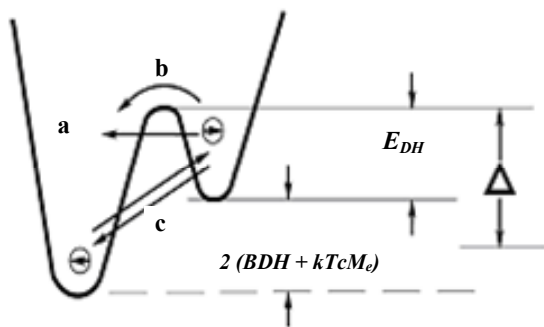


Рис. 4. Энергетическая схема двухуровневой системы: а – процесс, связанный с вращательными и колебательными внутримолекулярными колебаниями, б – внутрикластерный активационный релаксационный процесс, с – межкластерный процесс синхронного обмена молекулами

Разница в значениях энергии между этими двумя минимумами, т.е. высота барьера, который преодолевается при синхронном обмене молекулами между соседними кластерами, в явном виде записывается

$$\Delta\varphi = 2(B_{DH} + kT_c M_e),$$

где k – постоянная Больцмана, T_c – критическая характеристическая температура (температура фазового перехода, например, температура стеклования),

M_e – единичный вектор продольной составляющей дипольного момента кластера

$$M_e = \tanh\left(\frac{B_{DH} + kT_c M_e}{kT}\right).$$

Степень структурной упорядоченности средне-статистического кластера минимального размера характеризуется параметром $0 \leq n_{DH} \leq 1$. При $n = 0$ кластеры не образуются и корреляция между процессами переориентации молекул отсутствует. При $n = 1$ кластеры имеют кристаллическую структуру, в которой процессы переориентации молекул полностью скоррелированы. Кластеры в свою очередь входят в состав межкластерных образований, степень структурной упорядоченности в которых определяется параметром $1 - m_{DH}$, причем $0 \leq m_{DH} \leq 1$. Крайние значения $m_{DH} = 0$ и $m_{DH} = 1$ соответствуют идеальной кристаллической решетке и жидкости с идеальным гидродинамическим течением.

Для кластерной модели Диссадо – Хилла дисперсия относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*(\omega)$ описывается уравнением

$$\frac{\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_{\infty DH}}{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty DH}} = \left(1 + \frac{i\omega}{\omega_p}\right)^{n-1} \frac{{}_2F_1\left[1-n, 1-m; 2-n; \left(1 + \frac{i\omega}{\omega_p}\right)^{-1}\right]}{{}_2F_1(1-n, 1-m; 2-n; 1)},$$

где $\varepsilon_{\infty DH}$ – высокочастотный предел области дисперсии, обусловленный вкладом поляризации быстрых видов поляризации (ионного и электронного смещения) и высокочастотного процесса релаксации, ${}_2F_1[\dots]$ – Гауссовские гипергеометрические функции.

Приведенное уравнение соответствует уравнению Дебая при $n = 0$, $m = 1$, $\omega_p = \tau_D^{-1}$. Максимум диэлектрических потерь ε'' наблюдается при $\omega = \omega_p$ только в случае $n = m$.

При каждом значении температуры существует распределение кластеров по форме и размерам, которым соответствует среднеквадратический квадрат

$$\left\langle \mu_c^2 \right\rangle.$$

Цель статьи – исследование особенностей проявления релаксационных потерь в высокочастотном диапазоне в полиэтиленовой изоляции при старении образцов силового и радиочастотного кабелей в условиях повышенной влажности.

Тестовые объекты. В качестве тестовых объектов использовались образцы кабелей коаксиальной конструкции.

1. Новый силовой кабель напряжением 35 кВ в однопольном исполнении с сечением алюминиевой жилы 95 мм² со сшитой (терморективной) полиэтиленовой изоляцией, полупроводящими экранами по жиле и изоляции, медным экраном. Конструктивная особенность – наличие полупроводящих гидрофильных водоблокирующих лент, обеспечивающих радиальную защиту кабеля от влаги.

2. Радиочастотный кабель РК-50 с двухслойной термопластичной полиэтиленовой изоляцией без дополнительной радиальной защиты от влаги. Кабель

в течение 5 лет находился в помещении, причем концы кабеля не были герметизированы защитными термоусаживающимися колпачками.

3. Новый радиочастотный кабель ЕН-4 (РК-75) с термопластичной вспененной полиэтиленовой изоляцией без дополнительной радиальной защиты от влаги.

4. Радиочастотный кабель RG-6 (РК-75) с термопластичной вспененной полиэтиленовой изоляцией с защитой от влаги в исходном (до эксплуатации) состоянии в виде гидрофобного желе после эксплуатации в течение 10 лет.

Динамика изменения релаксационных потерь в процессе увлажнения. Тестовые образцы нового силового кабеля и кабеля РК-50 подвергнуты старению в условиях повышенной влажности комнатной температуры в течение 1440 часов (2-х месяцев). В исходном состоянии и после старения выполнены измерения тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот 50 кГц – 20 МГц куметром ВМ 560 резонансным методом (рис. 5).

Для образцов радиочастотных кабелей ЕН-4 и RG-6 со вспененной изоляцией измеренные частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь представлены на рис. 6.

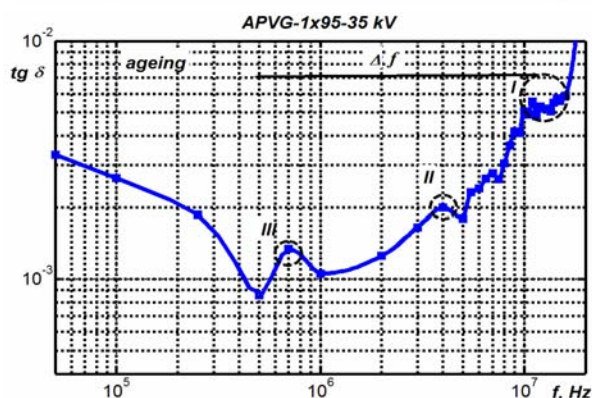
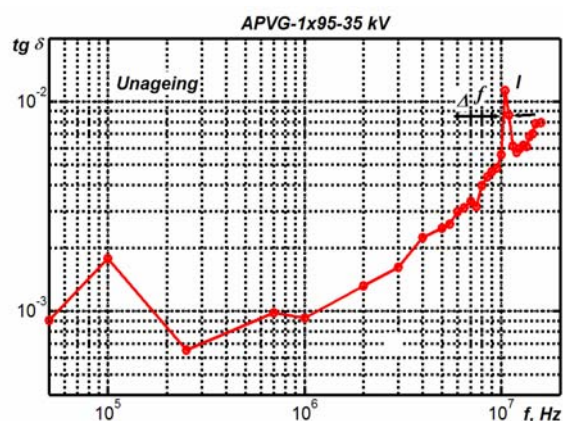
Анализ частотных зависимостей показывает, что имеет место проявления общих закономерностей релаксационных потерь в кабелях. Так, для силового кабеля с терморезактивной и радиочастотного кабеля РК-50 с термопластичной полиэтиленовой изоляцией (рис. 5) как в исходном состоянии, так и после старения характер частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь – идентичен.

В исходном состоянии проявляется релаксационный максимум I, ширина которого Δf косвенно связана с количеством влаги в изоляции: в новом силовом кабеле количество остаточной свободной влаги значительно меньше, чем в кабеле РК-50, который длительное время находился в естественных условиях. После старения на частотных зависимостях появляются дополнительные релаксационные максимумы II и III, связанные с переориентацией полярных молекул воды в образовавшихся новых кластерах разной формы и размеров.

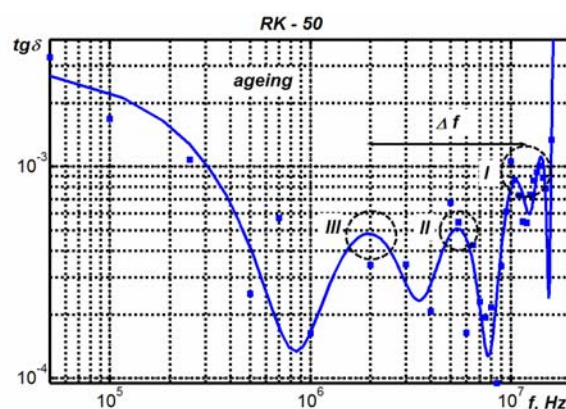
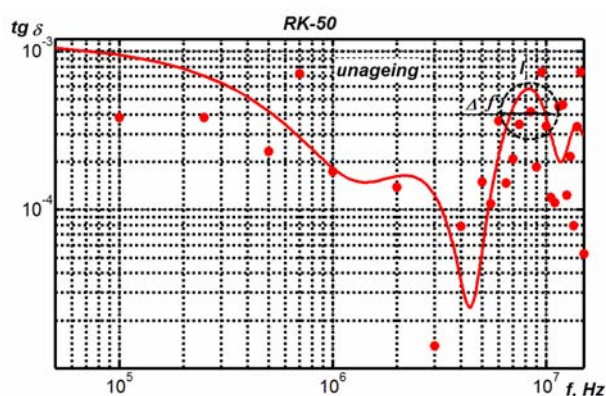
В новом кабеле ЕН-4 (см. рис. 6,а) имеет место три характерных релаксационных максимума, связанные с проявлением дипольной поляризации воды в кластерах разной формы и размера. В структуре вспененной термопластичной полиэтиленовой изоляции существуют газообразные включения, которые заполняются водой, как в исходном состоянии, так и в процессе эксплуатации (см. рис. 6,б).

Корреляция между шириной спектра дипольных максимумов и сопротивлением изоляции.

На рис. 7 представлены результаты измерений сопротивления изоляции образцов силового кабеля (кривые 1 и 1') и радиочастотного РК-50 (кривые 2 и 2') в зависимости от приложенного постоянного напряжения: кривые 1 и 2 – исходное состояние, кривые 1' и 2' – после увлажнения.

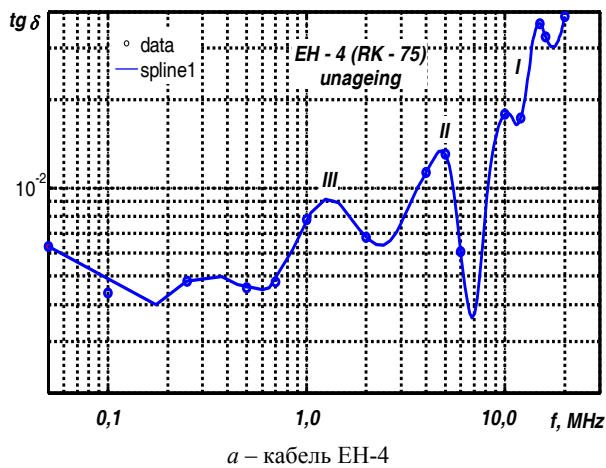


а – силовой кабель с терморезактивной полиэтиленовой изоляцией (верхний рисунок – исходное состояние, нижний – после увлажнения)

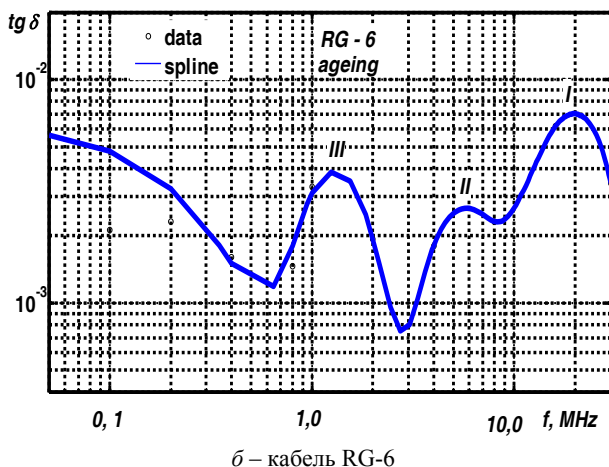


б – радиочастотный кабель с термопластичной полиэтиленовой изоляцией (верхний рисунок – исходное состояние, нижний – после увлажнения)

Рис. 5. Динамика изменений тангенса угла диэлектрических потерь в образцах кабелей в процессе увлажнения



а – кабель EH-4



б – кабель RG-6

Рис. 6. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь радиочастотных кабелей со вспененной термопластичной полиэтиленовой изоляцией

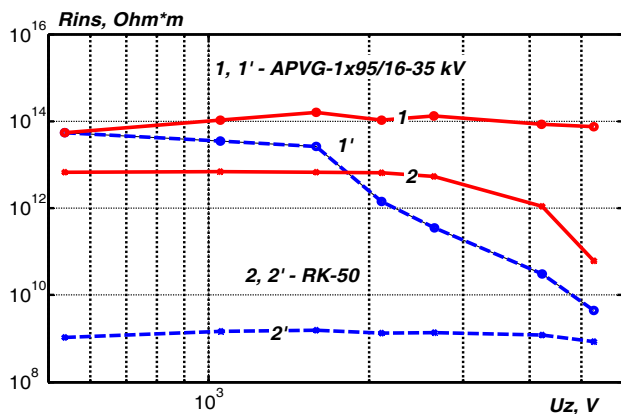


Рис. 7

В исходном состоянии сопротивление изоляции силового кабеля слабо зависит от приложенного напряжения (рис. 7, кривая 1). Ширина спектра Δf релаксационного максимума I (рис. 5,а, верхний рисунок) – мала. Для радиочастотного кабеля РК-50 в исходном состоянии ширина спектра Δf релаксационного максимума I (рис. 5,б, верхний рисунок) – значима (около 6 МГц), что и обуславливает уменьшение сопротивления изоляции в 10 раз при увеличении напряжения в 10 раз (с 500 до 5000 В) (рис. 7, кривая 2).

После старения для силового кабеля (рис. 7, кривая 1') наблюдается сильно выраженная зависимость сопротивления изоляции от приложенного напряже-

ния: при увеличении напряжения в 10 раз сопротивление изоляции уменьшилось в 10000 раз. Ширина полосы спектра Δf релаксационных максимумов I – III (рис. 5,а, нижний рисунок) – возросла практически в 20 раз.

Для кабеля РК-50 ширина спектра Δf релаксационных максимумов I – III (см. рис. 5,б, нижний рисунок) – возросла только в 6 раз, и, как результат, сопротивление изоляции после увлажнения практически не зависит от напряжения. Для напряжения 5 кВ сопротивление изоляции после старения уменьшилось в 100 раз относительно исходного состояния. Очевидно, что в термопластичной полиэтиленовой изоляции формируются кластеры воды с близкими фрактальными размерами.

Выводы.

Таким образом, экспериментально нашло подтверждение существования в полимерной изоляции кабелей свободной воды в виде областей с локально-упорядоченной структурой – кластеров.

В диапазоне проведенных измерений 50 кГц – 20 МГц установлено, что в сплошной полиэтиленовой изоляции на частотных зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь проявляется один релаксационный максимум на частоте 10 МГц в исходном состоянии и появляются дополнительные пики в спектре частот 500 кГц – 5 МГц после увлажнения. Для терморезактивной (сшитой) полиэтиленовой изоляции характерна большая ширина Δf спектра частот, в котором наблюдаются релаксационные потери. Очевидно, что ширина каждого из релаксационных максимумов связана с характерным фрактальным размером кластера.

Важно, что в увлажненной сплошной и вспененной полиэтиленовой изоляции проявляются индивидуальные, типичные только для воды, кластеры, обнаруживаемые по высокочастотным релаксационным дипольным максимумам тангенса угла диэлектрических потерь.

Наблюдается положительная корреляция между шириной полосы Δf релаксационных максимумов и скоростью уменьшения сопротивления изоляции от приложенного высокого постоянного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Bellet J., Matey G., Rose L., Rose V., Filippini J., Poggi Y., Raharimalala V. Some aspects of the relationship between water treeing, morphology, and microstructure of polymers // IEEE Trans. Elect. Insul. – 1987. – vol.EI-22. – no.2. – pp. 211-217. doi: 10.1109/tei.1987.298884.
2. Ciuprina F., Teissèdre G., Filippini J.C. Polyethylene crosslinking and water treeing // Polymer. – 2001. – vol.42. – no.18. – pp. 7841-7846. doi: 10.1016/s0032-3861(01)00264-6.
3. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. – 2002. – vol.9. – no.4. – pp. 483-497. doi: 10.1109/tdei.2002.1024425.
4. Kato T., Yamaguchi T., Komori F., Kawahara T., Hidaka T., Suzuoki Y. Influence of structural change by AC voltage prestressing on electrical-tree inception voltage of LDPE with water-tree degradation // 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, Canada: IEEE. – 2012. – pp. 847-850. doi: 10.1109/ceidp.2012.6378913.

5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Электрический транспорт полярных молекул воды в неоднородном электрическом поле полимерной изоляции высоковольтных кабелей // Технічна електродинаміка. – 2010. – №5. – С. 3-9.
6. Priya S., Mubashira Anjum A. Analysis of water trees and characterization techniques in XLPE cables // Indian Journal of Science and Technology. – 2014. – vol.7(S7). – pp. 127-135.
7. Шувалов М. Ю., Маврин М. А. Теоретическое и экспериментальное исследование водных трингов типа «бант» // Кабели и провода. – 2002. – №1. – С. 44-50.
8. Mandelbrot B.B. Fractals: form, chance and dimension. – San Francisco: Freeman, 1977.
9. Dissado L.A., Hill, R.M. The fractal nature of the cluster model dielectric response functions // Journal of Applied Physics. – 1989. – vol.66. – no.6. – pp. 2511-2524. doi: 10.1063/1.344264.
10. Dissado L.A., Hill R.M. A cluster approach to the structure of imperfect materials and their relaxation spectroscopy // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1983. – vol.390. – no.1798. – pp. 131-180. doi: 10.1098/rspa.1983.0125.

REFERENCES

1. De Bellet J., Matey G., Rose L., Rose V., Filippini J., Poggi Y., Raharimalala V. Some aspects of the relationship between water treeing, morphology, and microstructure of polymers. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, 1987, vol.EI-22, no.2, pp. 211-217. doi: 10.1109/tei.1987.298884.
2. Ciuprina F., Teissède G., Filippini J.C. Polyethylene crosslinking and water treeing. *Polymer*, 2001, vol.42, no.18, pp. 7841-7846. doi: 10.1016/s0032-3861(01)00264-6.
3. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory. *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 2002, vol.9, no.4, pp. 483-497. doi: 10.1109/tdei.2002.1024425.
4. Kato T., Yamaguchi T., Komori F., Kawahara T., Hidaka T., Suzuoki Y. Influence of structural change by AC voltage prestressing on electrical-tree inception voltage of LDPE with water-tree degradation. *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Montreal, Canada: IEEE, 2012, pp. 847-850. doi: 10.1109/ceidp.2012.6378913.
5. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N., Zolotarev V.M. Electric transport of polar water molecules in an inhomogeneous electric field of polymer insulation high-voltage cables. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2010, no.5, pp. 3-9. (Rus).
6. Priya S., Mubashira Anjum A. Analysis of water trees and characterization techniques in XLPE cables. *Indian Journal of Science and Technology*, 2014, vol.7(S7), pp. 127-135.
7. Shuvalov M.Y., Mavrin M.A. Theoretical and experimental research water treeing type of «bow». *Kabeli i provoda – Cables and wires*, 2002, no.1, pp. 44-50. (Rus)
8. Mandelbrot B.B. Fractals: form, chance and dimension. – San Francisco: Freeman, 1977.
9. Dissado L.A., Hill, R.M. The fractal nature of the cluster model dielectric response functions. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol.66, no.6, pp. 2511-2524. doi: 10.1063/1.344264.
10. Dissado L.A., Hill R.M. A cluster approach to the structure of imperfect materials and their relaxation spectroscopy. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1983, vol.390, no.1798, pp. 131-180. doi: 10.1098/rspa.1983.0125.

Поступила (received) 28.12.2015

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Кессаев Александр Геннадиевич¹, аспирант,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076010,
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

G.V. Bezprozvannykh¹, A.G. Kyessayev¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Relaxations losses in polyethylene insulation of coaxial cable structure during aging in high humidity conditions.

Introduction. The presence of free moisture in power cables leading to the formation of tree structures - water treeing, which originate in the amorphous phase polyethylene and are a major cause of degradation of the polymer insulation. They represent the damage of the polymer size from several microns to 1 mm, developing technology for insulation defects under the combined action of the electric field and the moisture diffusing from the environment. Water treeing destroys the polymer chain, resulting in the formation of microcavities filled with moisture. The dynamics of water treeing and subtle properties largely depend on the composition, morphology of the polymer insulation, chemical nature of the defect, in which they originate. Due to the force of gravity in the water formed typical only for her region with locally ordered structure - clusters, which cause loss of relaxation. **Purpose.** Features presence of relaxation losses in high-frequency range in polyethylene insulation during aging in high humidity conditions of samples power and RF cables. **Methodology.** Samples of the power cable for the voltage of 35 kV with a cross-linked polyethylene insulation radial water-blocking protection from moisture and radio-frequency coaxial cable with thermoplastic insulation for 1440 hours in a humidity of 100%. The dielectric loss tangent measured resonance method before and after aging. **Originality.** Experimentally found evidence of the existence in the polymer cable insulation free water in the form of areas with locally ordered structure - clusters. It is found that the solid polyethylene insulation in the frequency dependence of dielectric loss tangent maximum relaxation shown one at 10 MHz in the initial state, and there are two additional frequency range 500 kHz - 5 MHz after moistening. For cross-linked polyethylene insulation characteristic of large width Δf of the frequency spectrum in which the observed relaxation losses. It is obvious that the width of each of the relaxation maxima is associated with characteristic fractal cluster size. It is important that the hydrated solid and foamed polyethylene insulation to show individuality, typical only for water clusters which are detected by high-frequency dipole relaxation peaks dielectric loss tangent. There is a positive correlation between the bandwidth Δf of relaxation maxima and the rate of decrease of insulation resistance by applying a high DC voltage. **Practical value.** Establishing a correlation between the bandwidth of relaxation maxima and the rate of decrease in the insulation resistance test objects in the laboratory makes it possible to diagnose the presence of free moisture in the power and RF cables by measuring the insulation resistance in exploitation. References 10, figures 7.

Key words: water treeing, moisturizing cables, solid and foamed polyethylene insulation, dielectric loss tangent, water clusters, relaxation peaks.

