

# «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»)

Свідोцтво 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.Ostrohradskiy National University, Ukraine  
**Zgraja J.** Professor, Institute of Applied Computer Science, Lodz University of Technology, Poland

### НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ\*

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

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

### NATIONAL EDITORIAL BOARD\*

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

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

### Адреса редакції / Editorial office address:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ «ХПІ», вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна  
Dept. of Electrical Apparatus, NTU "KhPI", Kyrpichova Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine

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

ISSN (print) 2074-272X

ISSN (online) 2309-3404

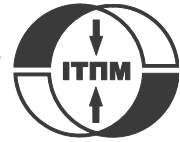
© Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 2016  
© ДУ "Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України", 2016

Підписано до друку 24.10.2016 р. Формат 60 x 90 1/8. Папір – офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-05-2016. 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 34: Открытие и изучение квантово-волновой природы микромира материи ..... 3

**Електричні машини та апарати**

**Милых В.И.** Численно-полевой анализ магнитного поля и электрических величин в статоре турбогенератора при автономной несимметричной нагрузке ..... 16

**Електротехнічні комплекси та системи. Силова електроніка**

**Поляков М.А., Ларионова Т.Ю.** Методика оценки эффективности использования в системе электроснабжения полупроводниковых преобразователей постоянного напряжения ..... 23

**Теоретична електротехніка та електрофізика**

**Баранов М.И., Рудаков С.В.** Усредненные геометрические характеристики распределения волновых электронных пакетов в металлических проводниках с импульсным аксиальным током большой плотности .... 29

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

**Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S.** Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review ..... 35

**Беляев В.К., Паненко Е.Н.** Определение диэлектрических параметров изоляции трансформаторов тока при множественных измерениях в системах контроля под рабочим напряжением ..... 40

**Голик О.В.** Статистические процедуры при двухстороннем ограничении контролируемого параметра в процессе производства кабельно-проводниковой продукции ..... 47

**Рудаков В.В., Коробко А.А.** Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора ..... 51

**Шаламов С.П.** Датчик для измерения токов наносекундного диапазона на основе индукционного преобразователя ..... 57

**Електричні станції, мережі і системи**

**Волошко А.В., Бедерак Я.С.** Метод автоматичного визначення кількості одночасно працюючих в групі електродвигунів ..... 61

**Olszowiec P.** Контроль изоляции сетей низкого напряжения методами двух и трех отсчетов вольтметра ..... 64

**Руденко С.С.** Требования к приборам для проведения вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств ..... 68

**TABLE OF CONTENTS**

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

**Baranov M.I.** An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 34: Discovery and study of quantum-wave nature of microscopic world of matter ..... 3

**Electrical Machines and Apparatus**

**Milykh V.I.** The numerical-field analysis of the magnetic field and the electrical quantities in the turbogenerator stator under autonomous unbalanced loading ..... 16

**Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics**

**Polyakov M.A., Larionova T.Y.** Efficiency evaluation technique of the semiconductor DC-DC converter application in the power-supply system ..... 23

**Theoretical Electrical Engineering and Electrophysics**

**Baranov M.I., Rudakov S.V.** Average geometrical features of the electron wave packages distribution in metallic conductors with pulsed axial current of high density ..... 29

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

**Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S.** Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review ..... 35

Beliaev V.K., Panenko H.N. Determination of insulation parameters of current transformers at multiple measurements in monitoring systems under working voltage.....	40
Golik O.V. Statistical procedures for two-sided limit of a controlled parameter in the process of production of cable and wire products.....	47
Rudakov V.V., Korobko A.A. A high sensitive microwave measuring device of the moisture content in the non-polar dielectric liquids based on an inhomogeneous step coaxial resonator.....	51
Shalamov S.P. An induction sensor for measuring currents of nanosecond range.....	57

### Power Stations, Grids and Systems

Voloshko A.V., Bederak Ya.S. A method of automatic determination of the number of the electrical motors simultaneously working in group .....	61
Olszowiec P. Low voltage networks insulation monitoring with two and three voltmeter readouts methods .....	64
Rudenko S.S. Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices.....	68