P. Olszowiec

МОДИФИКАЦИИ ВЕНТИЛЬНЫХ СХЕМ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Представлена работа різних вентильних схем вимірювання опору ізоляції мереж низької напруги з ізолюваною нейтраллю. Наведено формули для обчислення еквівалентного опору ізоляції при асиметрії лінійної напруги мережі. Запропоновано способи усунення недоліків цих схем з використанням однофазних випрямлячів. Показано можливості реалізації системи сигналізації про зниження опору ізоляції та пошуку місця замикання на землю. Бібл. 6, рис. 9.

Ключові слова: мережі низької напруги з ізолюваною нейтраллю, опір ізоляції, діодний випрямляч, сигналізація про зниження опору ізоляції, пошук місця замикання на землю.

Представлена работа разных вентильных схем измерения сопротивления изоляции сетей низкого напряжения с изолированной нейтралью. Приведены формулы для вычисления эквивалентного сопротивления изоляции при асимметрии линейных напряжений сети. Предложены способы устранения недостатков этих схем с использованием однофазных выпрямителей. Показаны возможности реализации системы сигнализации о понижении сопротивления изоляции и поиска места замыкания на землю. Библ. 6, рис. 9.

Ключевые слова: сети низкого напряжения с изолированной нейтралью, сопротивление изоляции, диодный выпрямитель, сигнализация о понижении сопротивления изоляции, поиск места замыкания на землю.

Введение. Для безопасной и надежной эксплуатации электрических сетей первостепенной задачей является контроль изоляции. В сетях низкого напряжения с изолированной нейтралью довольно широкое применение получили вентильные схемы измерения сопротивления изоляции. Однако в последнее десятилетие, несмотря на многочисленные достоинства этой технологии, ведущее место заняли устройства контроля изоляции на базе наложенного тестового сигнала постороннего источника. Именно этим новым методам посвящено большинство материалов в технической литературе [1]. Тем не менее, считается целесообразным напомнить традиционные вентильные схемы измерения изоляции и рассмотреть возможные пути их совершенствования.

Постановка задачи. Главными достоинствами схем с диодными выпрямителями являются простота, отсутствие постороннего источника наложенного тока, быстрота и высокая точность работы, а также независимость результата измерения от емкостей сети [2]. До сих пор реализовано несколько вентильных схем непрерывного и периодического определения эквивалентного сопротивления изоляции сетей относительно земли. Однако эти разработки имеют также существенные недостатки, ограничивающие их применение.

Целью данной статьи является анализ существующих систем и предложенных автором усовершенствованных схем на базе простейших однофазных выпрямителей.

Существующие разработки. Схема А. Наиболее распространенной схемой непрерывного контроля изоляции сети без постороннего источника является система с двухполупериодным мостовым выпрямителем (рис. 1), питаемым от данной сети.

Линейное напряжение контролируемой сети питает трансформатор – его вторичная обмотка включена через выпрямитель и резистор R_0 между одним из проводов сети и землей. Этот резистор ограничивает ток однофазного глухого замыкания на землю. Выпрямленный ток на выходе моста является тестовым

сигналом для определения эквивалентного сопротивления R_i изоляции сети относительно земли. Среднее значение напряжения U_{0-mean} на резисторе R_0 , равно

$$U_{0-mean} = \sqrt{2} \cdot E_{bc} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_i}, \quad (1)$$

дает однозначную информацию об искомом параметре R_i . Его значение определяется формулой

$$R_i = R_0 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}. \quad (2)$$

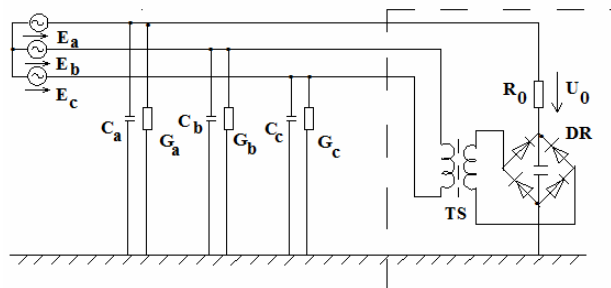


Рис. 1. Схема А измерения сопротивления изоляции трехфазной сети: TS – разделительный трансформатор, DR – двухполупериодный мостовой выпрямитель, R_0 – токоограничивающий резистор, E_a, E_b, E_c – фазные напряжения источника, C_a, C_b, C_c – емкости изоляции фаз, G_a, G_b, G_c – проводимости изоляции фаз

Так как в установившемся режиме среднее значение за период всех токов заряда и разряда емкостей сети относительно земли равно нулю, то результат измерений не зависит от уровня этих параметров (т.е. емкостей) изоляции. Зато получаемое значение параметра R_i зависит одновременно от двух напряжений (E_{bc} и U_0) контролируемой сети, что является главным недостатком этого, как, впрочем, и всех других методов подобного рода. Следует подчеркнуть, что формула (1) верна при всяком возможном искажении формы (рис. 2) выпрямленного напряжения U_0 .

© Piotr Olszowiec

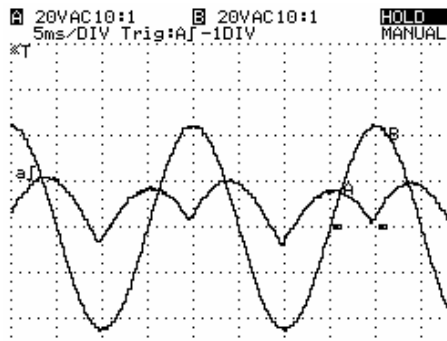


Рис. 2. Осциллограмма напряжений в схеме А измерения сопротивления изоляции трехфазной сети (пример): А – напряжение U_0 , В – линейное напряжение

Схема Б. Измерительная схема Б (рис. 3) также обеспечивает непрерывный контроль изоляции сети относительно земли. Конденсатор емкостью C периодически пополняет свой заряд от фаз B и C через диод D . Когда диод закрыт, конденсатор разряжается через последовательно соединенных элементов: токоограничивающего резистора R_0 и сопротивления изоляции сети.

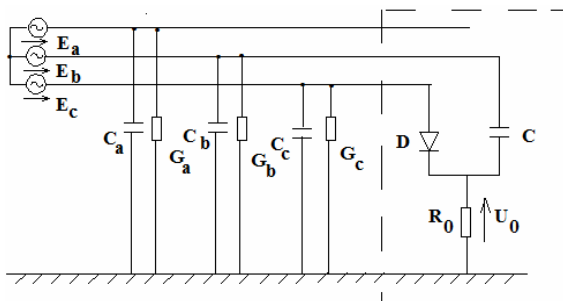


Рис. 3. Схема Б системы измерения сопротивления изоляции трехфазной сети: D – диод, C – конденсатор, R_0 – токоограничивающий резистор

Как и в схеме А, среднее значение напряжения U_{0-mean} на резисторе R_0 равно

$$U_{0-mean} = U_{C-mean} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_i}, \quad (3)$$

откуда получается искомый параметр R_i

$$R_i = R_0 \cdot \frac{U_{C-mean} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}, \quad (4)$$

причем U_{C-mean} – среднее значение напряжения на конденсаторе.

Примерная осциллограмма напряжений в данной схеме показана на рис. 4. На нем виден периодический процесс заряда и разряда конденсатора.

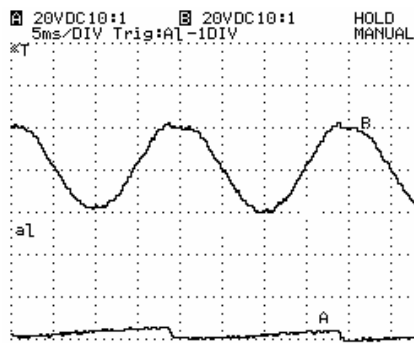


Рис. 4. Осциллограмма напряжений в схеме Б измерения сопротивления изоляции трехфазной сети (пример): А – напряжение U_0 , В – линейное напряжение

При правильном выборе значений C и R_0 , т.е. для достаточно большой постоянной времени измерительного контура, можно обеспечить практически постоянное напряжение источника тестового сигнала, которым является конденсатор. Для этого должно выполняться условие $C \cdot R_0 \gg T$ (T – период напряжения сети). В этом случае формула (4) принимает вид

$$R_i = R_0 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}} \quad (5)$$

Схема В. Схема трехфазного выпрямителя с нулевым выводом принадлежит к наиболее популярным системам контроля изоляции (рис. 5) [3].

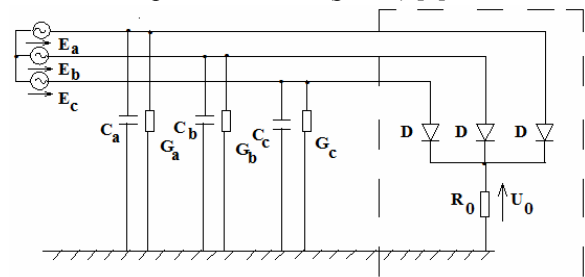


Рис. 5. Схема В системы измерения сопротивления изоляции трехфазной сети: D – диоды, R_0 – токоограничивающий резистор

В этой схеме открыт этот диод, анод которого имеет в данный момент наивысший потенциал. Переход тока с одного диода на другой наступает мгновенно, когда их фазные напряжения становятся равными.

Для выведения формулы, определяющей среднее значение напряжения U_0 на резисторе R_0 при произвольной несимметричной системе напряжений E_a, E_b, E_c источника питания сети, удобно воспользоваться выражением для выходного напряжения мостовой схемы (рис. 6) [4]:

$$U_{12-mean} = \frac{\sqrt{2} \cdot (E_{ab} + E_{bc} + E_{ca})}{\pi}. \quad (6)$$

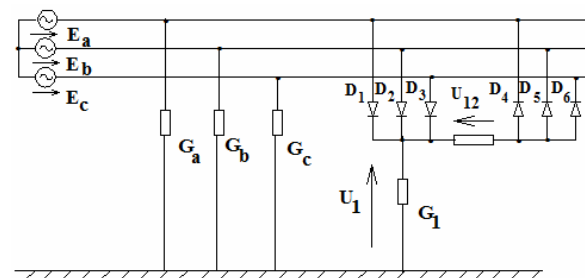


Рис. 6. Мостовая схема трехфазного диодного выпрямителя системы: $D_1 \dots D_6$ – диоды выпрямителя, G_1 – проводимость утечки изоляции положительного полюса

В этой же схеме среднее значение [5] напряжения положительного полюса относительно земли равно

$$U_{1-mean} = \frac{G_i}{G_i + G_1} \cdot \frac{U_{12-mean}}{2}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) получается формула для среднего значения напряжения U_{0-mean} на резисторе R_0 в схеме В

$$U_{0-mean} = \frac{\sqrt{2} \cdot (E_{ab} + E_{bc} + E_{ca})}{2\pi} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_i}, \quad (8)$$

откуда определяется искомая величина

$$R_i = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot (E_{ab} + E_{bc} + E_{ca})}{2\pi \cdot U_{0-mean}} - 1 \right) \cdot R_0. \quad (9)$$

Устранение недостатков схем А, Б, В. Главным недостатком методов А, Б, В (кроме отсутствия самоконтроля исправности) является зависимость вычисляемого параметра R_i одновременно от линейных напряжений контролируемой сети и от напряжения U_0 . Эти напряжения, разумеется, взаимно пропорциональны, но при использовании формул (2) и (4) надо знать текущие значения обоих величин. В случае колебаний напряжений источника питания необходимо проводить одновременные отсчеты двух вольтметров.

Градуировать шкалу вольтметра U_0 в единицах сопротивления можно только при постоянном, известном значении данного напряжения сети.

В схеме В дополнительную трудность вносит возможная асимметрия напряжений источника питания. Для точного определения искомого параметра R_i по формуле (9) следует одновременно измерять все три линейные напряжения. От этого последнего затруднения можно избавиться простым способом, предложенным автором.

В схеме трехфазного выпрямителя с нулевым выводом достаточно оставить лишь два диода питаемые любым линейным напряжением [6] (рис. 7).

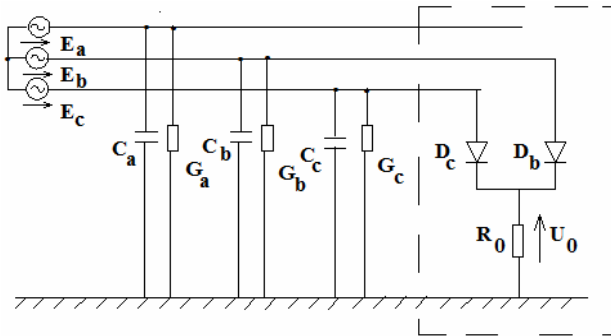


Рис. 7. Модифицированная схема непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции трехфазной сети с помощью двух диодов

Пусть выпрямитель питается линейным напряжением фаз b, c

$$e_{bc}(t) = e_b(t) - e_c(t) = \sqrt{2} \cdot E_{bc} \cdot \sin \omega t,$$

а напряжение фазы a выражено функцией $e_a(t) = \sqrt{2} \cdot E_a \cdot \sin(\omega t - \alpha)$, причем параметры E_a, E_{bc}, α могут принимать произвольные значения.

Переход тока с одного диода на другой наступает при нулевом значении напряжения $e_{bc}(t)$. В интервале $0 < t < T/2$ открыт диод D_b . Баланс токов утечки на землю представляет уравнение

$$(G_b + G_0) \cdot u_0 + G_c \cdot (-e_{bc} + u_0) + G_a \cdot (u_0 - e_b + e_a) + C_b \cdot \frac{du_0}{dt} + C_c \cdot \frac{d(-e_{bc} + u_0)}{dt} + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_b + u_0)}{dt} = 0. \quad (10)$$

В интервале $T/2 < t < T$ открыт диод D_c

$$(G_c + G_0) \cdot u_0 + G_b \cdot (e_{bc} + u_0) + G_a \cdot (u_0 - e_c + e_a) + C_c \cdot \frac{du_0}{dt} + C_b \cdot \frac{d(e_{bc} + u_0)}{dt} + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_c + u_0)}{dt} = 0. \quad (11)$$

Обозначив $G_i = G_a + G_b + G_c$ и $C_i = C_a + C_b + C_c$, оба уравнения можно записать так

$$(G_i + G_0) \cdot u_0 + C_i \cdot \frac{du_0}{dt} + G_a \cdot (e_a - e_b) + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_b)}{dt} + G_c \cdot (-e_{bc}) + C_c \cdot \frac{d(-e_{bc})}{dt} = 0; \quad (12)$$

$$(G_i + G_0) \cdot u_0 + C_i \cdot \frac{du_0}{dt} + G_a \cdot (e_a - e_c) + C_a \cdot \frac{d(e_a - e_c)}{dt} + G_b \cdot e_{bc} + C_b \cdot \frac{de_{bc}}{dt} = 0. \quad (13)$$

После интегрирования уравнения (12) в пределах $0 < t < T/2$ и (13) в пределах $T/2 < t < T$ надо их почленно сложить. Так как интегралы всех емкостных токов за период T равны нулям и среднее значение любой синусоидальной функции тоже равно нулю, получается следующее уравнение

$$(G_i + G_0) \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_0 dt = (G_i + G_0) \cdot U_{0-mean} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc}}{\pi} \cdot G_i, \quad (14)$$

откуда вытекает

$$R_i = \frac{1}{G_i} = R_0 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc} - U_{0-mean}}{U_{0-mean}}. \quad (15)$$

В этом методе результат вычисления зависит от значения линейного напряжения E_{bc} избранных двух фаз сети. Затем возможная несимметрия векторов фазных напряжений источника $\underline{E}_a, \underline{E}_b$ и \underline{E}_c , ни количество фаз сети уже не играют роли.

Основной недостаток всех представленных схем (необходимость одновременного отсчета напряжения контролируемой сети и напряжения U_0), можно устранить в системе реализующей деление значений двух напряжений. Так, например, для совершенствования схемы В можно использовать логометр, который выполняет функцию деления напряжений

$\frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc}}{\pi} - U_{0-mean}$ и U_{0-mean} поступающих на его входы (обмотки) 1 и 2 (рис. 8). Поэтому его показание соответствует величине данной формулой (15). Другим способом устранения рассматриваемого недостатка является применение стабилизированного напряжения выпрямленного тока.

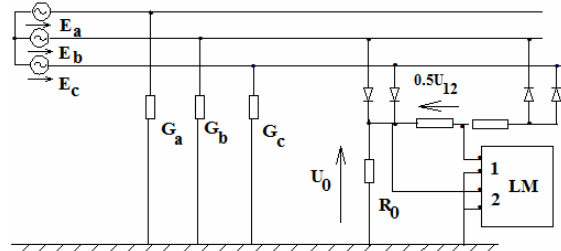


Рис. 8. Применение логометра (LM) для непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции с помощью диодного выпрямителя

Дополнительные достоинства схем А, Б, В.

Представленные схемы непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции сетей с помощью диодных выпрямителей имеют несколько ценных достоинств, до сих пор не в полной мере использованных на практике.

Первым из них является возможность реализации сигнализации о понижении сопротивления изоляции. Для этого в каждой из схем достаточно к резистору R_0 подключить параллельно реле постоянного напряжения (DC). При пороге срабатывания U_{0-set} оно будет выявлять падение сопротивления изоляции ниже уставки, равной

$$R_{i-set} = R_0 \cdot \frac{E - U_{0-set}}{U_{0-set}}, \quad (16)$$

где E – напряжение источника тестового выпрямленного тока.

Например, в схеме на рис. 8:

$$E = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{bc}}{\pi} = 0.5 \cdot U_{12-mean}. \quad (17)$$

К сожалению, недостатком этой простейшей системы является зависимость порога сигнализации о понижении сопротивления изоляции от колебаний напряжения сети (E) при данной уставке срабатывания реле $U_{0-ср}$. Разумеется, этот недостаток можно устранить в системе, реализующей деление значений напряжений или применяя стабилизацию напряжения выпрямленного тока. Другим выходом является использование реле напряжения реагирующего на знак разницы

$$U_{0-mean} - E \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_{i-set}},$$

что вытекает из (16).

Вторая ценность вентильных схем контроля изоляции – это пригодность для реализации поиска места замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью. Место повреждения изоляции можно выявлять, измеряя тестовый выпрямленный ток с помощью токовых клещей (тока DC, например Kyoritsu или Fluke). Процедура поиска замыканий на землю представлена на рис. 9.

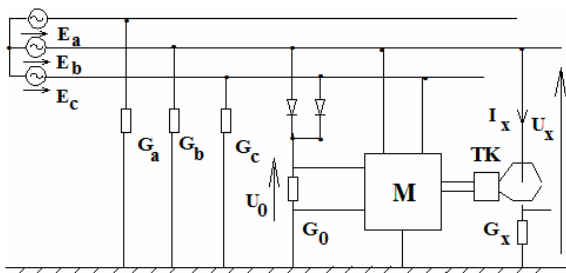


Рис. 9. Применение схемы непрерывного измерения эквивалентного сопротивления изоляции на базе диодного выпрямителя для поиска замыканий на землю: M – устройство определения сопротивления изоляции сети, TK – клещи постоянного тока

Так как среднее значение напряжения относительно земли одинаково для всех проводов сети, то средние значения токов утечки этих проводов пропорциональны проводимостям их изоляции. При поиске поврежденной изоляции клещами можно поочередно охватывать отдельные провода или многожильные кабели. Микропроцессорное устройство M определяет по формуле (15) эквивалентное сопротивление изоляции целой сети и по формуле

$$R_x = \frac{1}{G_x} = \frac{U_{x-mean}}{I_{x-mean}} \quad (18)$$

сопротивление изоляции отдельного провода или кабеля «х».

Выводы.

1. Традиционные системы непрерывного контроля изоляции на базе многофазных вентильных выпрямителей чувствительны к колебаниям линейных напряжений контролируемой сети и их возможной асимметрии.

2. Применение однофазного выпрямителя позволяет устранить вышеупомянутые затруднения, испытываемые при эксплуатации данных систем.

3. Вентильные схемы контроля позволяют дополнительно реализовать сигнализацию о понижении сопротивления изоляции и поиск места замыкания на землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hofheinz W. *Protective Measures with Insulation Monitoring*. VDE Verlag, 1998.
- Цапенко Е.Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В, 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1972.
- Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ, 2-е изд. перераб. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Olszowiec P. Unconventional Methods of Analyzing Diode Rectifiers with Asymmetrical Supply // *Computational Problems of Electrical Engineering*. – 2014. – №2. – pp. 33-36.
- Olszowiec P. O wyznaczaniu napięć trójfazowych prostowników diodowych // *Wiadomości Elektrotechniczne*. – 2015. – vol.1. – no.10. – pp. 33-34. doi: 10.15199/74.2015.10.8.
- Olszowiec P. *Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems*. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2nd edition. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-29755-7.

REFERENCES

- Hofheinz W. *Protective Measures with Insulation Monitoring*. VDE Verlag, 1998.
- Tsapenko E.F. *Kontrol' izolatsii v setiakh do 1000 V* [Insulation monitoring in networks up to 1000 V]. Moscow, Energiya Publ., 1972. (Rus).
- Tsapenko E.F. *Zamykaniia na zemliu v setiakh 6-35 kV* [Earth faults in networks 6-35 kV]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. (Rus).
- Olszowiec P. Unconventional Methods of Analyzing Diode Rectifiers with Asymmetrical Supply. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 2014, no.2, pp. 33-36.
- Olszowiec P. O wyznaczaniu napięć trójfazowych prostowników diodowych. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2015, vol.1, no.10, pp. 33-34. doi: 10.15199/74.2015.10.8.
- Olszowiec P. *Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems*. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2nd edition. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-29755-7.

Ольшовец Петр, MSc., инженер-электрик, Elporem i Elpoautomatyka Spółka z o.o., 28-200 Staszow, ul. Wschodnia 10/51, Poland, phone +48 606 613 976, e-mail: olpio@o2.pl

Piotr Olszowiec, MSc., Electrical Engineer, Elporem i Elpoautomatyka Spółka z o.o., 28-200 Staszow, ul. Wschodnia 10/51, Poland,

Modifications of diode rectifier circuits for continuous insulation measurement in live AC IT networks.

Purpose. In the paper there are described few systems of insulation resistance continuous measurement using an imposed DC test signal delivered by diode rectifiers. Drawbacks of this technique are pointed out and ways of these shortcomings removal are proposed. **Methodology.** An improved version of measuring circuit based on a single-phase diode rectifier is presented. Application of logometric measuring devices is suggested. **Results.** A new insulation resistance continuous measuring system is insensitive to network voltages variation and asymmetry. Modified circuit enables also implementation of a simple device for alarming the monitored network's insulation deterioration and/or earth-fault protection. **Originality.** Formulas describing performance of diode rectifiers under asymmetrical supply have not been available so far. Both innovations (i.e. single-phase diode rectifier and logometric meter) have not been applied widely for implementation of continuous insulation monitoring in live AC IT networks. **Practical value.** Use of both innovations will allow to eliminate unrequired dependence of measurement results on variable network voltages as well as their possible asymmetry. Exploitation of diode rectifier circuits for earth fault location is also possible. References 6, figures 9.

Key words: low voltage AC IT networks, insulation resistance, diode rectifier, insulation resistance decline alarming, earth fault location.

Ю.Л. Саенко, Д.Н. Калюжный

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ В НЕСИММЕТРИЮ И ОТКЛОНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКАХ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

На основі імітаційного моделювання проведено порівняльний аналіз математичних моделей розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень у спотворення напруг у точці загального приєднання, які засновані на принципах накладення й виключення. Отримані результати дозволили зробити висновок про еквівалентність двох математичних моделей і їхній довільний вибір для розв'язання задачі розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень у спотворення напруг у точці загального приєднання. Бібл. 8, табл. 6, рис. 3.

Ключові слова: якість електричної енергії, фактичний внесок, точка загального приєднання, несиметрія напруг, відхилення напруги.

На основе имитационного моделирования проведен сравнительный анализ математических моделей распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажение напряжений в точке общего присоединения, которые основаны на принципах наложения и исключения. Полученные результаты позволили сделать вывод об эквивалентности двух математических моделей и их произвольном выборе для решения задачи распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажение напряжений в точке общего присоединения. Библ. 8, табл. 6, рис. 3.

Ключевые слова: качество электрической энергии, фактический вклад, точка общего присоединения, несимметрия напряжений, отклонение напряжения.

Введение. Несоответствие качества электрической энергии (КЭ) установленным нормам является причинами брака продукции, повреждения оборудования и дополнительных потерь мощности как у потребителей, так и у поставщиков электроэнергии (ЭЭ) [1]. По некоторым оценкам [2] ежегодные экономические убытки ряда стран из-за пониженного КЭ достигают 10-20 млрд. дол. Для отдельных отраслей производства понижение КЭ может вызывать ущерб до 3.800.000 евро за одно событие [3]. Очевидно, что при возникновении такой ситуации становится вопрос об определении виновных в понижении КЭ и компенсации ими экономических убытков потерпевшей стороне. Ответом на него является решение задачи о распределении фактических вкладов (ФВ) источников искажений (ИИ) в искажение напряжений в точке общего присоединения (ТОП) [4].

Постановка задачи. Одно из новых направлений развития методов распределения ФВ ИИ в искажение напряжений в ТОП предполагает использование математических моделей, составленных в фазных координатах, с учетом распределенного характера ИИ в системе электроснабжения (СЭС), которые основаны на принципах наложения [5] и исключения [6].

Математическая модель распределения ФВ линейных ИИ (неискажающих синусоидальную форму кривой напряжения) в искажения напряжений, основанная на принципе наложения, предполагает разложение искажающих частей напряжений в каждой ТОП от действия всех ИИ согласно следующему выражению:

$$\sum_{i=1}^n U_{иски} = A^T \times Y_{неиск}^{-1} \times \sum_{i=1}^n I_{иски}, \quad (1)$$

где A – матрица инцидентности; $Y_{неиск}$ – матрица неискажающих узловых проводимостей СЭС и потребителей ЭЭ; $I_{иски}$ – матрица-столбец искажающих токов,

характеризующая i -ый активный или пассивный элемент с ИИ.

Математическая модель распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений, основанная на принципе исключения, предполагает определение искажающей части напряжения в каждой ТОП, вносимой i -ым ИИ, по следующему выражению:

$$U_{иски} = U_{иск} - U_{иск}^{искл\ ИИi}, \quad (2)$$

где $U_{иск}$ – матрица искажающих частей напряжений в ТОП от общего действия всех ИИ; $U_{иск}^{искл\ ИИi}$ – матрица искажающих частей напряжений в ТОП с исключенной искажающей частью i -го ИИ.

Для проверки адекватности и сравнения предлагаемых новых математических моделей распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в ТОП необходимо провести их численный анализ.

Цель исследования. Провести численный анализ математических моделей распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в ТОП, основанных на принципах наложения и исключения.

Результаты исследования. Рассмотрим СЭС семи потребителей ЭЭ (П) (рис. 1), состоящую из источника питания (ИП), обобщенной электрической сети (ЭС), одного силового трансформатора (Т) и трех воздушных линий (ВЛ).

Параметры схем замещения элементов рассматриваемой СЭС и потребителей ЭЭ, приведенные к напряжению 380 В, следующие. Напряжение на шинах ИП: $\underline{U}_A^{ИП} = 232 \angle 0^\circ$ В; $\underline{U}_B^{ИП} = 232 \angle 240^\circ$ В; $\underline{U}_C^{ИП} = 232 \angle 120^\circ$ В. Эквивалентные сопротивления обобщенной ЭС: $\underline{Z}_A^{ЭС} = 0,008 + j0,048$ Ом; $\underline{Z}_B^{ЭС} = 0,008 + j0,04$ Ом; $\underline{Z}_C^{ЭС} = 0,008 + j0,056$ Ом.

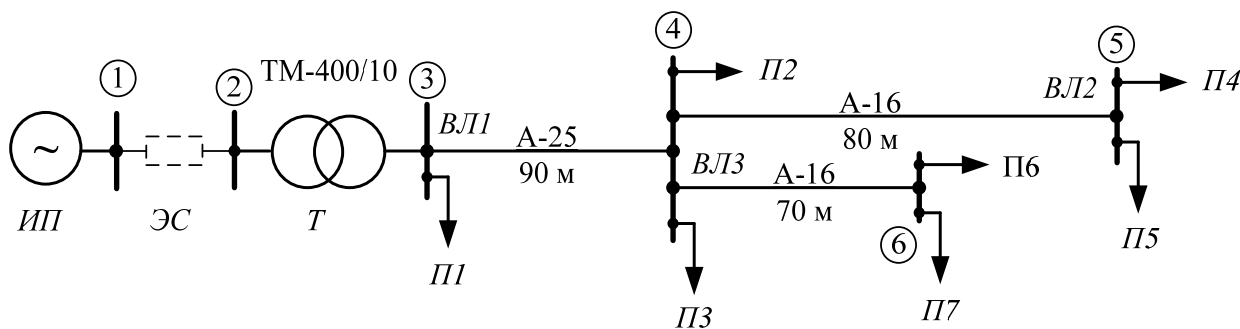


Рис. 1. Система электроснабжения семи потребителей ЭЭ

Эквивалентные сопротивления потребителей ЭЭ:

i	Z_{A}^{Pi} , Ом	Z_{B}^{Pi} , Ом	Z_{C}^{Pi} , Ом
1	$7,2 + j3,7$	$6,5 + j3,0$	$6,74 + j3,5$
2	$6,9 + j5,2$	$7,7 + j3,7$	$6,87 + j3,9$
3	$13,7 + j5,2$	$15,1 + j4,7$	$14,2 + j4,6$
4	$9,7 + j3,2$	$8,9 + j3,1$	$10,5 + j3,5$
5	$6,3 + j1,9$	$6,8 + j1,4$	$7,2 + j1,9$
6	$17,2 + j7,1$	$19,8 + j8,1$	$15,6 + j6,5$
7	$13,9 + j3,9$	$14,9 + j4,9$	$15,1 + j4,5$

Сопротивление силового трансформатора:
 $Z_{Фобм}^{Тн} = 0,00105 + j0,0072$ Ом.

Проводимость силового трансформатора:
 $Y_{Фнамагн}^{Тн} = 0,001375 + j0,0021$ См.

Удельные сопротивления ВЛ:
 $Z_{уд}^{A25} = 1,26 + j0,34$ Ом/км; $Z_{уд}^{A16} = 1,97 + j0,345$ Ом.

Согласно проведенным расчетам, установившийся режим работы рассматриваемой СЭС характеризуется параметрами, приведенными в табл. 1. Из них следует, что в ТОП № 5, к которой подключены потребители ЭЭ П4 и П5, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} и установившееся отклонение напряжения δU_y превышают нормально допустимые значения [7]. Исходя из этого, для ТОП № 5 определим ФВ всех ИИ в искажение ее напряжений.

Согласно математическим моделям (1) и (2) в схеме замещения отдельных элементов СЭС и потребителей ЭЭ должны быть выделены и определены искажающие части всех ИИ [8]. Если ИИ является пассивным продольным элементом, то его схема замещения будет определяться последовательным соединением двух сопротивлений, одно из которых характеризует неискажающую часть ($Z_{эл}^{неиск}$), а другое – искажающую часть ($Z_{эл}^{иск}$). Если ИИ является пассивным поперечным элементом, то его схема замещения будет определяться параллельным соединением двух проводимостей $Y_{эл}^{неиск}$ и $Y_{эл}^{иск}$. Для ИИ, являющегося активным элементом, предусмотрена схема замещения в виде последовательного соединения двух ЭДС ($E_{ИП}^{неиск}$ и $E_{ИП}^{иск}$).

Определение искажающей части любого ИИ по несимметрии напряжения производится на основе

отклонения его параметров от некоторого симметричного состояния, например для пассивных ИИ:

$$\begin{cases} F_{A(B,C)эл}^{неиск} = \frac{F_A^{эл} + F_B^{эл} + F_C^{эл}}{3}; \\ F_{фэл}^{иск} = F_{фэл}^{эл} - F_{фэл}^{неиск}. \end{cases} \quad (3)$$

В основе определения искажающих частей ИИ по отклонению напряжения лежат принципы соблюдения требуемых уровней напряжения на шинах ИП и в узлах регулирования напряжения СЭС, а также не превышения нагрузки отдельных элементов ЭС и потребителей ЭЭ допустимых или максимально разрешенных для них величин.

Так, в случае превышения потребляемой потребителем мощности выше максимально разрешенной его искажающая часть будет характеризоваться следующей проводимостью:

$$Y_{фPi}^{иск} = \Delta S_{фPi}^* / U_{фPi}^2, \quad (4)$$

где $\Delta S_{фPi}$ – часть фазной мощности i -го потребителя ЭЭ, превышающая его максимально разрешенную величину; $U_{фPi}$ – фазное напряжение i -го потребителя ЭЭ.

Отклонение фактического напряжения на шинах ИП ($E_{фИП}^{факт}$) от требуемого по режиму работы СЭС ($E_{фИП}^{неиск}$) будет характеризовать его искажающую часть:

$$E_{фИП}^{иск} = E_{фИП}^{неиск} - E_{фИП}^{факт}. \quad (5)$$

Для нашего случая максимально разрешенные мощности электрических нагрузок каждого потребителя ЭЭ указаны в табл. 2. По условию режима работы СЭС напряжение на шинах ИП должно поддерживаться $1,065 \cdot U_{ном}$. Регулирование напряжения силовым трансформатором не производится.

На основе вышеизложенных выражений и дополнительной информации о работе СЭС определены искажающие и неискажающие параметры всех ее ИИ (табл. 3 и табл. 5). В соответствии с математическими моделями (1) и (2) распределение ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП № 5 соответствует данным, приведенным в табл. 4 и табл. 6. Для более наглядного представления эти результаты графически изображены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры режима работы СЭС		ТОП СЭС					
		1*	2*	3	4	5	6
$\underline{U}_A(\underline{U}_{AB}), В$	401,84 ∠ 30	395,33 ∠ 28,67	224,09 ∠ -1,17	210,11 ∠ -0,88	202,01 ∠ -0,41	206,53 ∠ -0,85	
$\underline{U}_B(\underline{U}_{BC}), В$	401,84 ∠ -90	396,48 ∠ -91,57	228,26 ∠ -122,55	215,2 ∠ -122,42	206,45 ∠ -122,35	212,36 ∠ -122,23	
$\underline{U}_C(\underline{U}_{CA}), В$	401,84 ∠ 150	394,48 ∠ 148,4	231,05 ∠ 118,53	217,66 ∠ 118,91	210,76 ∠ 119,06	213,7 ∠ 119,14	
$\delta U_y, \%$	5,75	4,06	3,54	-2,59	-6,19	-4,16	
$K_{2U}, \%$	0	0,293	0,29	0,35	0,37	0,39	
$K_{0U}, \%$	0	0	1,6	1,86	2,21	1,82	

*Примечание. Для ТОП №1 и №2 указаны значения линейных напряжений.

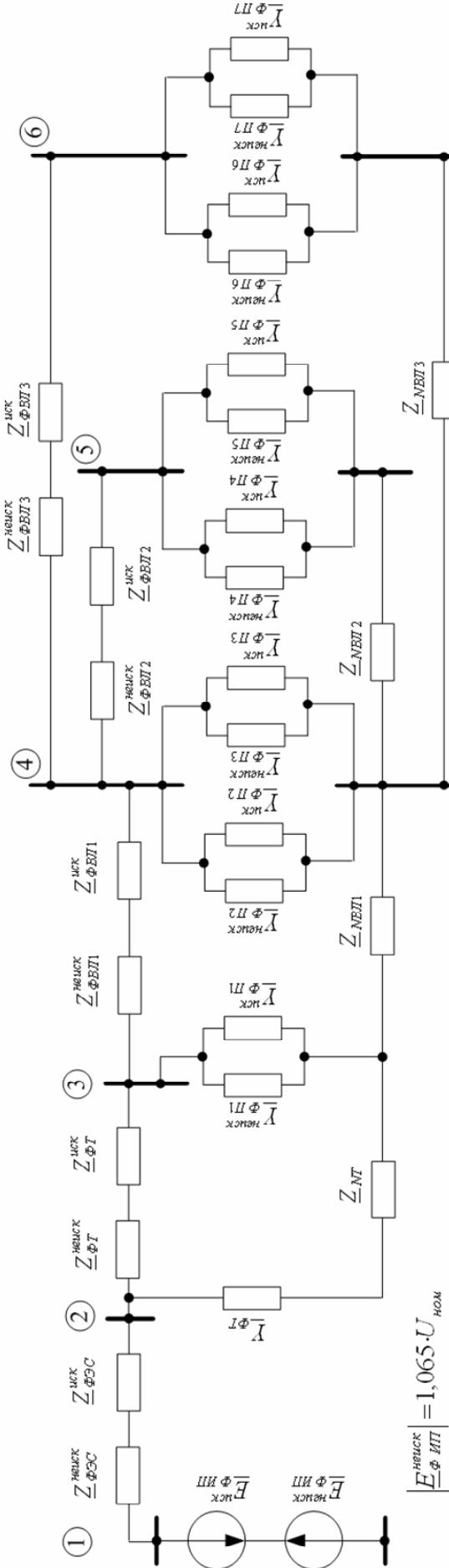


Рис. 2. Схема замещения СЭС и потребителей ЭЭ в однофазном исполнении

Таблица 2

Максимально разрешенная мощность электрической нагрузки потребителей ЭЭ	Потребители						
	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7
Мощность	8+2,5	5+2	3,5+1,5	4+1,5	7+2,2	3+1,3	3,5+1,5
$S_{\text{макс}}, \text{кВА}$							

Таблица 3

Параметры схем замещения элементов СЭС и потребителей ЭЭ для распределения ФВ по несимметрии напряжений

Схема замещения	Элементы СЭС и потребители электрической энергии												
	ЭС	T (обм.)*	T (магн.)*	В.П1*	В.П2*	В.П3*	В.ЛЗ*	П1	П2	П3	П4	П5	П6
$Z_{\text{нейск}}^A$, Ом ($\underline{Y}_{\text{нейск}}^A$, См)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	0,001375 -j0,0021	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,118 -j0,059	(0,109 -j0,058)	(0,063 -j0,021)	(0,093 -j0,031)	(0,139 -j0,036)	(0,049 -j0,02)	(0,063 -j0,019)
$Z_{\text{нейск}}^A$, Ом ($\underline{Y}_{\text{нейск}}^A$, См)	0	0	0	0	0	0	(-0,00798 +j0,0021)	(0,00227 -j0,00309)	(0,001164 -j0,00299)	(0,000011 -j0,00071)	(0,00669 -j0,00815)	(0,000488 -j0,00018)	(0,00399 -j0,00021)
$Z_{\text{нейск}}^B$, Ом ($\underline{Y}_{\text{нейск}}^B$, См)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	0,001375 -j0,0021	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,118 -j0,059	(0,109 -j0,058)	(0,063 -j0,021)	(0,093 -j0,031)	(0,139 -j0,036)	(0,049 -j0,02)	(0,063 -j0,019)
$Z_{\text{нейск}}^B$, Ом ($\underline{Y}_{\text{нейск}}^B$, См)	-j0,008	0	0	0	0	0	(0,008973 -j0,00029)	(-0,00342 -j0,00745)	(-0,00261 +j0,0024)	(0,007239 -j0,00352)	(0,002271 +j0,0067)	(-0,00592 +j0,0026)	(-0,00213 -j0,00099)
$Z_{\text{нейск}}^C$, Ом ($\underline{Y}_{\text{нейск}}^C$, См)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	0,001375 -j0,0021	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,118 -j0,059	(0,109 -j0,058)	(0,063 -j0,021)	(0,093 -j0,031)	(0,139 -j0,036)	(0,049 -j0,02)	(0,063 -j0,019)
$Z_{\text{нейск}}^C$, Ом ($\underline{Y}_{\text{нейск}}^C$, См)	j0,008	0	0	0	0	0	(-0,00099 -j0,0021)	(0,00153 -j0,00435)	(0,00109 +j0,0006)	(-0,00725 +j0,0028)	(-0,00896 +j0,0015)	(0,00543 -j0,00243)	(-0,00187 +j0,0008)
Z_N , Ом	-	≈0	-	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0

*Примечание. Силовой трансформатор и ВЛ приняты симметричными элементами.

Таблица 4

Распределение ФВ линейных III в искажене напряжений по несимметрии напряжений

ПОТ	ПКЭ	Напряжения симметричных составляющих											
		ФВ i-го III в несимметрию напряжений							ФВ i-го III в несимметрию напряжений				
Напряжение нулевой послед., В/град		ЭС	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	Σ			
Математическая модель, основанная на принципе наложения III													
5	K_{0U} , %	2,21	$\frac{ U_0 }{\arg(U_0)}$	4,57	$4,9 \cdot 10^{-7}$	1,125	1,336	0,363	1,522	3,138	0,982	0,402	4,57
				142,3	2,68	49,42	-162,52	175,32	82,07	141,12	-97,23	-151,89	142,3
Математическая модель, основанная на принципе исключения III													
5	K_{0U} , %	2,21	$\frac{ U_0 }{\arg(U_0)}$	4,57	$7 \cdot 10^{-4}$	1,125	1,337	0,363	1,524	3,138	0,983	0,402	4,569
				142,3	167,27	49,43	-162,49	175,35	82,02	141,1	-97,21	-151,8	142,3

Таблица 5

Параметры схем замещения элементов СЭС и потребителей ЭЭ для распределения ФВ по отклонению напряжения

Схема замещения	Элементы СЭС и потребители электрической энергии												
	ЭС	Т (обм.)*	Т (магн.)*	В.Л.*	В.Л2*	В.Л3*	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7
$Z_{\text{ниск}}^A, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{ниск}}^A, \text{ См}$)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	(0,11 -j0,049)	(0,111 -j0,045)	(0,064 -j0,024)	(0,093 -j0,031)	(0,145 -j0,044)	(0,05 -j0,021)	(0,067 -j0,019)
$Z_{\text{иск}}^A, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{иск}}^A, \text{ См}$)	0	0	0	0	0	0	(-j0,00697)	(-j0,016)	0	0	0	0	0
$Z_{\text{ниск}}^B, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{ниск}}^B, \text{ См}$)	0,008 +j0,04	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,127 -j0,048	0,106 -j0,043	0,06 -j0,019	0,094 -j0,035	0,141 -j0,029	0,043 -j0,018	0,061 -j0,02
$Z_{\text{иск}}^B, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{иск}}^B, \text{ См}$)	0	0	0	0	0	0	(-j0,01)	(-j0,0073)	0	(0,0059)	0	0	0
$Z_{\text{ниск}}^C, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{ниск}}^C, \text{ См}$)	0,008 +j0,056	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,117 -j0,047	0,106 -j0,042	0,064 -j0,021	0,086 -j0,029	0,13 -j0,034	0,055 -j0,023	0,061 -j0,018
$Z_{\text{иск}}^C, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{иск}}^C, \text{ См}$)	0	0	0	0	0	0	(0,014)	(0,00453 -j0,002)	0	0	0	0	0
$Z_N, \text{ Ом}$	-	≈0	-	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0

*Примечание. Силовый трансформатор и ВЛ приняты симметричными элементами.