### 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.

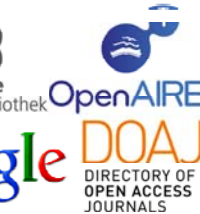
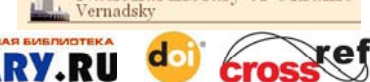
Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу «Електротехніка і Електромеханіка» та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ)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

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

Журнал «Електротехніка і Електромеханіка» включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory, представлений у загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка Наукова», реферативному журналі «Джерело», індексується у міжнародних наукометричних базах даних Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИИЦ (ELIBRARY), Google Scholar, та входить до баз даних EBSCO, DOAJ, OpenAIRE, Elektronische Zeitschriftenbibliothek та ін.



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

М.И. Баранов

## АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 34: ОТКРЫТИЕ И ИЗУЧЕНИЕ КВАНТОВО-ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ МИКРОМИРА МАТЕРИИ

*Наведено короткий аналітичний огляд основних наукових досягнень вчених в галузі відкриття і вивчення квантово-хвильової природи фізичних процесів і явищ, що протікають в мікросвіті матерії, що оточує нас. У число таких досягнень увійшли як квантові теорії теплового випромінювання абсолютно чорного тіла, атома, фотоелектричного ефекту і явища надтекучості рідкого гелію, що стали класичними, так і сучасні відкриття в галузі квантової електроніки та новітні квантовомеханічні результати для дрейфу вільних електронів і їх хвильових розподілів в провідниках електричних кіл із струмом.* Бібл. 27, рис. 15.

*Ключові слова:* квантова теорія теплового випромінювання, квантова теорія атома, електронні хвилі, квантова теорія фотоелектричного ефекту, квантова статистика мікрочасток, квантова теорія явища надтекучості гелію, квантова електроніка, квантово-хвильова природа дрейфу електронів в металі, огляд.

*Приведен краткий аналитический обзор основных научных достижений ученых в области открытия и изучения квантово-волновой природы физических процессов и явлений, протекающих в микромире окружающей нас материи. В число таких достижений вошли как ставшие классическими квантовые теории теплового излучения абсолютно черного тела, атома, фотоэлектрического эффекта и явления сверхтекучести жидкого гелия, так и современные открытия в области квантовой электроники и новейшие квантовомеханические результаты для дрейфа свободных электронов и их волновых распределений в проводниках электрических цепей с током.* Библи. 27, рис. 15.

*Ключевые слова:* квантовая теория теплового излучения, квантовая теория атома, электронные волны, квантовая теория фотоэффекта, квантовая статистика микрочастиц, квантовая теория явления сверхтекучести гелия, квантовая электроника, квантово-волновая природа дрейфа электронов в металле, обзор.

**Введение.** В процессе познания окружающей природы люди, накопив определенный «багаж» (запас) научно-технических знаний, поняли, что для человечества интересен и важен как для своего жизненного обитания в земных условиях, так и постоянного развития промышленного производства и различных прогрессивных технологий не только макромир, но и микромир, определяющий проявление в природе многообразных физико-химических и биологических процессов и макроскопических свойств вещества. Следует напомнить читателю то, что согласно современным представлениям о строении вещества под микромиром понимается совокупность размещенных в вакууме материальных объектов (тел) с линейными размерами 10 нм и менее [1]. Поэтому, практически начиная с конца 19-го столетия, ученые-физики и химики в меру своих теоретических возможностей и имеющегося в их распоряжении физико-химического инструментария стали активно заниматься исследованием микроскопических свойств вещества и открытием при этом новых физико-химических явлений. Первым в ряду подобных открытий стало обнаружение выдающимся немецким физиком-экспериментатором Вильгельмом Рентгеном (1845-1923 гг.) в 1895 г. так называемых X-лучей, получивших в недалеком будущем название «рентгеновского излучения» и отмеченных одной из первых Нобелевских премий по физике за 1901 г. [2, 3]. Затем в 1896 г. выдающимся французским ученым-физиком Анри Беккерелем (1852-1908 гг.) было открыто явление «радиоактивности», названное так в 1898 г. изучившими его выдающимися французскими физиками-химиками Марией Склодовской-Кюри (1867-1934 гг.) и Пьером Кюри (1859-1906 гг.) и за которое в 1903 г. А. Беккерель, а также М. Склодовская-Кюри и П. Кюри, открывшие к этому времени такие радиоактивные химические элементы

как полоний *Po* и радий *Ra*, были удостоены Нобелевской премии по физике [2, 3]. Укажем и то, что за выделение радиоактивного радия *Ra* в чистом металлическом виде и комплексное изучение его как химического элемента из периодической системы элементов Д.И. Менделеева [4] М. Склодовская-Кюри была удостоена во второй раз Нобелевской премии по химии за 1911 г. [2, 3]. Подобной чести на сегодня не удостоивалась больше ни одна женщина мира. В 1935 г. старшая дочь М. Склодовской-Кюри и П. Кюри Ирен Кюри (1897-1956 гг.) и ее муж Фредерик Жолио-Кюри (1900-1958 гг.), ставшие выдающимися французскими учеными-физиками, за открытие фундаментального явления «искусственной радиоактивности» получили Нобелевскую премию по химии [2, 3]. Возвращаясь снова к окончанию 19-го века, отметим, что в 1897 г. выдающимся английским физиком Джозефом Джоном Томсоном (1856-1940 гг.) были открыты носители элементарного электричества (своего рода «кванты электричества») – электроны [2, 3]. За это научное открытие Дж.Дж. Томсону была присуждена Нобелевская премия по физике за 1906 г. [3, 5]. Количественное значение отрицательного заряда электрона  $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, являющееся мировой постоянной, было определено опытным путем с удивительно высокой точностью (при погрешности измерений до 1 %) в 1917 г. выдающимся американским физиком-экспериментатором Робертом Милликенем (1868-1953 гг.) [2]. Результаты этих экспериментальных исследований Р. Милликена были высоко оценены международной научной общественностью и удостоены Нобелевской премии по физике за 1923 г. [3, 5].

К приведенному выше следует добавить то, что фактически еще в 1886 г. немецким физиком Эугеном Гольдштейном (1850-1930 гг.), впервые введшим

© М.И. Баранов



в электрофизику в 1876 г. термин «катодные лучи», в двухэлектродной электроразрядной трубке, заполненной наиболее распространенным в природе изотопом водорода протием  ${}^1_1\text{H}$ , были открыты «каналовые лучи» и присутствующие в них такие элементарные частицы как протоны, имеющие положительный электрический заряд [3, 6]. На то время величины ни их заряда, ни их массы известны еще не были. Это намного позже физиками-экспериментаторами достоверно было установлено, что модуль их заряда равен модулю заряда  $e_0$  электрона, а их масса  $m_p$  примерно в 1836 раз превышает массу  $m_e$  покоя электрона [1, 4]. В физике принято считать все же, что протон как элементарную частицу, «выбитую» альфа-частицей из атомного ядра, открыла в период 1914-1919 гг. группа талантливых английских физиков-атомщиков в составе Э. Резерфорда, Э. Марсдена и Дж. Нэттола [3, 4]. Здесь нельзя не указать и то, что такая крайне важная для понимания устройства микромира земной природы и нашей Вселенной в целом электронейтральная элементарная частица как нейтрон была открыта в ходе экспериментальных атомных исследований с помощью альфа-частиц в 1932 г. членом знаменитой физической школы Эрнеста Резерфорда, выдающимся английским физиком-экспериментатором Джеймсом Чэдвигом (1891-1974 гг.) [3, 5]. Масса  $m_n$  нейтрона с нулевым суммарным электрическим зарядом в соответствии с опытными данными современных ядерных измерений оказалась равной примерно  $1839 m_e$  [1, 4].