Таблица 6

Распределение ФВ линейных ШИ в искажение напряжений по отклонению напряжения

ПОЭ	ПКЭ	Отклонение напряжения по прямой последовательности												
		ФВ i-го исключенного ШИ в отклонение напряжений												
		Отклонение напряжения от нижней нормально допустимой границы, В/град												
		Математическая модель, основанная на принципе наложения ШИ												
		Математическая модель, основанная на принципе исключения ШИ												
5	$\delta U_y, \%$ -6,19	$U_{\text{нм}}^{\text{нб}} - U_1 $ - $\text{arg}(U_1)$	2,615	0,12	0,423	0	0,122	0	0	0	0	0	0	2,575
			178,8	178,68	129,12	0	-161,52	0	0	0	0	0	0	171,84
5	$\delta U_y, \%$ -6,19	$U_{\text{нм}}^{\text{нб}} - U_1 $ - $\text{arg}(U_1)$	2,615	0,119	0,423	0	0,121	0	0	0	0	0	0	2,57
			178,8	178,76	129,17	0	-161,68	0	0	0	0	0	0	171,9

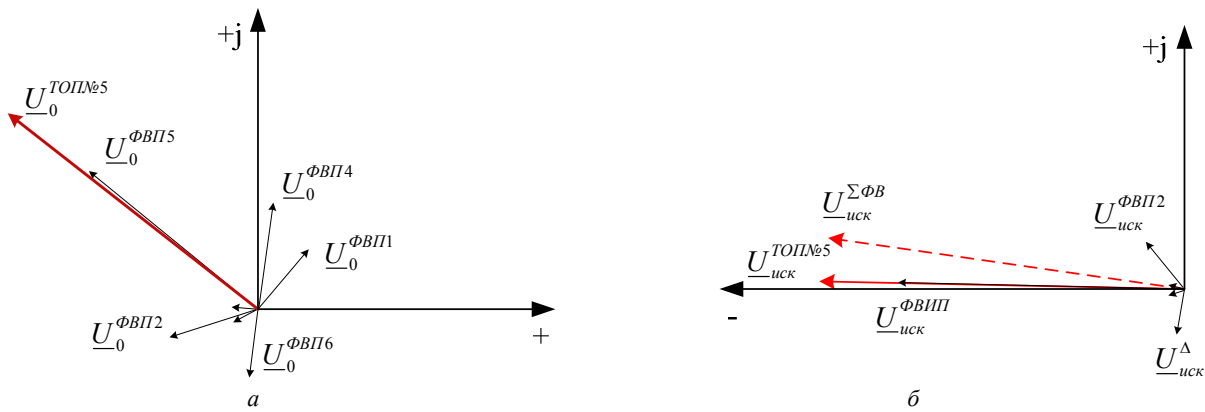


Рис. 3. Графическое представление распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП № 5 на основе математической модели (1): а) по несимметрии напряжений; б) по отклонению напряжения

Оценим расхождение результатов распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП №5, полученных на основе (1) и (2) математических моделей, по относительному среднеквадратичному отклонению:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[\operatorname{Re}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) - \operatorname{Re}(U_{\text{иск}(2)}^{\Phi B i}) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) - \operatorname{Im}(U_{\text{иск}(2)}^{\Phi B i}) \right]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^n \left[\operatorname{Re}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) \right]^2} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где n – общее количество ИИ; символы «1» и «2» соответствуют математической модели (1) или (2) соответственно.

В нашем случае δ по несимметрии напряжений составляет $6,4 \cdot 10^{-5} \%$, а по отклонению напряжения – $8,1 \cdot 10^{-4} \%$. Данные цифры позволяют сделать вывод об эквивалентности (1) и (2) математических моделей и, соответственно, их произвольном выборе для решения задачи распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП.

Проведем анализ полученных распределений ФВ. Во-первых, распределение ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП является векторной (двухмерной) величиной. Очевидно, что в таком виде ФВ не может быть использован для распределения финансовых компенсаций за понижение КЭ и необходимым является разработка соответствующего одномерного критерия. Положим в основу одномерного критерия распределения ФВ скалярное произведение ФВ в векторном виде:

$$\alpha_i = \left\langle U_{\text{иск}}^{\Phi B ИИ i}, U_{\text{иск}}^{\text{ТОП}} \right\rangle;$$

$$\Phi B_{ИИ i} = \left[\frac{|\alpha_i|}{\sum_{i=1}^n |\alpha_i|} \right] \cdot 100\%. \quad (7)$$

Такой подход означает, что данный критерий оценивает ФВ по проекциям векторных ФВ $U_{\text{иск}}^{\Phi B ИИ i}$ на суммарный вектор искажения напряжения в ТОП $U_{\text{иск}}^{\text{ТОП}}$. Опуская модуль для $|\alpha_i|$ в выражении (7) можно дополнительно учесть эффект компенсации напряжений искажения, вносимых отдельными ИИ. В рассматриваемом нами случае этот эффект наиболее

наглядно демонстрируют векторы $U_0^{\Phi B П 4}$ и $U_0^{\Phi B П 6}$ (рис. 3,а).

Во-вторых, в искажение напряжений в ТОП №5 принимают участие все ИИ СЭС. При этом ФВ ИИ, находящихся за пределами ТОП №5, может быть соизмерим или больше ФВ ИИ подключенных непосредственно к рассматриваемой ТОП.

В-третьих, возможна невязка ФВ ($U_{\text{иск}}^{\Delta} = U_{\text{иск}}^{\text{ТОП} \# 5} - U_{\text{иск}}^{\Sigma \Phi B}$) между всеми ИИ (рис. 3,б), которая обусловлена не учетом или неточностью определения искажающих частей некоторых ИИ. Для ее устранения достаточно сгруппировать неизвестные или неточно определенные ИИ, принадлежащие одному субъекту энергорынка, например, СЭС, и определить их суммарный ФВ путем исключения из общего уровня искажения напряжений в ТОП:

$$U_{\text{иск}}^{\Phi B СЭС} = U_{\text{иск}}^{\text{ТОП} \# 5} - U_{\text{иск}}^{\Sigma \Phi B П i}. \quad (8)$$

На основе вышеизложенного одномерное распределение ФВ по несимметрии напряжений в ТОП №5 будет составлять:

$\Phi B_{ИИ i}, \%$	ЭС	П1	П2	П3
	8,6·10 ⁻⁶	1,0	13,43	5,36
	П4	П5	П6	П7
	13,31	55,24	8,77	2,9

Предполагая, что искажающие части ИИ со стороны потребителей ЭЭ определены точно, а искажающие части ИИ со стороны элементов СЭС сгруппированы одномерное распределение ФВ по отклонению напряжения в рассматриваемой ТОП составит:

$\Phi B_{ИИ i}, \%$	СЭС	П1	П2	П3
	80,64	4,46	10,56	0
	П4	П5	П6	П7
	4,34	0	0	0

Из полученных результатов следует, что наибольшая часть выплат по компенсации экономических убытков для субъектов энергорынка в ТОП №5 от несимметрии напряжений ложится на потребителей ЭЭ П5 (55,24 %) и П2 (13,43 %), а от отклонения напряжения – на СЭС (80,64 %) и потребителя ЭЭ П2 (10,56 %).

Выводы. Математические модели определения ФВ линейных источников ИИ в искажение напряже-

ний в ТОП, основанные на принципах наложения и исключения, являются эквивалентными. Для оценки степени участия каждого ИИ в искажение напряжений в ТОП и распределения финансовой компенсации потерпевшей стороне между всеми ИИ разработан одномерный критерий распределения ФВ, в основе которого лежит скалярное произведение векторов. Не учет группы ИИ, принадлежащей одному субъекту энергорынка, позволяет определить их суммарный ФВ как невязку распределения ФВ между всеми ИИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. – Препринт – 253 ИЭД АН УССР. – К., 1981. – 49 с.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии // Энергосбережение. – 2004. – №1. – С. 66-69.
4. Sayenko Yu., Kalyuzhnyi D. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2015. – vol.11. – pp. 81-85. doi: 10.15199/48.2015.11.23.
5. Саенко Ю.Л., Калюжный Д.Н. Принцип наложения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения // Электрифікація транспорту. – 2015. – №10. – С. 124-128.
6. Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н. Принцип исключения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2015. – №167. – С. 31-33.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Введ. 1999-01-01. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 33 с.
8. Калюжный Д. Н. Представление линейных источников искажений в математических моделях распределения их фактических вкладов в искажение напряжений в точке общего присоединения // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 11. – С. 19-25.

REFERENCES

1. Shidlovskiy A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. *Ekonomicheskaya otsenka posledstviy s nizheniia kachestva elektricheskoy energii v sovremennukh sistemakh elektrosnabzheniia* [Economic evaluation of the effects of reducing the quality of electricity in modern power supply systems]. Kiev, IED AN USSR Publ., 1981. 49 p. (Rus).
2. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Kachestvo elektroenergii na promyshlennukh predpriatiakh* [Power quality in industrial plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p. (Rus).
3. Chepmen D. Price of low power quality. *Energoberezhenie - Energy Saving*, 2004, no.1, pp. 66-69. (Rus).
4. Sayenko Yu., Kalyuzhnyi D. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2015, vol.11, pp. 81-85. doi: 10.15199/48.2015.11.23.
5. Saenko Yu.L., Kalyuzhnyi D.N. Superposition principle in mathematical models of the factual contribution distribution of

linear sources of distortion in voltage distortion at the point of common coupling. *Elektrifikatsiya transporta - Electrification of transport*, 2015, no.10, pp. 123-133. (Rus).

6. Saenko Yu. L., Kalyuzhnyi D. N. Exclusion principle in mathematical models of distribution of the factual contribution of the linear source of distortion in voltage distortion at the point of common coupling. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka - Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2015, no.167, pp. 31-33. (Rus).
7. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Trebovaniya k kachestvu elektricheskoy energii v elektricheskikh setyah obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electric Energy. Requirements for the power quality in electric networks of general purpose]. Kiev, Gosstandart Ukrainy Publ., 1999. 33 p. (Rus).
8. Kalyuzhnyi D.N. Presentation of linear sources of distortion in the mathematical models of their factual contribution distribution in voltage distortion at the point of common coupling. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit – Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2015, no.11, pp. 19-25. (Rus).

Поступила (received) 13.01.2016

Саенко Юрий Леонидович¹, д.т.н., проф.,
Калюжный Дмитрий Николаевич², к.т.н., доц.,
¹ Приазовский государственный технический университет,
87500, Мариуполь, ул. Университетская, 7,
тел/phone +38 0629 446551, e-mail: YuriSayenko@mail.ru
² Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12,
тел/phone +38 050 5606835, e-mail: KalyuzhnyiDN@mail.ru

Yu.L. Saenko¹, D.N. Kalyuzhnyi²

¹ Pryazovskyi State Technical University,
7, Universytets'ka Str., Mariupol, 87500, Ukraine.

² O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv,
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Numerical analysis of mathematical models of the factual contribution distribution in asymmetry and deviation of voltage at the common coupling points of energy supply systems.

Purpose. Perform numerical analysis of the distribution of the factual contributions of line sources of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling, based on the principles of superposition and exclusions. **Methodology.** Numerical analysis was performed on the results of the simulation steady state operation of power supply system of seven electricity consumers. **Results.** Mathematical model for determining the factual contribution of line sources of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling, based on the principles of superposition and exclusions, are equivalent. To assess the degree of participation of each source of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling and distribution of financial compensation to the injured party by all sources of distortion developed a one-dimensional criteria based on the scalar product of vectors. Not accounting group sources of distortion, which belong to the subject of the energy market, to determine their total factual contribution as the residual of the factual contribution between all sources of distortion. **Originality.** Simulation mode power supply system was carried out in the phase components space, taking into account the distributed characteristics of distortion sources. **Practical value.** The results of research can be used to develop methods and tools for distributed measurement and analytical systems assessment of the power quality. References 8, tables 6, figures 3.

Key words: power quality, factual contribution, point of common coupling, voltage asymmetry, voltage deviation.

Г.А. Сендерович, А.В. Дяченко

АКТУАЛЬНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЗА НАРУШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

У статті розглянуті фізичні процеси при коливаннях напруги, способи вимірювання та розрахунки показників, які їх характеризують, вплив коливань напруги на електрообладнання та заходи щодо його зниження. Зроблено висновок про доцільність проведення досліджень з визначення відповідальності суб'єктів у разі перевищення коливаннями напруги допустимих значень. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: якість електроенергії, показники якості електроенергії, електромагнітна сумісність, коливання напруги, флікер, розмах зміни напруги, визначення відповідальності.

В статье рассмотрены физические процессы при колебаниях напряжения, способы измерения и расчетов показателей их характеризующих, влияние колебаний напряжения на электрооборудование и мероприятия по его снижению. Сделан вывод о целесообразности проведения исследований по определению ответственности субъектов в случае превышения колебаниями напряжения допустимых значений. Библ. 12, рис. 7.

Ключевые слова: качество электроэнергии, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость, колебания напряжения, фликер, размах изменения напряжения, определение ответственности.

Введение. Электрическая энергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует при создании других видов продукции, влияя на их качество. Понятие качества электроэнергии (КЭ) отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник (ЭП) предназначен для работы при определенных номинальных параметрах электрической энергии, которые характеризуются показателями качества электрической энергии (ПКЭ). Степень соответствия действительных и установленных ГОСТом номинальных ПКЭ характеризует КЭ.

Обеспечение требований к КЭ на месте производства не гарантирует их наличие на месте потребления, так как на ПКЭ оказывают влияние технические характеристики сети и ЭП и режимы эксплуатации. КЭ характеризуют также термином «электромагнитная совместимость». Под электромагнитной совместимостью понимают способность ЭП нормально функционировать в его электромагнитной среде (в электрической сети, к которой он присоединен), не создавая недопустимых электромагнитных помех для других ЭП, функционирующих в той же среде.

Постановка задачи. Повышение КЭ – актуальная задача развития электроэнергетики, направленная на понижение потерь электроэнергии, повышение срока службы электрооборудования, обеспечение условий нормального технологического процесса потребителей электроэнергии. Важным условием повышения КЭ в электрических сетях Украины является заинтересованность в этом субъектов распределения и потребления электроэнергии. Путь к повышению заинтересованности к обеспечению необходимого КЭ проходит через введение материальной ответственности поставщиков и потребителей за превышение допустимых отклонений ПКЭ, в частности и по колебаниям напряжения (КН).

На сегодняшний день можно говорить о том, что разработаны методы и методики определения долевого участия субъектов распределения электроэнергии в ответственности за нарушение КЭ в трехфазных си-

ловых сетях по следующим ПКЭ и их характеристикам: коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и по нулевой последовательности (K_{2U} , K_{0U}), коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения (K_U , $K_{U(n)}$), а также установившееся отклонение напряжения (δU_y). Разработана также комплексная методика, объединяющая три названные методики [1-4].

Не рассмотрены показатели, характеризующие КН: размах изменения напряжения (δU_I) и доза фликера (P_f). Эти показатели, как и предыдущие, представляют продолжительные изменения характеристик напряжения, что предполагает потенциальную возможность для изучения закономерностей их возникновения и детерминированного распределения ответственности за эти нарушения между субъектами. Выполнение разработок в данном направлении сделает определение ответственности за нарушение КЭ более полным и принципиальным, что в дальнейшем позволит разработать прибор учета, который определяет ответственность согласно действующему законодательству, и имеет гибкий алгоритм для дальнейшего усовершенствования. Такой прибор должен фиксировать отклонения по всем вышеприведенным показателям, и делать обобщенный вывод об ответственности сторон.

Целью работы является анализ научно-технической информации для определения целесообразности исследований по детерминированным расчетам долевого участия поставщиков и потребителей в нарушении КЭ по показателям колебаний напряжения.

Результаты исследований. При работе электроприемников с резкопеременной ударной нагрузкой в электрической сети возникают резкие толчки потребляемой мощности. Это вызывает изменения напряжения сети, размахи которых могут достигнуть больших значений, например, включением асинхронного двигателя с большой кратностью пускового тока. Такие явления вызываются также технологическими уста-

© Г.А. Сендерович, А.В. Дяченко

новками с быстропеременным режимом работы, который сопровождается набросами активной и реактивной мощностей, такими как привод реверсивных прокатных станов, дуговые сталеплавильные печи, сварочные аппараты и т.п.

Представим питание потребителя в виде схемы замещения (рис. 1), в которой E_{syst} – эквивалентная ЭДС системы; U – напряжение на шинах приемной подстанции; Z_{syst} – эквивалентное сопротивление связи с системой; Z_{load} – эквивалентное сопротивление нагрузки предприятия.

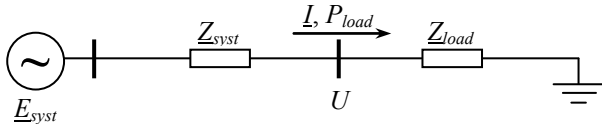


Рис. 1. Эквивалентная схема питания потребителя

Изменение напряжения U на шинах приемной подстанции, вызванное внешними по отношению к электрической сети потребителя воздействием, можно рассматривать как следствие изменения ЭДС системы E_{syst} . При допущении о неизменности сопротивления нагрузки ($Z_{load} = const$) снижение E_{syst} приводит к уменьшению тока I по линии и мощности нагрузки потребителя P_{load} , повышение E_{syst} – к увеличению I и P_{load} . На самом деле, при изменении напряжения U сопротивление нагрузки Z_{load} может несколько меняться, но в общем случае это изменение будет соответствовать положительному регулируемому эффекту активной нагрузки по напряжению [5].

Если источник КН расположен в электрической сети потребителя, то изменения напряжения U на шинах приемной подстанции происходит по причине меняющейся нагрузки при постоянной ЭДС системы ($Z_{load} = const$). Величина напряжения U будет определяться потерей напряжения на сопротивлении связи с системой Z_{syst} . Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, что характерно для распределительных сетей, то можно записать:

$$U = E_{syst} - \frac{P_{load} \cdot r_{syst} + Q_{load} \cdot x_{syst}}{U},$$

где P_{load} , Q_{load} – мощности активной и реактивной нагрузки потребителя.

Как было упомянуто выше, КН характеризуются двумя показателями [5]:

- размахом изменения напряжения (δU_i), %;
- дозой фликера (P_{st}, P_{Lt}).

Размах изменения напряжения δU_i – это величина, равная разности значений U_i и U_{i+1} следующих друг за другом экстремумов (или экстремума и горизонтального участка) огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты, определенных на каждом полупериоде в процентах от номинального напряжения:

Размах изменения напряжения вычисляют по формуле, %:

$$\delta U_i = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{nom}} \cdot 100,$$

где U_i , U_{i+1} – значения следующих один за другим экстремумов в соответствии с рис. 2.

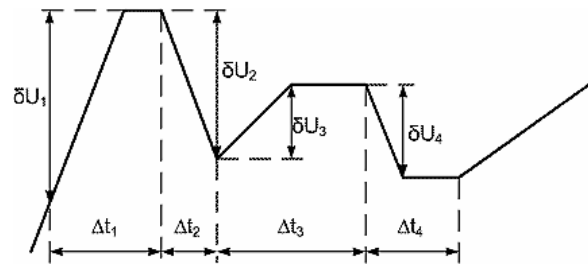


Рис. 2. Колебания напряжения

Возникая в какой-либо точке КН распространяются по системе, причем в направлении к шинам низкого напряжения практически без затухания, а к шинам высокого напряжения – с затуханием по амплитуде. Этот эффект проявляется в зависимости от мощности короткого замыкания ($S_{sc.syst}$) системы. При распространении КН в любом направлении их частотный спектр сохраняется, а коэффициент затухания или усиления ($K_{\delta U_i}$) [6] определяется соотношением:

$$K_{\delta U_i} = 1 + (S_{sc.syst} / S_{nom.t}) \cdot U_{sc},$$

где $S_{sc.syst}$ – мощность короткого замыкания системы; $S_{nom.t}$ – номинальная мощность трансформатора; U_{sc} – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Частота повторения изменений напряжения ($f_{\delta U_i}$), (1/с, 1/мин) определяется по выражению:

$$f_{\delta U_i} = m / T,$$

где m – число изменений напряжения за время, T ; T – интервал времени измерения, принимаемый равным 10 мин.

Если два изменения напряжения происходят с интервалом менее 30 мс, то их рассматривают как одно.

Интервал времени между изменениями напряжения равен:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - t_i.$$

Оценка допустимости размахов изменения напряжения осуществляется с помощью кривой зависимости допустимых размахов колебаний от частоты повторений изменений напряжения или интервала времени между последующими изменениями напряжения (рис. 3).

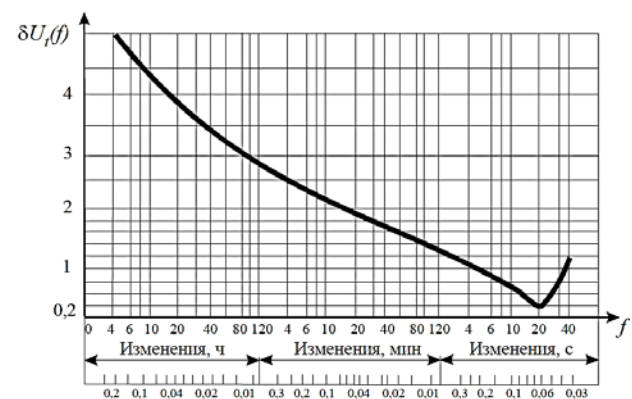


Рис. 3. Кривая допустимых значений $\delta U_i(f)$

КЭ в точке общего присоединения при периодических КН, имеющих форму меандра (прямоугольную, рис. 4), считают соответствующим требованиям стандарта, если измеренное значение размаха измене-

ний напряжения не превышает значений, определяемых по кривой рис. 3, для соответствующей частоты повторения изменений напряжения ($F_{\delta U_t}$) или интервала между изменениями напряжения ($\Delta t_{i,i+1}$).

Длительность изменения напряжения – интервал времени от начала одиночного изменения напряжения до его конечного значения [5].

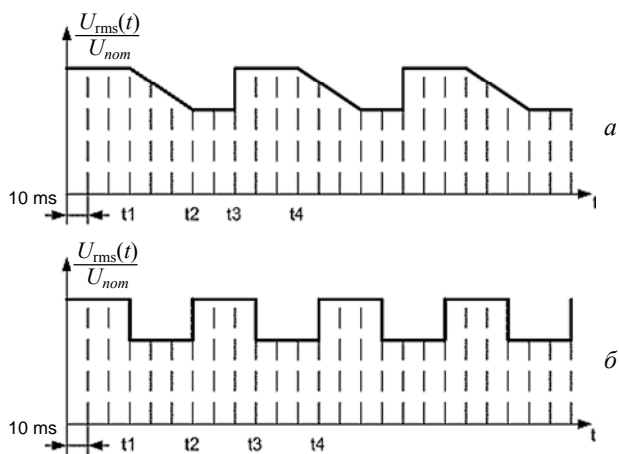


Рис. 4. Колебания напряжения произвольной формы (а) и имеющие форму меандра (б)

С другой стороны опираясь на [7] использованный там метод «парциальных реакций» [8], то объективная и однозначная оценка КН возможна только по дозе фликера.

КН электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера.

Фликер – субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники [5].

Интенсивность фликера напряжения характеризует мощность КН с учетом характерных особенностей зрительного и мозгового восприятия человеком колебаний светового потока ламп накаливания, полностью подобных КН. Лампы накаливания являются наиболее массовыми нагрузками, чувствительными к КН в большей мере, чем телевизионные приемники, компьютеры, электронные и микроэлектронные устройства управления. Интенсивность фликера выражается в безразмерных единицах; ординаты стандартной кривой допустимых значений КН $\delta U_t(f)$ (рис. 3) соответствуют значению интенсивности фликера, определенному в течение 10 мин. с вероятностью 99 % $P_{St} = 1$.

Доза фликера – это мера восприимчивости человека к воздействию колебаний светового потока, вызванных КН в питающей сети, за установленный промежуток времени, которая измеряется стандартным фликерметром.

Время восприятия фликера – минимальное время для субъективного восприятия человеком фликера, вызванного колебаниями напряжения определенной формы.

Стандартом [5] устанавливается кратковременная P_{St} и длительная доза фликера P_{Lt} (кратковремен-

ную определяют на интервале времени наблюдения, равном 10 мин, длительную на интервале – 2 ч). Исходными данными для расчета являются уровни фликера, измеряемые с помощью фликерметра – прибора, в котором моделируется кривая чувствительности (амплитудно-частотная характеристика) органа зрения человека [9].

Процесс зрительного восприятия при КН моделируется на основе теории прохождения сложного сигнала через нелинейную динамическую систему. На рис. 5 представлена АЧХ зрительного анализатора, принятая МЭК. Верхний предел частоты КН, влияющих на зрение, с учетом постоянной времени нитей ламп накаливания, составляет примерно 35 Гц при $\delta U_t \leq 10\%$ [10].

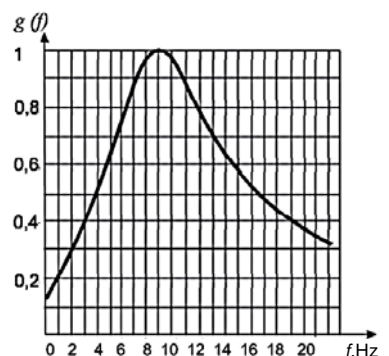


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика зрительного анализатора

где: $g(f)$ – переменный коэффициент усиления инерционной адаптивной системы (глаз), зависящий от частоты колебаний f .

Кратковременную дозу фликера (P_{St}) можно определить расчетным путем делая измерения на интервале наблюдения $T_S = 10$ мин. При этом применяется следующая формула:

$$P_{St} = \sqrt{0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_{1s} + 0,0657 P_{3s} + 0,28 P_{10s} + 0,08 P_{50s}}$$

где: $P_{0,1}, P_{1s}, P_{3s}, P_{10s}, P_{50s}$ – уровни фликера, значения которых были превышены в течение 0,1; 1; 3; 10; и 50 % времени за интервал наблюдения T_S . Индекс «s» в формуле указывает на сглаженные значения P_1, P_3, P_{10}, P_{50} . Сглаженные значения рассчитывают по следующим формулам [5]:

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3;$$

$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5;$$

$$P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3;$$

$$P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3.$$

Вследствие того, что постоянная времени прибора составляет 0,3 с, значение $P_{0,1}$ не может быстро изменяться и сглаживание для $P_{0,1}$ не требуется.

Интервал наблюдения 10 мин, применяемый при оценке кратковременной дозы фликера, удобен для оценки КН, создаваемых техническими средствами с коротким рабочим циклом. В случаях, когда необходимо учитывать суммарный эффект нескольких нагрузок, создающих помехи случайным образом (например, сварочных аппаратов, электродвигателей), или принимать во внимание источники фликера

с длительным и меняющимся рабочим циклом (например, дуговые электрические печи), необходимо оценивать длительную дозу фликера. Для этого длительную дозу фликера (P_{Lt}) определяют на основе измерений кратковременных доз фликера (P_{Stk}) применительно к периоду наблюдения, связанному с длительным рабочим циклом нагрузки или периодом, в течение которого наблюдатель может воспринимать фликер, например, несколько часов, используя выражение:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} (P_{stk})^3}$$

где P_{Stk} ($i = 1, 2, \dots, N$) — последовательные значения кратковременной дозы фликера на k -ом интервале времени T_S в течение длительного периода наблюдения T_L [5].

КЭ по дозе фликера соответствует требованиям стандарта, если кратковременная и длительная дозы фликера, определенные путем измерения в течение 24 ч или расчета, не превышают предельно допустимых значений: для кратковременной дозы фликера – 1,38 и для длительной – 1,0 (при КН с формой, отличающейся от меандра) [11].

Колебания напряжения в электрической сети приводят к следующим последствиям:

- колебаниям светового потока осветительных приборов (фликер-эффект);
- ухудшению качества работы телевизионных приемников;
- нарушению в работе рентгеновского оборудования;
- ложной работе регулирующих устройств и ЭВМ;
- нарушениям в работе преобразователей;
- колебаниям момента на валу вращающихся машин, вызывающим дополнительные потери электроэнергии и увеличенный износ оборудования, а также нарушения технологических процессов, требующих стабильной скорости вращения.

Степень влияния на работу оборудования определяется амплитудой колебаний и их частотой.

Колебания нагрузки большой мощности, например, прокатных станков, вызывают колебания момента, активной и реактивной мощности генераторов местных электростанций.

Колебания и провалы напряжения с глубиной более 10 % могут привести к погасанию газоразрядных ламп, повторное зажигание которых в зависимости от типа лампы может происходить только через значительный промежуток времени. При глубоких колебаниях и провалах напряжения (более 15 %) могут отпасть контакты магнитных пускателей, вызвав сбой в производстве.

Резкие КН отрицательно сказываются на динамике ведения поездов. Скачки тока и тягового усилия, вызываемые КН, снижают надежность работы контакторов и опасны с точки зрения возникновения буксования. Для электроподвижного состава опасны колебания порядка 4-5 %.

Увеличение потерь электроэнергии во внутризаводских сетях, вызванное КН с амплитудой в 3 %, не превышает 2 % от начального значения потерь.

На металлургических заводах КН более 3 % приводят к рассогласованию скоростей работы приводов клетей станов непрерывной прокатки металла, что снижает качество (стабильность толщины) прокатаваемой ленты.

При производстве хлора и каустической соды КН вызывают резкое увеличение износа анодов и снижение производительности.

Провалы напряжения при производстве химического волокна вызывают остановку оборудования, на повторный запуск которого затрачивается от 15 мин в случае отказа 10 % оборудования до 24 ч при отказе 100 % оборудования. Брак продукции составляет от 2,2 до 800 % от тоннажа одного технологического цикла. Время же полного восстановления технологического процесса достигает 3 суток.

Заметное влияние оказывают колебания и провалы напряжения на асинхронные двигатели малой мощности. Это представляет опасность для текстильного, бумагоделательного и других производств, предъявляющих высокие требования к стабильности скорости вращения электроприводов. В частности, КН на заводах химического волокна приводят к нестабильности вращения намоточных устройств. В результате капроновые нити либо рвутся, либо получают с неравномерной толщиной.

ГОСТ 32144-2013 определяет воздействие КН на осветительные установки, влияющие на зрение человека. Мигание ламп освещения (фликер-эффект) вызывает неприятный психологический эффект, утомление зрения и организма в целом. Степень раздражения органов зрения зависит от величины и частоты мигания. Наиболее сильное воздействие на глаз человека оказывают мигания света с частотой 3... 10 Гц, поэтому допустимые колебания напряжения в этом диапазоне минимальны: менее 0,5 %. Причем степень воздействия зависит от типа источника света. Например, при одинаковых КН лампы накаливания оказывают значительно большее воздействие, чем газоразрядные лампы [5].

КН с размахом 10...15 % могут привести к выходу из строя конденсаторов, а также вентильных выпрямительных агрегатов.

На металлургических заводах к числу приемников, чувствительных к КН, относятся станы непрерывной прокатки.

При КН возникают качания турбогенераторов. Для самих турбогенераторов такие качания не опасны, однако, передаваясь на лопатки турбины, они могут привести в действие регуляторы скорости.

Заметное влияние оказывают КН на асинхронные двигатели небольшой мощности. Колебания недопустимы для текстильного, бумагоделательного и других производств, предъявляющих особенно высокие требования к точности поддержания частоты вращения приводов, в качестве которых используют асинхронные двигатели.

Подробно исследовано влияние колебаний напряжения на электролизные установки. КН с размахом 5 % вызывают резкое увеличение износа анодов и сокращение срока службы.

КН оказывают существенное влияние на контактную сварку. Это воздействие сказывается как на

качестве самого сварочного процесса, так и ненадежности работы управления сваркой. На качество напряжения в сетях контактной сварки накладываются жесткие ограничения по размаху изменений напряжения: 5 % для сварки обычных сталей и 3 % для сварки титановых и других жаропрочных сталей и сплавов. Продолжительность допустимых КН для аппаратуры управления машинами контактной сварки ограничивается величиной не более 0,2 с во избежание ложной работы этих устройств.

КН отрицательно влияют на работу радиоприборов, нарушая их нормальную работу и снижая срок службы. Помехи в телевизионных изображениях проявляются при частотах 0,5-3 Гц и заметны, главным образом, при неподвижных изображениях.

К электроприемникам, чувствительным к КН, относятся также вычислительные машины, рентгеновские установки и т.д. При работе ЭВМ в режиме управления иногда оказывается достаточным одного-двух колебаний с размахом 1... 1,5%, чтобы возник сбой в какой-либо ячейке машины и, как следствие, возникли ошибки в командах управления или при производстве расчетов.

Мероприятия по снижению КН. Для снижения КН применяется разделение нагрузок и статические компенсаторы реактивной мощности (СТК).

Разделение нагрузок. Для разделения резкопеременной и спокойной нагрузок могут использоваться различные схемы и устройства. Наиболее простой является схема, основанная на использовании двояного реактора: спокойные и резкопеременные нагрузки подключаются к различным секциям (обмоткам) реактора (рис. 6). Благодаря тому, что коэффициент взаимной индукции между секциями $M \neq 0$, падения напряжения в каждой из них при токах нагрузки I_1 и I_2 представляются выражениями:

$$\Delta U_1 = jx_L \cdot (I_1 - k_M \cdot I_2);$$

$$\Delta U_2 = jx_L \cdot (I_2 - k_M \cdot I_1),$$

где: x_L - индуктивное сопротивление секции реактора; $k_M = M/L$ - коэффициент взаимной индуктивной связи $k_M = 0,5-0,6$.

В идеальном случае, когда $I_1 = I_2$, оказывается:

$$\Delta U = I_{1(2)} \cdot x_L (1 - k_M).$$

Падение напряжения за счет взаимной индуктивной связи уменьшается на 50-60 %. При $I_1 \neq I_2$ снижение величины ΔU будет, очевидно, меньшим. Размахи изменения напряжения зависят от сопротивления питающей энергетической системы до шин, к которым подключен реактор.

Применение этой схемы для подключения электродуговой сталеплавильной печи (ДСП - 5МТ) и позволяет в ряде случаев обеспечить на шинах «спокойной» нагрузки КН, значения которых не превосходят предельно-допустимой величины.

Применение двоянного реактора более эффективно в случае, когда коэффициент связи между обмотками (секциями) равен единице; последнее возможно при использовании реакторов со стальным магнитопроводом. В этом случае можно подобрать параметры реактора таким образом, чтобы исключить влияние падения напряжения, обусловленного

нагрузкой смежной секции в сопротивлении электрической сети.

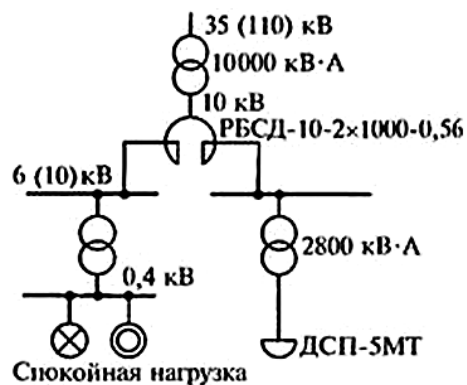


Рис. 6. Схема с применением двоянного реактора для стабилизации напряжения при ударных нагрузках

Для резкопеременных и спокойных нагрузок применяются также трансформаторы с расщепленными обмотками. В случае подключения к одной ветви обмотки НН трансформатора спокойной нагрузки, а к другой – резкопеременной связь между значениями размахов изменения напряжения на соответствующих шинах ΔU_1 и ΔU_2 можно представить в виде:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 \cdot \frac{4 - k_s}{4 + k_s},$$

где k_s - коэффициент расщепления, равный 3,34 – 3,64. В среднем принимается $k_s = 3,5$.

При выделении резкопеременной нагрузки на отдельный трансформатор общее сопротивление снижается с величины:

$$X = \frac{X_{T1} \cdot X_{T2}}{X_{T1} + X_{T2}} + X_C,$$

до величины X_C . Тогда размах КН на шинах спокойной нагрузки снижается в X_C/X раз, а на шинах резкопеременной нагрузки увеличивается в $X/(X_C + X_{T2})$ [11].

При использовании трансформаторов с расщепленными обмотками для сетей 6-10 кВ с электродуговой сталеплавильной печью небольшой мощности КН на шинах «спокойной» нагрузки также могут быть в допустимых пределах.

Снижение КН с помощью СТК. Компенсация КН в данном случае осуществляется за счет компенсации набросов реактивной мощности (РМ). Для обеспечения компенсирующего эффекта время запаздывания при генерации РМ компенсатором должно быть минимальным, чтобы не вызвать увеличение уровня КН. Так, например, при компенсации наброса РМ прямоугольной формы (рис. 7,а) с некоторым временем запаздывания Δt вместо одного появляется два наброса РМ (рис. 7,б) и уровень КН увеличивается.

Не менее важным является вопрос выбора мощности СТК. Максимальная компенсирующая способность СТК связана с максимальным размахом КН, который может быть скомпенсирован, следующим выражением:

$$Q_{k,max} = Q_{max} \cdot \left(1 - \frac{1}{P_{st}}\right),$$

где P_{st} - интенсивность фликера.

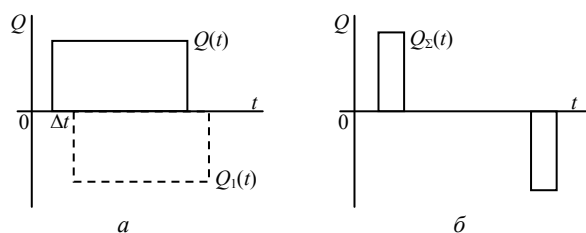


Рис. 7. Графики изменения РМ нагрузки: а) суммарный график РМ нагрузки и СТК (сплошная линия), и СТК нагрузки (пунктирная линия); б) суммарный график РМ нагрузки и СТК

Расчет по этой формуле дает завышенные результаты (погрешность 5-10 % в зависимости от степени разброса размахов КН) [12].

Кроме перечисленных мероприятий выше необходимо использовать оптимальные решения схемы электроснабжения с минимальными дополнительными затратами, к числу которых относятся:

- приближение источников высокого напряжения к электроприемников с резкопеременной нагрузкой;
- уменьшать индуктивное сопротивление линий внешнего электроснабжения (например, отказом от шинпроводов, уменьшением индуктивности реакторов);
- предусматривать питания крупных электроприемников с резкопеременной нагрузкой от отдельных линий, идущих непосредственно от источников питания (ГПП, ТЭЦ и др.);
- соблюдение оптимального уровня мощности короткого замыкания в сетях, питающих электроприемники с резкопеременной нагрузкой, в пределах 750-10000 МВА;
- для ограничения КН при самозапуске электродвигателей предусматривается снижение, по возможности, времени действия АВР и АПВ и применения быстродействующих сетевых защит, а также применение ступенчатого и частичного АВР, при котором в работе остаются только самые важные двигатели, а остальные отключаются;
- использовать параллельную работу питающих линий и трансформаторов на ГПП (при замкнутом секционном выключателе);
- для ограничения КН у потребителей потеря напряжения в линейном реакторе в нормальном режиме должна быть не более 4-5 % номинального напряжения;
- снижение сопротивления питающего участка сети. При увеличении сечения проводников линии снижается (R), а применение устройств продольной компенсации снижает суммарное (X). Недостатки, увеличиваются капитальные затраты, а применение продольной компенсации опасно повышением токов короткого замыкания при ($X \rightarrow 0$).

Выводы.

1. Проблема колебаний напряжения актуальна, так как:

- колебания напряжения оказывают негативное воздействие на зрение человека и функционирование электрооборудования;
- в сети имеется большое количество возможных источников колебания напряжения;

• существуют способы выявления и методы снижения колебания напряжения.

2. Требуется обеспечить заинтересованность субъектов процесса распределения и потребления электроэнергии в уменьшении уровня КН до допустимых значений. В качестве стимула повышения заинтересованности авторы рассматривают введение ответственности субъектов за нарушение требований к КЭ, в частности по КН.

3. Анализ литературы не выявил разработок по определению ответственности субъектов за нарушение требований к КЭ в части колебаний напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Сендерович П.Г. Алгоритм реализации методики распределения ответственности за искажение симметрии // Вісник НТУ «ХП». – 2006. – №10. – С. 7-13.
2. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Сендерович П.Г. Алгоритм реализации методики распределения ответственности за искажение синусоидальности // Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – №67. – С. 237-245.
3. Сендерович П.Г. Методика и алгоритм определения ответственности за превышение допустимого отклонения напряжения // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2006. – №43. – Т.1. – С. 59-65.
4. Сендерович П.Г. Определение ответственности за нарушение качества в приборах учета электроэнергии // Светотехника та електроенергетика. – 2006. – №7-8 – С. 48-53.
5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ).
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. – 2-е изд. М.: Интермент Инжиниринг, 2006. – 672 с.
7. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Погребняк Н.Н., Черникова Л.В., Цыганкова Н.В. Аналитический метод расчета показателей случайных колебаний напряжения в электрических сетях // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Электротехника и энергетика». – 2000. – №21. – С. 34-37.
8. Куренный Э.Г., Лютый А.П., Черникова Л.В. Метод парциальных реакций для анализа процессов на выходе линейных фильтров в моделях электромагнитной совместимости // Электричество. – 2006. – №10. – С. 11-18.
9. ГОСТ Р 51317.4.15-99 (МЭК 61000-4-15-97). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Технические требования и методы испытаний. – М., 1999.
10. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойбергер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей: Монография. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
11. ГОСТ Р 51317.4.15-2012 (МЭК 61000-4-15-2010). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и технические требования. – М.: Стандартиформ, 2012.
12. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 272 с.

REFERENCES

1. Gryb O.G., Senderovich G.A., Senderovich P.G. The algorithm implementing the methodology of distribution of responsibility for the distortion of symmetry. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2006, no.10, pp. 7-13. (Rus).
2. Gryb O.G., Senderovich G.A., Senderovich P.G. The algorithm implementation methodology for the allocation of responsibility harmonic distortion. *Kommunal'noe khoziaistvo gorodov – Communal economy of cities*, 2006, no.67, pp. 237-245. (Rus).
3. Senderovich P.G. The methodology and algorithm for determining the liability for exceeding the allowable voltage fluctuation. *Visnyk Harkivskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka - Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2006, no.43, vol.1, pp. 59-65. (Rus).
4. Senderovich P.G. Definition of the responsibility for quality infringement in devices of the electric power account. *Svetotekhnika ta elektroenergetika – Lighting Engineering and Power Engineering*, 2006, no.7-8, pp.48-53. (Rus).
5. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemah elektrosnabzheniya obshego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electrical energy. Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems]. Minsk, IPK Publishing house of standards, 1998. 30 p. (Rus).
6. Kudrin B.I. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii: uchebnik dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedenii* [Power supply of the industrial enterprises: Textbook for students of higher educational institutions]. Moscow, Interment Inzhiniring Publ., 2006. 672 p. (Rus).
7. Kurennyi E.G., Dmitrieva, E.N., Pogrebnyak N.N. Chernikova L.V., Cigankova N.V. Analytical method of calculation of random voltage oscillations indices in power electric networks. *Nauchnye trudy Donetskogo natsional'nogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Elektrotehnika i energetika»*. – *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series «Electrical Engineering and Power Engineering»*, 2000, no.21, pp. 34-37. (Rus).
8. Kurennyi E.G., Lyutyi A.P., Chernikova L.V. The partial reaction method for analyzing the processes at the output of linear filters in models for electromagnetic compatibility. *Elektrichestvo – Electricity*, 2006, no.10, pp. 11-18. (Rus).
9. GOST R 51317.4.15-99 (MEK 61000-4-15-97). *Sovmestimost' tehniceskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Flikermetr. Tehniccheskie trebovaniya i metody ispytaniy*. [State Standard GOST R 51317.4.15-99 (IEC 61000-4-15-97). Compatibility of technical equipment. Flicker meter. Technical requirements and test methods]. Moscow, 1999. (Rus).
10. Zhezhelenko I.V., Shidlovskij A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu.L., Nojberger N.A. *Ehlektromagnitnaya sovmestimost' potrebitelej* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p. (Rus).
11. GOST R 51317.4.15-2012 (MEK 61000-4-15-2010). *Sovmestimost' tehniceskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Flikermetr. Funkcional'nye i tehniccheskie trebovaniya*. [State Standard GOST R 51317.4.15-2012 (IEC 61000-4-15-2010). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Flicker meter. Functional and design specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (Rus).
12. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriatiiakh: Ucheb. posobie dlia vuzov. 3-e izd* [Indicators of quality of the electric power and their control at the industrial enterprises. Educational manual for students of higher educational institutions, 3rd ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 272 p. (Rus).

Сендерович Геннадий Аркадиевич¹, д.т.н., проф.,
Дяченко Александр Васильевич¹, аспирант,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 095 2098150,
e-mail: senderovichg@mail.ru, alex.7491@mail.ru

G.A. Senderovich¹, A.V. Diachenko¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The relevance of determining responsibility for violation of power quality in terms of voltage fluctuations.

Purpose. The purpose of work is the analysis of scientific and technical information for determination of expediency of researches on the determined calculations of individual share of suppliers and consumers in violation of quality of electric energy on indicators of fluctuations of voltage. **Methodology.** Today the indicators characterizing fluctuations of voltage aren't considered: scope of change of voltage (δU) and dose of a flicker (P). These indicators represent long changes of characteristics of tension that assumes potential opportunity for studying of regularities of their emergence and the determined distribution of responsibility for these violations between subjects. **Results.** As showed by results of research: fluctuations of voltage make negative impact on sight of the person and functioning of the electric equipment; in a network there is a large number of possible sources of fluctuation of tension; there are ways of identification of fluctuation of voltage; there are methods of decrease in fluctuation of voltage. The analysis of literature didn't reveal development by definition of responsibility of subjects for violation of requirements to quality of electric energy regarding fluctuations of voltage. **Originality.** Performance of development in this direction will make definition of responsibility for violation of quality of electric energy fuller and basic. **Practical value.** This research will allow to develop further the metering device which defines responsibility according to the current legislation, and has flexible algorithm for further improvement. to the legislation, also has flexible algorithm for further improvement. References 12, figures 7.