Во всемирной истории развития физики учение об атоме вещества и теории его строения занимают особое место. Причиной тому является фундаментальность данных вопросов, лежащих в основе строения материи. К 1913 г. благодаря результатам экспериментальных исследований с помощью «рентгеновского излучения» молодого талантливого английского физика Генри Мозли (1887-1915 гг.), трагически погибшего на поле сражений Первой мировой войны, была установлена одна из главных физических характеристик атома вещества – величина положительного заряда его ядра, расположенного в центре этого микрообразования [2, 5]. Эта величина, названная впоследствии «числом Менделеева», соответствовала порядковому номеру  $Z$  химического элемента в фундаментальной периодической системе элементов Д.И. Менделеева [4]. Используя опытные результаты своего ученика, выдающийся английский физик Эрнест Резерфорд (1871-1937 гг.) в 1913 г. после многолетних раздумий и поисков предложил научному миру известную *планетарно-ядерную модель атома* [3, 4]. Необходимо отметить, что предтечей такого знаменательного события в физико-химическом мире стали результаты исследований Э. Резерфорда и его другого молодого талантливого ученика, английского физика-химика Фредерика Содди (1877-1956 гг.), ставшего лауреатом Нобелевской премии по химии за 1921 г. [3], в области теории и практики радиоактивного распада химических элементов. За научные достижения в описании закономерностей радиоактивных превращений атомов как без внешнего вмешательства, так и бомбардируемых исходящими от радиоактивного источника, содержащего капсулу с радием  $Ra$ , альфа-

частицами – дважды ионизированными атомами гелия  ${}^4_2\text{He}$  и по существу их ядрами, Э. Резерфорд был удостоен Нобелевской премии по химии за 1908 г. [3].

**1. Макс Планк – основоположник квантовой теории теплового излучения.** На рубеже 19-го и 20-го веков в физической науке появились новые понятия и теории, существенно изменившие как научный «фасад», так и внутреннюю научную «начинку» казалось бы незыблемого «здания» классической физики. В 1897 г. талантливый немецкий физик Макс Планк (рис. 1) приступил к теоретическому исследованию динамики теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Следует напомнить читателю то, что АЧТ считается такое физическое тело, которое поглощает все падающее на его поверхность тепловое (электромагнитное) излучение независимо от длины волны излучения и температуры тела [4]. Безусловно, что АЧТ является идеализированным физическим телом, отсутствующим в природе, но часто используемым нами в качестве расчетной теплофизической модели.



Рис. 1. Выдающийся немецкий физик-теоретик Макс Планк (1858-1947 гг.)

В 1900 г. М. Планк на основе принципиально нового и по сути революционного подхода показал, что излучение или поглощение физическим телом теплового излучения, имеющего, кстати, электромагнитную природу [4, 7], происходит не непрерывным, как предполагалось до этого в классической физике, а скачкообразным образом. И, причем, происходят эти процессы отдельными энергетическими порциями, названными им «квантами действия» [3, 4]. При этом величина кванта энергии  $E_n$  равна произведению некоторой фундаментальной постоянной  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, названной впоследствии в физике постоянной Планка [3], на квантованную частоту  $\nu_n$  ( $n=1,2,3,\dots$  – целочисленное значение квантового числа) волн излучения (поглощения) [4, 7]. За открытие дискретных квантов энергии (действия) М. Планку была присуждена Нобелевская премия по физике за 1918 г. [3, 6].