Key words: quality of the electric power, indicators of quality of the electric power, electromagnetic compatibility, fluctuations of tension, flicker, scope of change of tension, definition of responsibility.

Е.И. Сокол, О.Г. Гриб, С.В. Швец

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ СЕТЕЦЕНТРИЗМА

У статті розглянуті тенденції розвитку і принципи організації інтелектуальних енергосистем при введенні поняття сетецентризма в умовах ідеології Smart Grid. У якості рішення задач вказаної проблематики пропонується створення активно-адаптивної системи, яка реалізує концепцію «обслуговування системи на основі відклику». Бібл. 9.

Ключові слова: Smart Grid, сетецентрична система управління, активно-адаптивна система обслуговування енергосистем, результативний фактичний відклик.

В статье рассмотрены тенденции развития и принципы организации интеллектуальных энергосистем при введении понятия сетецентризма в условиях идеологии Smart Grid. В качестве решения задач указанной проблематики предлагается создание активно-адаптивной системы, реализующей концепцию «обслуживания системы на основе отклика». Библ. 9.

Ключевые слова: Smart Grid, сетецентрическая система управления, активно-адаптивная система обслуживания энергосистем, результативный фактический отклик.

Введение и постановка проблемы. В электроэнергетических системах мира и Украины не первый год идет работа по «интеллектуализации сетей» – Smart Grid (SG). В настоящий момент идеология построения интеллектуальных сетей энергообеспечения SG [1] (термин введен Майклом Барром (Michael T. Burr) в 2003 г. [2]), – одна из наиболее существенных и развиваемых при модернизации глобальной энергетики. В США и Западной Европе реализуется ряд крупных, а также более мелких проектов по переходу электроэнергетики и ЖКХ на «интеллектуальные сети» SG [3]. Принципиально новыми являются подходы, при которых ведущая роль отводится ядру энергосистемы – электрической сети как структуре, обеспечивающей эффективность связи генерации и потребителя.

В то же время пока не существует комплексной концепции формирования структурно-параметрической организации элементов энергосистемы и информационно-интеллектуальных основ повышения эффективности управленческих технологий на основе SG.

Анализ последних исследований и публикаций. Предпосылки интереса мирового сообщества к идее развития концепции SG очевидны: растут показатели потребления ресурсов, повышается стоимость производства электроэнергии, существующие сети поставки энергоресурсов резко реагируют на колебания в экономической сфере.

С ростом требований мирового сообщества используемые модели производства и поставки энергетических ресурсов перестают быть удовлетворительными; например, текущий объем потерь электроэнергии в сетях Украины составляет более 25 % [4]. Эти и другие причины подталкивают правительства и энергогенерирующие предприятия различных стран к скорейшей реализации принципов концепции SG.

В целом к сетям энергоснабжения, развиваемым в рамках концепции SG, можно выдвинуть следующие требования: адаптивность,

эффективность, доступность и возможность обратной связи, надежность, информационная обеспеченность, усложнение и интеграция функций SG [5].

В настоящий момент наиболее остро стоит проблема развития энергосистем как одного из элементов электроэнергетической системы Украины с целью повышения эффективности использования энергоресурсов и снижения цен для потребителей.

Цель исследований – разработка показателей структурно-параметрической организации эффективной активно-адаптивной системы обслуживания энергосистем в условиях идеологии Smart Grid.

Основные материалы исследований. В настоящее время наблюдается эволюция развития энергетических систем – от простейших форм, использующих элементарные сетевые технологии в энергетике, к более сложным формам в рамках концепции SG с элементами сетецентрического характера, которые основываются на интернет-технологиях последнего поколения и реализуют модели энергетической деятельности.

Концепция сетецентричности подразумевает формирование и поддержание в актуальном состоянии единого для всей системы образа реальной ситуации в максимально понятном и простом виде. Используемое информационное поле должно позволять воспринимать весь образ системы как единое целое на данном временном промежутке с учетом отклика системы на текущие изменения ее состояния под воздействием различных факторов.

Успешное решение задач управления в рамках сетецентрического подхода заключается в поддержании этого образа в максимально полном и достоверном состоянии и реализации положений принципа Situational Awareness [6] (комплексное интегрированное восприятие и анализ в интересах единой системы).

Сложившаяся информационная инфраструктура в Украине с ее традиционной, оправданной практикой решения инфо-коммуникационных проблем в

сложных условиях территориального, технического и природно-климатического характера, требует новых подходов с учетом необходимости решения задач по переходу страны на инновационный путь развития. Следует рассмотреть и использовать новые принципы построения активно-адаптивных энергосистем на основе концепции сетецентричности. Среди основных из них – использование всех видов информации, развитие традиционных и новых источников информации на основе адаптивных принципов структурно-параметрической организации элементов энергосистем; повышение качества, безопасности и надежности сбора, обработки, хранения, распределения информации.

Современный этап внедрения технологий SG в энергосистему Украины характеризуется зависимостью процессов формирования «интеллектуальных сетей» от зарубежных технологических решений. Причиной является определенно выраженная недостаточность в сетевом информационно-аналитическом и экспертно-аналитическом обеспечении экономики Украины, а именно:

- технические, организационные и правовые проблемы сбора и обработки экспертной информации, используемой для принятия управленческих решений [7];
- отставание во внедрении современных информационных средств и систем управления стратегического уровня в электроэнергетике [8].

При рассмотрении эксплуатационных особенностей энергосистем часто возникает необходимость проведения ремонтных и регламентных работ. С внедрением положений сетецентризма предлагается использовать концепцию «обслуживания системы на основе отклика» (ОСО). Данная концепция позволяет повысить возможности ремонтных подразделений высоковольтных линий и подстанций по их применению не по распределенным объектам. Внедрение концепции ОСО направлено на обслуживание конкретного объекта (цифровой подстанции, линии электропередачи, подсистемы мониторинга состояния элементов энергосистемы и т.д.), находящегося в конкретном районе и в конкретное время, и который в настоящий момент требует обслуживания в соответствии с откликом системы. В связи с этим появляется возможность в сокращении общей численности привлекаемых подразделений за счет их точечной и более эффективной работы.

Для настоящей сетецентрической системы управления нет препятствий в количестве подразделений, в масштабах действий по восстановлению работоспособного состояния высоковольтных линий и цифровых подстанций. Существуют только препятствия в эффективности работы ремонтных бригад, то есть, в способности выделенным нарядом сил и средств выполнить с достаточной эффективностью в назначенное время восстановление работоспособности составляющего элемента энергосистемы.

Для построения эффективной активно-адаптивной системы обслуживания энергосистем (СОЭ), построенной на принципах сетецентризма, необходимо, чтобы она базировалась на превосходстве систем связи, позволяющих в реальном масштабе времени получать и передавать огромными пакетами информацию различным потребителям, включая и централизованную и распределенную передачу. СОЭ указанного типа управления должна основываться на всесторонней подготовке состава ремонтных бригад, эксплуатирующих данную систему. Такой подход позволит значительно сократить обслуживающий персонал и перераспределить обязанности членов бригады на выполнение свойственных именно их должности задачам.

Одним из основных элементов предлагаемой СОЭ может выступать беспилотный летательный аппарат – БПЛА (квадрокоптер, мультикоптер, гексакоптер и т.д.) [9]. Режим функционирования БПЛА определяется перечнем выполняемых СОЭ задач в рамках основных задач энергосистемы. Среди них – контроль оператором текущих событий на объектах энергосистем, контроль выполнения ремонтных операций при восстановлении высоковольтных линий, контроль выполнения требований по охране труда и работе с высоким напряжением, дистанционное управление подачей напряжения после окончания цикла восстановления работоспособного состояния энергосистемы на соответствующих участках высоковольтных линий и т.д.

Задача синтеза СОЭ в общей постановке сводится к использованию системного подхода. Предлагается для решения указанной задачи применить обобщающий показатель эффективности выбора варианта структуры системы СОЭ, использующий концепцию ОСО.

Общая постановка задачи синтеза имеет следующий вид:

$$W = \max \{OE_v(x) - OE_b(x)\}, \text{ при } x \in X;$$

$$C_{nz} \rightarrow \min,$$

где $OE_v(x)$ – обобщающий эффект при реализации внедряемого варианта СОЭ; $OE_b(x)$ – обобщающий эффект при реализации базового варианта структуры СОЭ; X – область допустимых решений; C_{nz} – непроизводительные затраты.

Этот показатель строится в виде разности обобщающих эффектов: внедряемого варианта структуры системы СОЭ и базового.

Выражение для обобщающего эффекта синтезируемой структуры СОЭ будет иметь вид:

$$OE_v(x) = \left(\sum_{i=1}^n P_i P_{ci} P_{wvi} k_{gi} (RO_{fi} - C_i) \times \right. \\ \left. \times \prod_{j=1}^k \exp(-\{\lambda_{qij} + \lambda_{cij}\} t_{pij}) \right) - C_d, \quad (1)$$

где P_i – априорная вероятность требования на выполнение соответствующей подсистемой i -той задачи; P_{ci} – вероятность того, что не будет срыва

выполнения i -той задачи из-за отсутствия работоспособной подсистемы; P_{wwi} – вероятность того, что не будет срыва выполнения i -той задачи из-за настройки i -той подсистемы неисправным средством; κ_{gi} – коэффициент готовности i -той подсистемы; RO_{fi} – стоимостное выражение результативного фактического отклика при выполнении i -той задачи; C_i – затраты, связанные с реализацией выбранного варианта подсистемы технического обслуживания для i -той подсистемы и измерением параметров этой подсистемы в процессе эксплуатации; λ_{qij} , λ_{cij} – интенсивности явного и скрытого отказов j -го компонента i -той подсистемы; t_{pij} – время, за которое рассматриваются явный и скрытый отказы; C_d – затраты, связанные с функционированием системы СОЭ.

Используя понятие концепции ОСО для системы СОЭ выражения для RO_{fi} и C_i будут иметь вид:

$$\begin{aligned} RO_{fi} &= RO_{bi} + RO_{ci}; \\ C_i &= C_{bi} + C_{ci}, \end{aligned} \quad (2)$$

где RO_{bi} и C_{bi} – стоимостное выражение результативного безусловного фактического отклика и затрат, зависящих от решения i -той задачи соответствующей подсистемой; RO_{ci} и C_{ci} – стоимостное выражение результативного фактического отклика и затрат, обусловленных введением концепции ОСО.

В общем случае для установившегося режима эксплуатации системы СОЭ:

$$\begin{aligned} RO_{bi} &= \sum_{j=1}^m P_{ij} \sum_{k=1}^m P_{ijk} RO_{ijk}; \\ C_{bi} &= \sum_{j=1}^m P_{ij} \sum_{k=1}^m P_{ijk} C_{ijk}, \end{aligned} \quad (3)$$

где P_{ij} – вероятность нахождения i -той подсистемы в каждом из j -х состояний в процессе эксплуатации; RO_{ijk} , C_{ijk} – стоимостное выражение результативного фактического отклика и затрат, получаемых от применения по назначению i -той подсистемы при переходе из состояния j в состояние k ; P_{ijk} – вероятность перехода i -той подсистемы из состояния j в состояние k в процессе решения текущей задачи.

Значения RO_{ci} и C_{ci} описываются выражениями:

$$RO_{ci} = \sum_{j=1}^Z P_{ij} (RO_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) PO_{cpbij}(t_{sij}); \quad (4)$$

$$C_{ci} = \sum_{j=1}^Z P_{ij} (C_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) C_{cpbij}(t_{sij}), \quad (5)$$

где $RO_{cpij}(t_{sij})$ и $C_{cpij}(t_{sij})$ – составляющие результативного фактического отклика и затрат j -той компоненты i -той подсистемы для t_{sij} -того времени обслуживания; $RO_{cpbij}(t_{sij})$ и $C_{cpbij}(t_{sij})$ – безусловные составляющие результативного фактического отклика и затрат j -той компоненты i -той подсистемы для t_{sij} -того времени обслуживания.

Значения RO_{ijk} и C_{ijk} будут определяться матрицами значений случайной дискретной

величины в установившемся режиме эксплуатации системы СОЭ:

$$[RO_{ijk}] = \begin{bmatrix} RO_{i11} & RO_{i12} & \dots & RO_{i1k} \\ RO_{i21} & RO_{i22} & \dots & RO_{i2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ RO_{ik1} & RO_{ik2} & \dots & RO_{ikk} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Значения $RO_{cpij}(t_{sij})$ и $C_{cpij}(t_{sij})$ описываются матрицами, аналогично выражениям (6). Значения этих матриц выбирают для соответствующего времени t_{sij} .

В процессе эксплуатации системы СОЭ возникают ситуации, когда j -тая компонента i -той подсистемы может находиться на обслуживании, не учитывая характер концепции ОСО, а зависящим от надежности используемых средств, что обуславливает наличие составляющих $RO_{cpij}(t_{sij})$ и $C_{cpij}(t_{sij})$. Эти составляющие также описываются матрицами типа (6).

Учитывая выражения (2) – (5), и приняв во внимание, что составляющие RO_{ijk} , C_{ijk} , $RO_{cpij}(t_{sij})$, $C_{cpij}(t_{sij})$ описываются выражениями типа (6), получим выражение адаптивного показателя обобщающего эффекта синтеза структуры СОЭ, который модифицирован для концепции ОСО:

$$\begin{aligned} OE_v &= \sum_{i=1}^n P_i \kappa_{gi} \times \prod_{j=1}^N (1 - (\beta_{ij} + (1 - \beta_{ij}) P_{1ij})) \times \\ &\times \left(\frac{1 - P_{2ij}}{P_{1ij}(P_{1ij} + P_{2ij})} \right) \times \left[\sum_{j=1}^L P_{ij} \times \sum_{k=1}^M P_{ijk} (RO_{ijk} - C_{ijk}) + \right. \\ &+ \sum_{j=1}^Z \{ P_{ij} (RO_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) RO_{cpbij}(t_{sij}) - \\ &- P_{ij} (C_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) C_{cpbij}(t_{sij}) \}] \times \\ &\times \prod_{j=1}^V \exp(-(\lambda_{qij} + \lambda_{cij}) t_{pij}) - (P_u (C_u + (K_p + E) K + C_m)), \end{aligned} \quad (7)$$

где β_{ij} – вероятность скрытого отказа j -той компоненты i -той подсистемы; P_{1ij} – вероятность нахождения j -той компоненты i -той подсистемы в исправном и работоспособном состоянии; P_{2ij} – вероятность нахождения j -той компоненты i -той подсистемы в состоянии применения со скрытым отказом; P_u – вероятность принятия в эксплуатацию системы СОЭ; C_u – текущие годовые издержки на эксплуатацию системы СОЭ; K_p – норма реновации (обновления) компонент системы СОЭ; K – нормативный коэффициент экономической эффективности; E – единовременные затраты при вводе в эксплуатацию системы СОЭ; $P_{ij}(t_{sij})$ – вероятность обслуживания i -той подсистемы продолжительностью t_{sij} по причине ложного или скрытого отказов; C_m – фонд заработной платы обслуживающего персонала.

Выводы. В условиях применения «Smart Grid – возможностей» для повышения интеллектуализации электроэнергетической системы Украины с активно-адаптивной сетью электроснабжения возникает необходимость внедрения принципа сетцентризма в

структурно-параметрическую организацию элементов энергосистем. Эта оптимизация элементов энергосистем в условиях сетцентризма и концепции SG влечет за собой использование положений теории систем и понятий многокритериального оптимизационного синтеза. Предлагаемая модификация адаптивного показателя обобщающего эффекта синтеза структуры СОЭ, которая учитывает концепцию ОСО, при наличии ложных и истинных отказов, позволит уточнить процедуру отбора конкурентоспособных вариантов с целью определения множества допустимых структур, отвечающих требованиям целевой функции синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SMART GRID [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
2. Michael T. Burr. Technology corridor: Reliability demands will drive automation // *Fortnightly Magazine*. – November 1 2003. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor?page=0%2C0>.
3. Дорофеев В.В. Интеллектуальная сеть. Новые принципы построения. Оборудование и системы управления интеллектуальной сети // Доклад на заседании круглого стола по теме «Умные сети – Умная энергетика – Умная экономика». – СПб. 17.06.2010. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/media/File/press_centre/speeches/Presentation_dorofeev.pdf.
4. Быкова О., Абязов П. Куда движется электроэнергетика? [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671>.
5. 10 трендов рынка SMART Grid в 2012 году. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10_trendov_rynka_smart_grid_v_ssha.
6. Mica R. Endsley, Daniel J. Garland. *Situation Awareness Analysis and Measurement*. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, 2000. – 383 p. ISBN 08058-2134-1.
7. Сетевая экспертиза. 2-е изд. / Под ред. Д.А. Новикова, А.Н. Райкова. – М.: Эгвес, 2011. – 166 с.
8. Косянчук Т.Ф. Діагностика конкурентного потенціалу підприємства // Наукові записки. Серія «Економіка». – 2013. – Випуск 23. – С. 51-54.
9. Электронный ресурс / Режим доступа: http://quadrocopter.ua/quadrocopters_copters/

REFERENCES

1. SMART GRID. Available at: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm> (Accessed 12 May 2014).
2. Michael T. Burr. Technology corridor: Reliability demands will drive automation. *Fortnightly Magazine*, 2003, November 1. Available at: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor?page=0%2C0> (Accessed 15 June 2004).
3. Dorofeyev V.V. Intellectual network. New principles of construction. The equipment and control systems of an intellectual network. *Report at a meeting of a round table on the subject «Clever Networks – Clever Power – Clever Economy»*, Saint Petersburg, 2010. Available at: http://www.fsk-ees.ru/media/File/press_centre/speeches/Presentation_dorofeev.pdf. (Rus).
4. Bykova O., Abyazov P. *Where the power industry moves?* Available at: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671> (Accessed 24 November 2015). (Rus).
5. *10 trends of the SMART Grid market in 2012*. Available at:

- http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10_trendov_rynka_smart_grid_v_ssha (Accessed 02 April 2013). (Rus).
6. Mica R. Endsley, Daniel J. Garland. *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, 2000. 383 p. ISBN 08058-2134-1.
 7. *Network examination. 2nd prod.* Edited by D.A. Novikov, A.N. Raykov. Moscow, Egves Publ., 2011. 166 p. (Rus).
 8. Kosyanchuk T.F. Diagnosis of the competitive potential of the company. *Scientific notes. Series «Economy»*, 2013, no.23, pp. 51-54. (Ukr).
 9. Available at: http://quadrocopter.ua/quadrocopters_copters (Accessed 11 July 2015).

Поступила (received) 05.02.2016

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф.,

Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,

Швец Сергей Викторович², к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

²Харьковский национальный университет

городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,

61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17,

тел/phone +38 067 7680838, e-mail: se_sx@bk.ru

Y.I. Sokol¹, O.G. Gryb¹, S.V. Shvets²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The structural and parametrical organization of elements

of a power supply system in the conditions of network centrism.

Purpose. Development of indicators of the structural and parametrical organization of effective active and adaptive system of service of power supply systems in the conditions of ideology of Smart Grid. **Methodology.** In the conditions of application of ideology of Smart Grid for increase of intellectualization of electrical power system there is a need of introduction of the principle of a network centrism in the structural and parametrical organization of elements of power supply systems that involves performance of conditions on implementation of provisions of the principle of Situational Awareness. The essence of this principle consists in that, information on a condition of system has to be presented in the form convenient for the analysis, recognition, transfer, distribution and storage, to be coordinated for flexible and optimum development at the subsystem and object-by-object levels. **Results.** Structural and parametrical optimization of elements of power supply systems in the conditions of a network centrism and the concept of SG involves use of provisions of the theory of systems and concepts of multicriteria optimizing synthesis. It is offered to use the modified adaptive indicator of the generalizing effect of synthesis of structure of active and adaptive system of service of power supply systems in the form of a difference of the generalizing effects: the introduced option of structure of system and basic. **Originality.** Introduction of an adaptive indicator of synthesis of system of service of power supply systems considers the concept of «service of system on the basis of a response» in the presence of false and true refusals. **Practical value.** Use of the specified indicator will allow to specify procedure of selection of competitive options for the purpose of definition of a set of admissible structures which meet the requirements of criterion function. References 9. **Key words:** Smart Grid, network-centric control system, active and adaptive system of service of power supply systems, productive actual response.

Е.И. Сокол, М.М. Резинкина, О.Г. Гриб, В.И. Васильченко, А.А. Зуев, А.В. Бортников, Е.В. Сосина

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УКРАИНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Стаття присвячена опису алгоритму комплексного автоматизованого моніторингу об'єктів енергетичної системи України, спрямованого на забезпечення безпеки функціонування її встаткування та персоналу. Даний моніторинг буде використовувати безпілотні повітряні апарати (БППА) для планової і позапланової реєстрації стану ліній електропередачі (ЛЕП) та високовольтних підстанцій (ВП). Передбачається, що позапланові обльоти будуть здійснюватися при аварійних ситуаціях на ЛЕП. За допомогою БППА будуть записуватися з повітря картини ЛЕП і ВП в оптичному і інфрачервоному діапазонах, а також виміряться напруженості їх електричного (ЕП) і магнітного (МП) полів уздовж траси прольоту. Використання спеціально розробленого програмного забезпечення дозволить зрівняти картини, що реєструються БППА з попередньо створеними еталонними картинками, які відповідають штатним режимам роботи контрольованих ЛЕП і ВП. Такі еталонні картини в сукупності з експериментально отриманими картами захисних заземлень ВП будуть зведені в єдиний документ – паспорт ВП і ЛЕП. Даний паспорт повинен містити також обмірювані і розраховані значення рівнів напруженостей ЕП і МП у місцях перебування персоналу енергетичних об'єктів і розташування встаткування, найбільш уразливого до впливу електромагнітних завад. При необхідності в рамках виконання проведеного моніторингу будуть дані рекомендації з конструкції та розташування електромагнітних екранів, які знижують рівні електромагнітних впливів, і по розташуванню блискавковододів, що зменшують імовірність поразки блискавкою досліджуваних об'єктів. У роботі приводяться аналітичні вирази, які лягли в основу розробленого програмного забезпечення для розрахунку напруженості ЕП в околиці ЛЕП. Дане програмне забезпечення буде використано в якості базового при навігації БППА уздовж ЛЕП, а також для розпізнавання порушень у роботі ЛЕП. Наведене також порівняння розподілів напруженості ЕП, розрахованих за допомогою даного програмного забезпечення, з даними, відомими з літератури. Відмінність пропонованої методики моніторингу від існуючих полягає в тому, що комплексний контроль ряду параметрів, що характеризують зовнішній стан об'єктів енергосистеми, а також її основні електричні параметри будуть повністю автоматизовані. Це стане можливим у результаті використання спеціально розробленого програмного забезпечення по розпізнаванню оптичних і інфрачервоних зображень, а також картин ліній рівної напруженості ЕП і МП. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: лінії електропередачі, електричне та магнітне поле, автоматизований моніторинг, безпілотні повітряні апарати.

Статья посвящена описанию алгоритма комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины, направленного на обеспечение безопасности функционирования ее оборудования и персонала. Данный мониторинг предполагает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для плановой и внеплановой регистрации состояния линий электропередачи (ЛЭП) и высоковольтных подстанций (ВП). Предполагается, что внеплановые облеты будут производиться при аварийных ситуациях на ЛЭП. С помощью БПЛА будут записываться с воздуха картины ЛЭП и ВП в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также измеряться напряженности их электрического (ЭП) и магнитного (МП) полей вдоль трассы пролета. Использование специально разработанного программного обеспечения позволит сравнить регистрируемые БПЛА картины с предварительно созданными эталонными картинками, соответствующих штатным режимам работы контролируемых ЛЭП и ВП. Такие эталонные картины в совокупности с экспериментально полученными картами защитных заземлений ВП будут сведены в единый документ – паспорт ВП и ЛЭП. Данный паспорт должен содержать также измеренные и рассчитанные значения уровней напряженностей ЭП и МП в местах пребывания персонала энергетических объектов и расположения оборудования, наиболее уязвимо к воздействию электромагнитных помех. При необходимости в рамках выполнения проводимого мониторинга будут даны рекомендации по конструкции и расположению электромагнитных экранов, снижающих уровни электромагнитных воздействий, и молниеотводов, уменьшающих вероятность поражения молнией исследуемых объектов. В работе приводятся аналитические выражения, которые легли в основу разработанного программного обеспечения для расчета напряженности ЭП в окрестности ЛЭП. Данное программное обеспечение будет использовано в качестве базового при навигации БПЛА вдоль ЛЭП, а также для распознавания нарушений в работе ЛЭП. Приведено также сравнение зависимостей напряженности ЭП, рассчитанных с помощью данного программного обеспечения, с данными, известными из литературы. Отличие предлагаемой методики мониторинга от существующих состоит в том, что комплексный контроль ряда параметров, характеризующих внешнее состояние объектов энергосистемы, а также ее основных электрических параметров будут полностью автоматизированы. Это станет возможным в результате использования специально разработанного программного обеспечения по распознаванию оптических и инфракрасных изображений, а также картин линий равной напряженности ЭП и МП. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: линии электропередачи, электрическое и магнитное поле, автоматизированный мониторинг, беспилотные летательные аппараты.

Введение. В настоящее время проблема обеспечения энергетической безопасности Украины весьма актуальна. При этом особое значение приобретает мониторинг состояния систем передачи электроэнер-

гии от производителя к потребителю. Такой мониторинг должен быть направлен на предотвращение аварийных отключений линий электропередачи (ЛЭП), а также скорейшего восстановления их работоспособ-

ности, если такое отключение произошло. К наиболее перспективным современным методам диагностики состояния ЛЭП относится мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Такой мониторинг получил развитие в Российской Федерации (РФ) [1], а также в Европе [2], Китае [3], Бразилии [4] и других странах. При этом осуществляется контроль состояния ЛЭП путем ее оптической регистрации, регистрации с помощью тепловизоров, а также регистрации частичных разрядов, имеющих место в изоляции.

Как показывает анализ причин отказов ЛЭП в РФ, энергосистема которой весьма похожа на энергосистему Украины, они в основном происходят на ЛЭП 110 кВ – 86 %, 11 % – на ЛЭП 220 кВ и 3 % ЛЭП 330-750 кВ (см. [1]). Такое распределение числа отказов пропорционально длине соответствующих ЛЭП. Наибольшее число аварийных отключений ЛЭП в РФ вызвано повреждением проводов и грозозащитных тросов – 56 %. Другими причинами, вызывающими отключения ЛЭП, являются такие повреждения как пробой изоляторов – 19 %, повреждения опор – 15 % и других элементов ЛЭП – 10 %. Согласно имеющейся статистике, резкое возрастание аварийных отключений ЛЭП происходит в весенне-летний период из-за перекрытий изоляционных промежутков зелеными насаждениями. Велико также число аварийных отключений ЛЭП из-за вандализма, такого как разрушение гирлянд изоляторов, похищение проводов и элементов опор ЛЭП, набросы на провода ЛЭП и др. [1].

Постановка задачи. Исходя из вышеизложенного, оперативный контроль состояния ЛЭП, а также высоковольтных подстанций, являющихся неотъемлемой частью системы энергоснабжения, и устранение причин аварийных отключений оказывается весьма эффективным.

Целью данной работы является разработка алгоритма комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины, направленная на обеспечение ее безопасного функционирования

Материалы исследований. Алгоритм выполнения мониторинга объектов энергетической системы Украины. Известны запатентованные технические решения, целью которых является обеспечение управления движением БПЛА с помощью измерения напряженности электрического (ЭП) или магнитного поля (МП) [5, 6]. Данные решения могут быть использованы для разработки методики мониторинга безопасности объектов энергетической системы Украины. Такая методика предусматривает создание паспортов – эталонов, описывающих функционирование ЛЭП и высоковольтных подстанций в штатном режиме. Данные паспорта – эталоны должны включать оптические изображения исследуемых объектов и их изображения в инфракрасном диапазоне, полученные с помощью тепловизоров. В состав таких паспортов должны входить также карты уровней напряженности электрического и магнитного полей, полученных с помощью расчетов и измерений на определенных расстояниях над линиями ЛЭП, а также на определенных

расстояниях над высоковольтными подстанциями. Предполагается, что БПЛА будут с заданной периодичностью производить аэрофотосъемку исследуемых объектов в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также измерять напряженности их ЭП и МП. Предполагается, что внеплановые облеты будут производиться при аварийных ситуациях на ЛЭП для определения места и характера повреждений. Сравнение с помощью разработанного программного обеспечения данных, регистрируемых при облетах БПЛА, с данными паспорта – эталона исследуемого объекта позволит принимать оперативные решения по его текущему состоянию: устранять возникшие нарушения, наличие которых может привести к аварийным отказам, или находить места аварий, если их не удалось избежать.

Использование автоматизированной системы для сравнения наиболее значимых параметров, описывающих штатное функционирование исследуемых объектов (ЛЭП и высоковольтных подстанций), позволит также предотвратить несанкционированный отбор мощности из энергосистемы. Анализ таких параметров может быть использован для оптимизации как режимов работы, так и структуры самих исследуемых энергетических объектов.

Такие паспорта должны также включать карты расположения систем защитного заземления высоковольтных подстанций, имеющих ключевое значение для обеспечения безопасности функционирования персонала и оборудования. Причем, такие карты должны быть получены в результате измерений напряженности МП при протекании тока по защитному заземлению. Для этого получения достоверной информации о текущем состоянии системы защитного заземления (СЗЗ) предполагается подсоединять к ней генератор токов и измерять напряженность МП над поверхностью земли. Полученная таким образом карта будет отражать истинное расположение элементов системы защитного заземления. Это даст возможность оценить степень надежности защиты исследуемого объекта системой защитного заземления в различных аварийных режимах короткого замыкания и, при необходимости, разработать рекомендации по восстановлению вышедших из строя участков СЗЗ, а также ее доукомплектованию и модернизации. Полученные таким образом данные о расположении элементов системы защитного заземления вводятся как исходные в разработанное программное обеспечение, позволяющее построить распределения линий равного потенциала и напряженности ЭП на поверхности земли, определить уровни шаговых напряжений и напряжений прикосновения, а также полное сопротивление системы заземления. По данным картин делаются выводы о надежности существующей системы защитного заземления. При необходимости в рамках выполнения проводимого мониторинга будут даны рекомендации по конструкции и расположению электромагнитных экранов, использование которых позволяет снизить уровни электромагнитных воздействий [7].

Еще одной важной системой, обеспечивающей безопасную работу энергетических объектов, является

их система молниезащиты. С помощью разработанного программного обеспечения по методике [8] будут построены картины распределения вероятности попадания молний на территории высоковольтных подстанций и, при необходимости, даны рекомендации по доукомплектованию и модернизации существующей системы молниезащиты.

С помощью карт распределений напряженностей ЭП и МП при работе ЛЭП и высоковольтных подстанций, полученных в результате измерений и проведенных расчетов напряженностей ЭП и МП, а также достоверных карт системы защитного заземления и молниезащиты должны быть составлены планы безопасного перемещения технического персонала высоковольтных подстанций, а также расположения оборудования, особо чувствительного к возможным электромагнитным воздействиям, на их территории.

Для разработки системы мониторинга безопасности объектов энергетической системы необходимы методики расчета напряженности ЭП и МП. Причем, при отсутствии персонала в зоне действия ЭП могут быть применены аналитические методы.

Основным параметром, характеризующим электромагнитное поле ЛЭП, который не зависит от вида нагрузки ЛЭП, является напряженность ЭП. Остановимся подробнее на принципах, которые легли в основу программного обеспечения, разработанного для реализации предлагаемой методики комплексного мониторинга объектов энергетической системы.

Аналитические методы расчета ЭП ЛЭП.

Для использования аналитических методов при расчете напряженности электрического поля ЛЭП должны быть приняты следующие допущения:

- провода ЛЭП полагаются параллельными бесконечно длинными цилиндрами, заряд которых равномерно распределен вдоль их осей;
- напряжение на проводах ЛЭП изменяется по синусоидальному закону с частотой 50 Гц;
- сдвиг фаз во времени между напряжениями проводов ЛЭП равняется 120° ;
- поверхность земли считается плоской, а самая земля по отношению к воздуху абсолютно электропроводной и имеющей нулевой потенциал;
- наличие опор, сооружений, технических и биологических объектов в зоне ЛЭП не учитывается;
- наличие дополнительных тросов (грозозащитных, компенсационных, и т.п.) не учитывается;
- считается, что провода ЛЭП находятся в воздухе с относительной диэлектрической проницаемостью, равной $\epsilon_e = 1$;
- действующие значения напряженности электрического поля определяются у плоскости, которая перпендикулярна направлению проводов ЛЭП, в области наибольшего приближения проводов к земле.

При принятых предположениях значения потенциалов, удельных зарядов и напряженности ЭП могут быть записанные в символической форме для комплексных значений, а электрическое поле представлено как сумма электрических полей проводов ЛЭП и их зеркальных отображений относительно поверхности земли [9, с. 84, 93].

На рис. 1 показанные типовые случаи расположения проводов ЛЭП.

Если провода ЛЭП расщеплены, эквивалентный радиус провода рассчитывается по формуле [9, с. 42]:

$$r = \left(M \cdot r_{ph} \cdot a^{M-1} \right)^{\frac{1}{M}},$$

где M – количество расщепленных проводов фаз ЛЭП; r_{ph} – радиус сечения проводов фаз ЛЭП [м]; a – радиус окружности, по которой располагаются провода расщепленных фаз ЛЭП [м].

В общем случае произвольного расположения проводов ЛЭП, значение емкости на единицу длины рассчитывается по формуле [10, с. 96]:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[2 \frac{\sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \cdot \sqrt[3]{r_{12} \cdot r_{23} \cdot r_{31}}}{r \cdot \sqrt[3]{r_{12}' \cdot r_{23}' \cdot r_{31}'}} \right]},$$

где h_1, h_2, h_3 – расстояния от поверхности земли до каждого из проводов ЛЭП; r_{12}, r_{23}, r_{31} – расстояния между проводами ЛЭП; $r_{12}', r_{23}', r_{31}'$ – расстояния между проводами ЛЭП и их зеркальными отображениями.

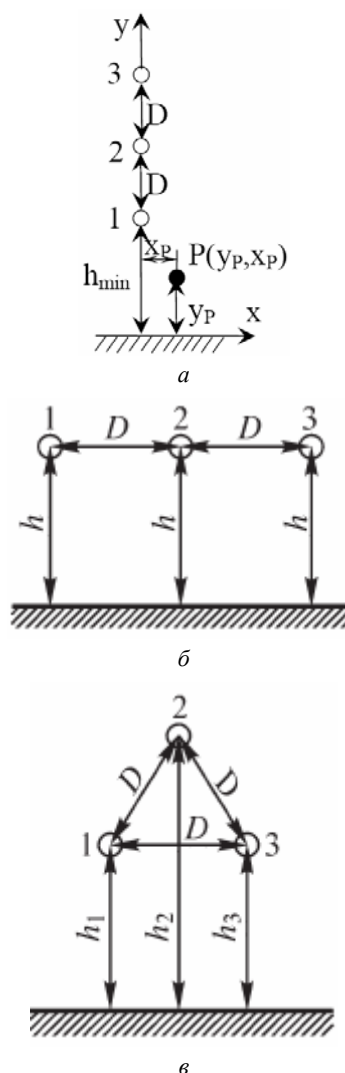


Рис. 1. Типовые случаи расположения проводов ЛЭП

В случае вертикального расположения проводов ЛЭП, как показано на рис. 1,а, емкость ЛЭП на единицу длины рассчитывается по формуле:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2D\sqrt[3]{2}}{r} \cdot \sqrt[3]{\frac{h_{\min} \cdot (h_{\min} + D) \cdot (h_{\min} + 2D)}{(2h_{\min} + D) \cdot (2h_{\min} + 2D) \cdot (2h_{\min} + 3D)}} \right]}$$

где D – расстояние между проводами ЛЭП [м]; h_{\min} – минимальное расстояние проводов ЛЭП до земли ($h_{\min} = \min\{h_1, h_2, h_3\}$) [м]; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздух), в котором находятся провода ЛЭП; $\epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-9}$ Ф/м – электрическая постоянная.

В случае горизонтального расположения проводов ЛЭП, как показано на рис. 1,б, емкость ЛЭП на единицу длины рассчитывается по формуле [10, с. 96]:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2h_{\min} \cdot D}{r \cdot \sqrt[3]{(4h_{\min}^2 + D^2) \cdot \sqrt{h_{\min}^2 + D^2}}} \right]}$$

В случае расположения проводов ЛЭП в вершинах равностороннего треугольника, как показано на рис. 1,в, емкость ЛЭП на единицу длины рассчитывается по формуле:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2D}{r} \cdot \sqrt[3]{\frac{h_{\min}^2 \cdot (h_{\min} + D\sqrt{3}/2)}{\sqrt{(4h_{\min}^2 + D^2) \cdot [(2h_{\min} + D\sqrt{3}/2)^2 + D^2/4]}}} \right]}$$

Комплексные величины азимутальной и аксиальной компонент напряженности ЭП ЛЭП в точке $P(x_p, y_p)$ (рис. 1,а) рассчитываются по формулам [9, с. 68]:

$$\dot{E}_x(x_p, y_p) = \frac{U_{ph} \cdot C_S}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \times$$

$$\left[- \left[\frac{x_1 - x_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 + y_p)^2} - \frac{x_1 - x_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \times \left[\frac{1 + j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{x_2 - x_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 + y_p)^2} - \frac{x_2 - x_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \left. \left. + \frac{1 - j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{x_3 - x_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 + y_p)^2} - \frac{x_3 - x_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 - y_p)^2} \right] \right]$$

$$\dot{E}_y(x_p, y_p) = \frac{U_{ph} \cdot C_S}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \times$$

$$\left[- \left[\frac{h_1 + y_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 + y_p)^2} + \frac{h_1 - y_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \times \left[\frac{1 + j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{h_2 + y_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 + y_p)^2} + \frac{h_2 - y_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \left. \left. + \frac{1 - j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{h_3 + y_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 + y_p)^2} + \frac{h_3 - y_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 - y_p)^2} \right] \right]$$

Действующее значение напряженности электрического поля в точке $P(x_p, y_p)$ рассчитывается по формуле:

$$E(x_p, y_p) = \sqrt{|\dot{E}_x(x_p, y_p)|^2 + |\dot{E}_y(x_p, y_p)|^2},$$

где $|\dot{E}_x(x_p, y_p)|$, $|\dot{E}_y(x_p, y_p)|$ – модули комплексных величин азимутальной и аксиальной компонент напряженности ЭП ЛЭП в точке $P(x_p, y_p)$.

На основе данных формул было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать напряженности ЭП в окрестности ЛЭП. Сравнение распределений действующих значений напряженности ЭП

ЛЭП, рассчитанных с помощью данного программного обеспечения, с данными [11], приведены на рис. 2,а, 3,а и 2,б, 3,б соответственно. На рис. 4,а и 4,б показано такое же сравнение с данными [12].

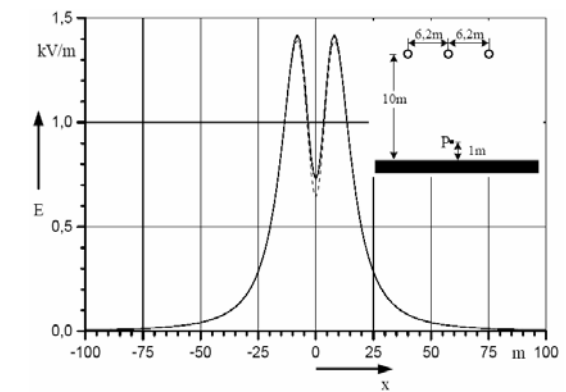
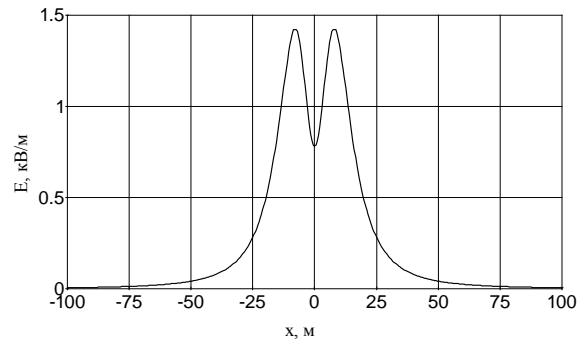


Рис. 2. Рассчитанные зависимости напряженности ЭП в сечении, перпендикулярном проводам ЛЭП 150 кВ на расстоянии 1 м от поверхности земли

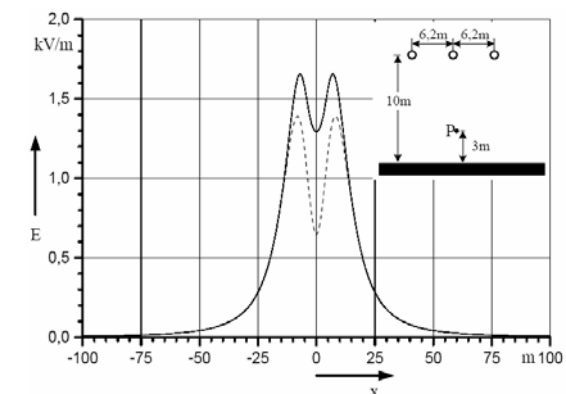
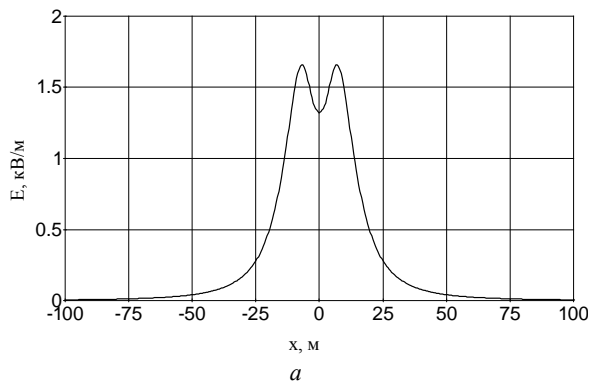


Рис. 3. Рассчитанные зависимости напряженности ЭП в сечении, перпендикулярном проводам ЛЭП на расстоянии 3 м от поверхности земли

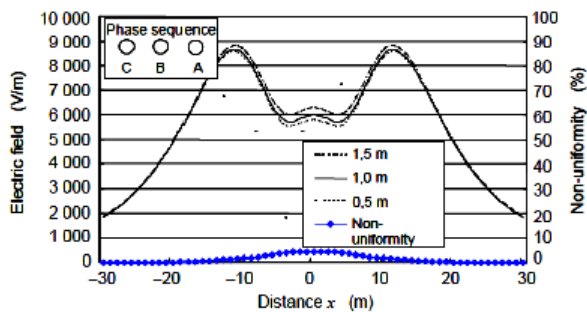
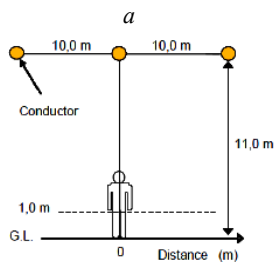
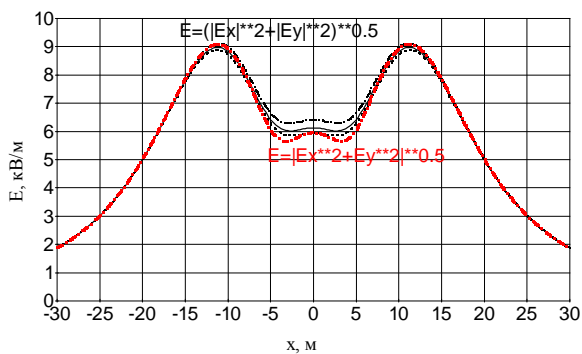


Рис. 4. Рассчитанные зависимости напряженности ЭП в сечении, перпендикулярном проводам ЛЭП 500 кВ на расстояниях 0.5 м, 1 м, 1.5 м от поверхности земли

Выводы.