**2. Нильс Бор и создание квантово-ядерной модели атома.** При всей своей физической ценности и прогрессивности предложенная Э. Резерфордом

в рамках классической механики и электродинамики *планетарно-ядерная модель атома*, содержащая в центральной части положительно заряженное ядро и вокруг него на периферии отрицательно заряженную электронную сферообразную оболочку, имела один существенный и непреодолимый недостаток. Эта теоретическая модель электронейтрального атома с вращающимися вокруг неподвижного ядра связанными электронами была неустойчивой электродинамической системой. Согласно законам классической электродинамики движущиеся электроны в такой модели должны были непрерывно излучать электромагнитную энергию и со временем «падать» на ядро [4, 6]. В природе же таких внутриатомных процессов не наблюдается. Используя квантовую теорию выдающегося немецкого физика-теоретика М. Планка, выдающийся датский физик-теоретик Нильс Бор (1885-1962 гг.) в 1913 г. для преодоления указанного выше принципиального недостатка *планетарно-ядерной модели атома Резерфорда* предложил новую гипотезу (гр. слово «*hypothesis*» обозначает «*научное предположение*» [8]) о том, что атом вещества поглощает и испускает электромагнитную энергию отдельными дискретными порциями (квантами) [3]. Н. Бор (рис. 2) при этом сформулировал новые физические представления о том, что атом вещества может находиться в некотором дискретном ряде стационарных энергетических состояний, не сопровождающихся излучением (поглощением) им электромагнитной энергии [3, 4, 7].



Рис. 2. Выдающийся датский физик-теоретик Нильс Бор (1885-1962 гг.)

Кроме того, согласно выдвинутой Н. Бором гипотезы переход атома вещества из нормального (стационарного) в возбужденное энергетическое состояние может происходить только благодаря поглощению его связанными электронами, вращающимися в зоне атомной (электронной) оболочки по круговым орбитам вокруг ядра атома, кванта энергии (света) строго определенной величины [2, 4]. В случае поглощения связанным электроном такого кванта энергии он должен переходить на более удаленную от ядра атома круговую орбиту. Излучив на этой орбите

квантованным образом полученную ранее им электромагнитную энергию  $\Delta E_n$ , этот электрон вынужден был совершать скачкообразный переход с удаленной от ядра орбиты на свою изначальную и ближе расположенную к ядру орбиту радиусом  $r_n$ , где  $n=1,2,3,\dots$  – целое квантовое число, равное порядковому номеру электронной орбиты в атоме по мере удаления ее от его ядра [4, 7]. Нам не следует при этом путать это число  $n$  с главным квантовым числом, соответствующим числу электронных оболочек в атоме и номеру периода атома в периодической системе элементов Д.И. Менделеева. Причем, этот переход связанный электрон, излучивший квант энергии с частотой  $\nu_n = \Delta E_n/h$ , должен был совершать минув все промежуточные и дискретно заданные предложенной моделью атома круговые электронные орбиты. Именно в этом и заключалась основная идея разработанной Н. Бором *квантово-ядерной модели атома*. В 1922 г. Н. Бор за создание данной модели атома, имевшей фундаментальное значение для описания внутриатомных процессов, был удостоен Нобелевской премии по физике [3, 5]. Эта модель атома с успехом использовалась при описании внутриатомных процессов для простейшего атома вещества – изотопа водорода против  ${}^1_1\text{H}$ , вокруг ядра которого, состоящего из одного протона  $p^+$ , по круговой орбите движется единственный электрон  $e^-$ . Квантовая теория атома Бора полностью удовлетворяла основному закону спектроскопии, полученному физиками экспериментальным путем и используемому постоянную Ридберга, численно равную  $R=3,289842 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  [4]. Она позволяла с высокой точностью вычислить указанную выше постоянную  $R=m_e e_0^4 (8\epsilon_0^2 h^2)^{-1}$ , исходя из четырех фундаментальных величин: модуля заряда электрона  $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, массы покоя электрона  $m_e=9,109 \cdot 10^{-31}$  кг, электрической постоянной  $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м и постоянной Планка  $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Данная квантовая теория строения атома вещества обеспечила правильную физическую и количественную интерпретацию экспериментально обнаруженных ранее в лабораторных условиях физиками линейчатых спектров излучения для изотопа атома водорода  ${}^1_1\text{H}$  (против), включая серии Лаймана, Бальмера, Пашена, Брекета и Пфунда [4, 7].