1. Предложена методика комплексного автоматизированного мониторинга ЛЭП и высоковольтных подстанций, представляющих собой ключевые элементы системы энергоснабжения Украины.
2. Разработано и протестировано программное обеспечение, предназначенное для расчета ЭП в окрестности ЛЭП. Данное программное обеспечение необходимо для навигации БПЛА – основного элемента описанной системы мониторинга, а также для оценки электрических параметров исследуемых энергетических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с.
2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system // 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. pp. 663-670.
3. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines // Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, 2015. pp. 1542-1545. doi: 10.2991/ameii-15.2015.285.
4. Geraldo J. Adabo. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system //

- AUVSI Unmanned Systems. – vol.1. – pp. 1556-1563. 12-15 August 2013, Washington, DC, USA. ISBN 78-1-62993-324-5.
5. Патент РФ № 2421746, МПК G01R31/08. Способ диагностики высоковольтной линии электропередачи / Качесов В.Е., Лебедев Д.Е. – БИ № 17, 2011.
6. Патент РФ № 2483314, МПК G01R31/08. Способ аэродиagnостики высоковольтной линии электропередачи / Качесов В.Е., Лебедев Д.Е. – БИ № 15, 2013.
7. Щерба А.А., Резинкина М.М. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов. – К.: Наукова думка, 2008. – 248 с.
8. Резинкина М.М. Методика расчета прогнозируемого числа поражений молнией протяженных объектов // Журнал технической физики. – 2008. – Т.78. – №5. – С. 1-7.
9. Бессонов В.А. Электромагнитная совместимость: Учебное пособие. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 80 с.
10. Демирчян К.С., Нейман Л. Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Т.3. – М.: Изд-во «Питер», 2006. – 377 с.
11. Tzinevrakis A.E., Tsanakas D.K., Mimos E.I. Analytical Calculation of the Electric Field Produced by Single-Circuit Power Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol.23. – no.3. – pp. 1495-1505. doi: 10.1109/tpwr.2008.916748.
12. Anamarija Juhas, Miodrag Milutinov, Neda Pekarić-Nad. Primena Monte Karlo metode za procenu merne nesigurnosti proračuna električnog i magnetskog polja nadzemnih i podzemnih vodova. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://deet.ftn.uns.ac.rs/files/tehres/TR_2012_Juhas_Milutinov_Pekaric.pdf.

REFERENCES

1. Arбузов R.S., Ovsyannikov A.G. *Sovremennye metody diagnostiki vozduzhnykh linii elektroperedachi* [Modern methods of diagnostics of overhead power lines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 136 p. (Rus).
2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system. 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. pp. 663-670.
3. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines. Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, 2015. pp. 1542-1545. doi: 10.2991/ameii-15.2015.285.
4. Geraldo J. Adabo. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system. AUVSI Unmanned Systems, vol.1, pp. 1556-1563, 12-15 August 2013, Washington, DC, USA. ISBN 78-1-62993-324-5.
5. Kachesov V.E., Lebedev D.E. *Sposob diagnostiki vyisokovoltnoy linii elektroperedachi* [A method for diagnosing a high-voltage power lines]. Patent Russian Federation, no. 2421746, 2011. (Rus).
6. Kachesov V.E., Lebedev D.E. *Sposob aerodiagnostiki vyisokovoltnoy linii elektroperedachi* [Air diagnostic method of high voltage transmission lines]. Patent Russian Federation, no. 2483314, 2013. (Rus).
7. Shcherba A.A., Rezinkina M.M. *Modelirovanie i analiz elektricheskikh poley energeticheskikh ob'ektov* [Modeling and analysis of electric field energy facilities]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008. 248 p. (Rus).
8. Rezinkina M.M. Technique for predicting the number of lightning strokes to extended objects. *Technical physics*, 2008, vol.53, no.5, pp. 533-539. doi: 10.1134/s1063784208050010.
9. Bessonov V.A. *Elektromagnitnaya sovmetimost* [Electromagnetic compatibility]. Khabarovsk, DVGUPS Publishing house, 2000. 80 p. (Rus).
10. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chечурин V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom 3* [Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 3]. Moscoe, Piter Publ., 2006. 377 p. (Rus).

11. Tzinevrakis A.E., Tsanakas D.K., Mimos E.I. Analytical Calculation of the Electric Field Produced by Single-Circuit Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.23, no.3, pp. 1495-1505. doi: 10.1109/tpwr.2008.916748.

12. Anamarija Juhas, Miodrag Milutinov, Neda Pekarić-Nadž. Primena Monte Karlo metode za procenu merne nesigurnosti proračuna električnog i magnetskog polja nadzemnih i podzemnih vodova. Available at: http://deet.ftn.uns.ac.rs/files/tehras/TR_2012_Juhas_Milutinov_Pekaric.pdf (Accessed 12 September 2013). (Srb).

Поступила (received) 16.10.2015

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф., член-корр. НАНУ,
Резинкина Марина Михайловна², д.т.н., в.н.с.,
Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,
Васильченко Владимир Иванович³, начальник управления
технических средств управления,

Зуев Андрей Александрович¹, к.т.н., доц.,
Бортников Александр Викторович¹, инженер,
Сосина Елена Владимировна¹, аспирант,

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: elenasosina09@gmail.com

² Государственное учреждение «Институт технических
проблем магнетизма Национальной академии наук Украины»,
61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,
e-mail: marinar2@mail.ru

³ ГП «НЭК «Укрэнерго»,
01032, Киев, ул. С. Петлюры, 25,
тел/phone +38 044 2383015, e-mail: kanc@nec.energy.gov.ua

E.I. Sokol¹, M.M. Rezinkina², O.G. Gryb¹, V.I. Vasilchenko³,
A.A. Zuev¹, A.V. Bortnikov¹, E.V. Sosina¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

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

³ NPC «Ukrenergo»,
25, Symona Petliury Str, Kyiv, 01032, Ukraine.

A method of complex automated monitoring of Ukrainian power energy system objects to increase its operation safety.

The paper describes an algorithm of the complex automated monitoring of Ukraine's power energy system, aimed at ensuring safety of its personnel and equipment. This monitoring involves usage of unmanned aerial vehicles (UAVs) for planned and unplanned registration status of power transmission lines (PTL) and high-voltage substations (HVS). It is assumed that unscheduled overflights will be made in emergency situations on power lines. With the help of the UAV, pictures of transmission and HVS will be recorded from the air in the optical and infrared ranges, as well as strength of electric (EF) and magnetic (MF) fields will be measured along the route of flight. Usage specially developed software allows to compare the recorded pictures with pre-UAV etalon patterns corresponding to normal operation of investigated transmission lines and the HVSs. Such reference pattern together with the experimentally obtained maps of HVS's protective grounding will be summarized in a single document – a passport of HVS and PTL. This passport must also contain the measured and calculated values of strength levels of EF and MF in the places where staff of power facilities stay as well as layout of equipment, the most vulnerable to the effects of electromagnetic interference. If necessary, as part of ongoing monitoring, recommendations will be given on the design and location of electromagnetic screens, reducing the levels of electromagnetic interference as well as on location of lightning rods, reducing probability lightning attachment to the objects. The paper presents analytic expressions, which formed the basis of the developed software for calculation of the EF strength in the vicinity of power lines. This software will be used as a base at UAV navigation along the transmission lines, as well as to detect violations in the transmission lines operation. Comparison of distributions of EF strength calculated with the help of the elaborated software with the known literature data has been presented also. The difference between the proposed method of monitoring and the existing methods is full automation of the complex control of a number of parameters characterizing the state of the external power grid facilities, as well as its basic electrical parameters. This will be possible due to usage of specially developed software for recognition of optical and infrared images, as well as pictures of lines of equal EF and MF strength. References 12, figures 4.

Key words: power line, electric and magnetic fields, automated monitoring, unmanned aerial vehicles.

V.I. Gurevich

THE PROBLEM OF CORRECT CHOICE OF FERRITE BEADS

A ferrite bead is a passive electrical element used to suppress high-frequency noise in electric circuits. This is one of the simplest and the cheapest type of filters. Thus, such filters are widely used in electric and electronic apparatus for both domestic and industrial purposes. It would seem that such a wide application of these elements suggests that methods for their correct selection and use are well-defined. However, this is not quite true. Table 1, figures 11.

Key words: ferrite, filters, electromagnetic pulse.

Ферритовый фильтр – пассивный электрический компонент, использующийся для подавления высокочастотных помех в электрических цепях. Это один из самых простых и дешёвых типов фильтров. Очевидно, именно поэтому фильтры такого типа нашли самое широкое применение в электронной и электротехнической аппаратуре как бытового, так и промышленного назначения. Казалось бы, при такой широкой распространённости этих элементов методика их правильного выбора и применения должна быть хорошо всем известна. Увы, на самом деле все оказалось не так просто. Табл. 1, рис. 11.

Ключевые слова: ферриты, фильтры, электромагнитный импульс.

The ferrite bead is the simplest type of the filter: it is characterized by low cost and significant attenuation of short electromagnetic pulses (similar to high-frequency signal) in conductors connected to electronic apparatus. It is shaped as a ring (cylinder) filter put on the conductor (see Fig. 1).



Fig. 1. Ferrite Elements (FE) of Ferrite Bead Filters

The impedance of the winding consists of one or several turns of a control cable run through the ferrite ring and is too low both for low-frequency operating signals and for commercial frequency alternating current. At the same time it is too high for high-frequency (short pulse) signals within the selected frequency range which depends on the number of turns, material and size of the ring itself. This results in significant attenuation of pulse and high-frequency noise penetrating such cables. Attenuation provided by such filters is in the range of 10-15 dB.

Numerous companies manufacture dozens of such filter types both miniature, designed to be installed on the printed circuit boards inside the apparatus (see Fig. 2), and those suitable for the installation on the conductor (cable) itself. For the sake of installation convenience such filters are often made as two matching semi-rings (semi-cylinders) located in snap-in plastic covers. This provides fast and convenient installation of the filters on the conductors (see Fig. 3).



Fig. 2. Miniature Filters Built Based on Ferrite Elements (FE) and Designed for Installation on a Printed Circuit Board

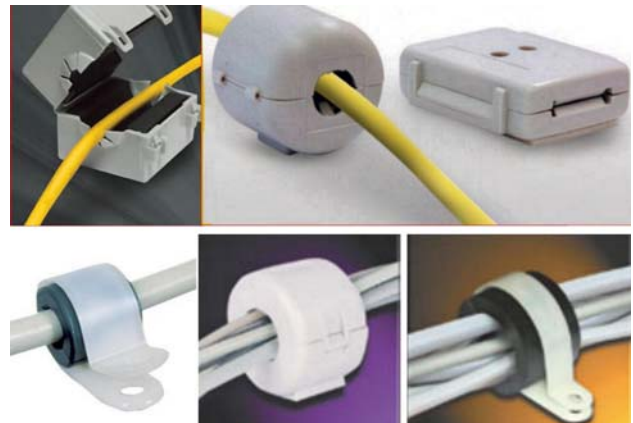


Fig. 3. Design of Ferrite Beads Providing Fast and Convenient Installation on Conductors

Such filters can be widely used in electronic equipment: in control circuits, in circuits of logical and pulse signal transmission, and in communication circuits (see Fig. 4).

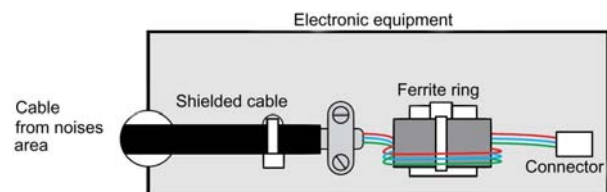


Fig. 4. Ferrite Ring Filter Installed on a Control Cable Entering the Electronic Equipment

© V. Gurevich

FE-based filters are manufactured by numerous companies as given in Table 1.

Frequency ranges shown in Table 1 do not correspond to the certain filter type, but describe the frequency area provided by certain companies. Actual frequency ranges of certain filter types are much lower than shown in Table 1. Fig. 5 shows examples of frequency ranges of different types of materials used in FE manufactured by Fire-Rite Products Corp.

Table 1
Frequency Response of FE-based Filters Manufactured by Different Companies

Company name	Frequencies intervals for filters produced by companies, MHz
Fire-Rite Products Corp.	1 – 1000
Ferrishield	30 – 2450
Ferroxcube	0.2 – 200
Murata	Miniature filters for PCB mounting
NEC/Tokin	0.1 – 300
Parker Chomerics	30 – 200
Laird	30 – 2000
TDK	10 – 500
Leader Tech, Inc	1 – 2450
Würth Elektronik	Miniature filters for PCB mounting

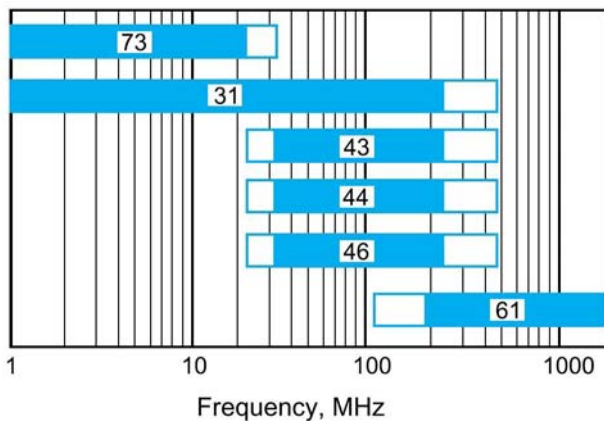


Fig. 5. Frequency Ranges of Different Material Types (designated by numbers) used in FE Manufactured by Fire-Rite Products Corp.

Despite the apparent simplicity and cheapness (1-10 USD) ferrite filters are not as simple as they seem. Their effectiveness depends on the numerous parameters, such as: material type, equivalent frequency of current pulse to be attenuated, size of FE, number of turns of the conductor passed-through the FE, the value of the DC-component in the conductor, temperature, etc.

The frequency response of the filter depends on several parameters, primarily on the FE material type. Manganese-zinc ferrites (Mn-Zn) with relative magnetic permeability (magnetic inductive capacity) $\mu = 600 - 20.000$ are usually used for frequency range of 0.1 MHz – 2 MHz, and for 1MHz – 2.45 GHz – nickel zinc ferrites (Ni – Zn) with relative magnetic permeability $\mu = 15 - 2000$ are used. Different ferrite mixes are also used during the manufacture.

Apart from the frequency response the impedance – is another very important parameter of FE-based filter. It defines the level of noise suppression.

To a large extent the impedance of FE-based filter is also determined by the type of material used and by the operating frequency (see Fig. 6).

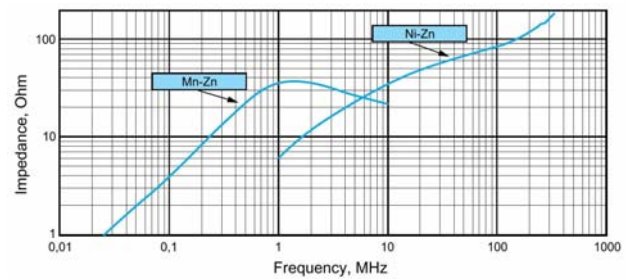


Fig. 6. Dependency of the Impedance of FE-based Filter on the Material Type and Frequency

As FE-filter has inductance, capacitance and active resistance (see Fig. 7), it is apparent that filter frequency response and impedance also depend on FE size (particularly on its length, see Fig. 8).

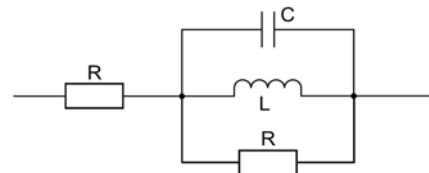


Fig. 7. Equivalent Circuit of FE-based Filter

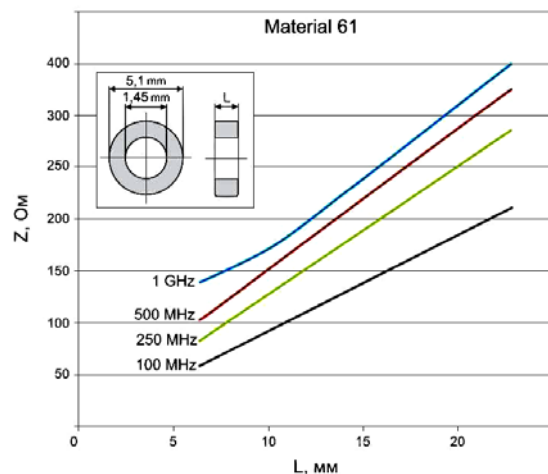
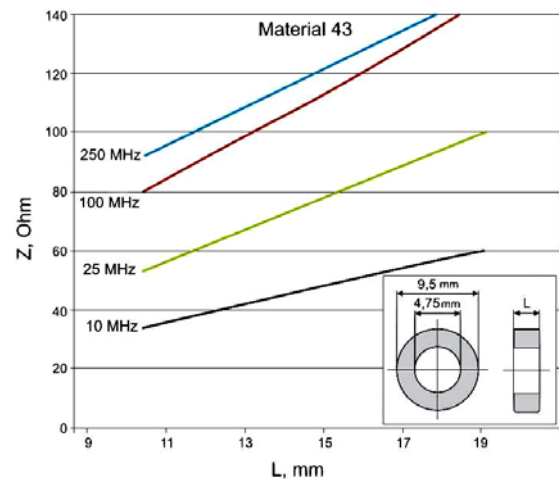


Fig. 8. Dependence of Filter Impedance Z on the Ferrite Element Length L made of two types of material (43 and 61) manufactured by the Fire-Rite Products Corp.

As shown in Fig. 8, the filters having longer FE always have higher impedance with all other parameters being equal. This results from higher inductance of filters with long FE.

To a large extent the impedance of FE-based filters also depends on the number of wire turns passed through the FE (see Fig. 9). As shown in Fig. 9 the starting impedance of the filter with several wire turns is great compared to the one-turn filter. However, the further increase in noise frequency makes filters with several turns less effective compared to filters with one turn which can result from the higher capacitance of the filter with several turns.

Also, FE-based filters have another unpleasant characteristic: their properties depend on the value of the DC-component of the passing current (see Fig. 10). This results from the change of FE magnetic properties under the existence of the DC-component of the current.

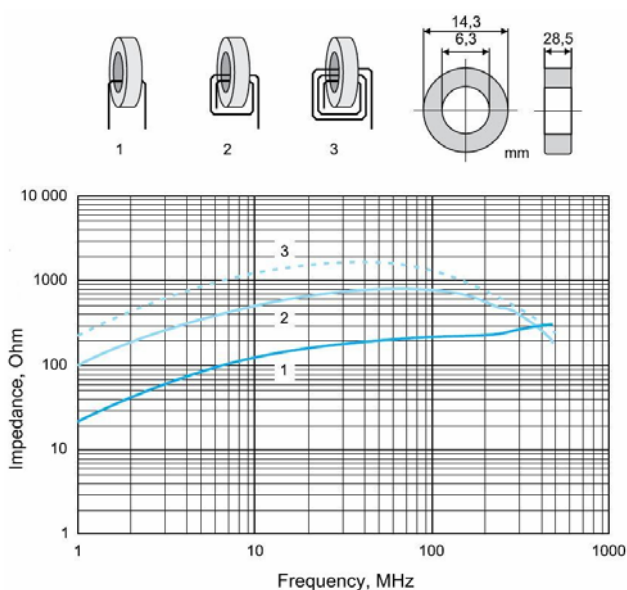


Fig. 9. Typical Dependency of Filter Impedance on the Number of Turns (designated as 1-3) Passed through the FE

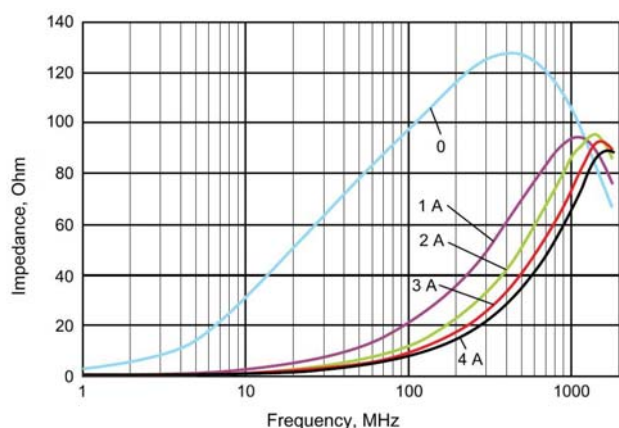


Fig. 10. Influence of the DC-component on Filter Characteristics

The presence of inductance and capacitance in the filter equivalent circuit (see Fig. 7) provokes the hazard of resonance under the certain frequencies. This can lead to another problem of such filters – such as amplification of noise instead of its attenuation.

So, if there are so many factors influencing the filter parameters, what are the basics to correctly select the filter ensuring effective protection against electromagnetic noise under a wide frequency range? It is tricky. This is especially due to 1) unavailability of standards unifying the procedure for measuring the parameters of such filters, and 2) different methods of measurement used by different manufacturers. Due to all these problems it is almost impossible to compare the parameters of filters produced by different manufacturers.

According to the above analysis the following method for the correct selection of FE-based filter can be recommended:

1. In order to ensure the effective noise suppression within the maximum frequency range it is required using at least three in-series filters installed on the same conductor (cable). Such filters should be made of different materials providing maximum filter impedance within low- (0.1 MHz), medium- (300 to 500 MHz) and high-frequency range (2 to 2.45 GHz). Three filters installed in-series on the same conductor also allows for eliminating the resonance, as they have different characteristics and thus significantly different resonant frequencies.

2. Manufacturer data can be used only for preliminary filter selection. Afterwards it is required to test the noise suppression effectiveness within the full frequency and current range needed for the customer.

This test can be done on the unit consisting of the high-frequency pulse generator simulating the noise signal within the actual frequency range, and of the receiving unit, such as oscilloscope, spectral analyzer or electronic voltmeter with the extended frequency range. The generator should be connected to the input of the receiver using the cable equipped with the filters (see Fig. 11). The measured generator output voltage within the required frequency spectrum (with and without filters installed on the cable) characterizes the value of signal attenuation on the filters and enables selecting the proper set of filters providing necessary attenuation of high-frequency signal, as well as ensuring that there is no resonance within the full frequency operating range.

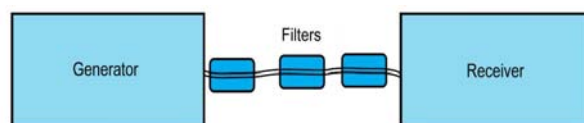


Fig. 11. Test Unit Designed to Check the FE-based filter effectiveness

Received 19.10.2015

Vladimir I. Gurevich, Ph.D, Senior specialist,
Central Electric Laboratory of Israel Electric Corp.
31000, Israel, Haifa, POB 10,
e-mail: vladimir.gurevich@gmx.net