Следует отметить и то, что квантовая теория атома Бора получила в 1914 г. и свое прямое экспериментальное подтверждение в знаменитых опытах немецких физиков-экспериментаторов Джеймса Франка (1882-1964 гг.) и Густава Герца (1887-1975 гг.) по обнаружению дискретных возбужденных состояний ряда атомов (например, ртути  $\text{Hg}$ ) и определению энергии их ионизации [2, 4, 6]. Опытные результаты Дж. Франка и Г. Герца достоверно свидетельствовали о том, что энергия атомов изменяется дискретно квантованным образом со строго характерными для каждого вида атомов порциями энергии. Так, для атомов ртути  $\text{Hg}$  эта порция (квант) электромагнитной энергии, вызывающая их возбуждение с последующим испусканием ими наружу кванта энергии при переходе их в основное энергетическое состояние, составляла около 4,9 эВ, что соответствовало энергии кванта ультрафиолетового света с длиной волны в 253,6 нм [4, 6]. За выдающиеся результаты многолетних атом-

ных исследований Дж. Франк и Г. Герц были отмечены Нобелевской премией по физике за 1925 г. [3, 6].

**3. Альберт Эйнштейн и создание квантовой теории фотоэлектрического эффекта.** Как известно, явление *фотоэффекта* представляет собой изменение электрических свойств того или иного вещества под действием электромагнитного излучения (света, гамма-излучения, ультрафиолетовых, рентгеновских и др. лучей) [8]. В физике на сегодня известны [4, 7]: *внешний фотоэффект* (испускание веществом вольных электронов под действием света); *внутренний фотоэффект* (изменение электрического сопротивления вещества под действием квантов электромагнитного поля); *фотогальванический эффект* (возникновение электродвижущей силы в веществе под действием солнечного излучения); *ядерный фотоэффект* (возникновение ядерной реакции в веществе под действием гамма-квантов). Далее мы остановимся на *внешнем фотоэффекте* или *фотоэлектрическом эффекте*. Известно, что этот эффект наблюдал в 1887 г. один из основоположников классической электродинамики, выдающийся немецкий физик Генрих Герц (1857-1894 гг.), первым экспериментально доказавшим в 1888 г. существование электромагнитных волн [3, 6]. При этом Г. Герц установил, что электрический разряд в воздухе между двумя металлическими электродами происходит более интенсивно или при меньшем напряжении между электродами в случае подсветки разрядного промежутка световым потоком, содержащим ультрафиолетовые лучи. Физическое объяснение фотоэлектрическому эффекту с позиций зарождающейся квантовой механики было дано в 1906 г. выдающимся немецким физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном (1879-1955 гг.), изображенным на рис. 3.



Рис. 3. Выдающийся немецкий физик-теоретик Альберт Эйнштейн (1879-1955 гг.)

Развивая квантовую теорию М. Планка, А. Эйнштейн для светового излучения в 1905 г. ввел представление о свете как о потоке квантов электромагнитного поля или потоке фотонов и разработал фотонную теорию света [3, 4, 9]. В этой теории А. Эйнштейн, исходя из квантовой теории электромагнитно-

го излучения, показал, что не только излучение света, но его распространение и поглощение осуществляется дискретно (порционно) с помощью *«световых квантов»*. Именно такой новый квантовомеханический подход позволил ему сформулировать закон внешнего фотоэффекта (в физику он вошел как *«закон Эйнштейна для фотоэффекта»*) [3, 9]. За открытие на основе квантовой теории закона фотоэлектрического эффекта А. Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике за 1921 г. [3, 9]. Эксперименты американского физика Р. Милликена, выполненные с высокой точностью в 1916 г., соответствовали теории фотоэффекта А. Эйнштейна [9]. Убедительным доказательством дискретности электромагнитной энергии и существования фотона явились результаты экспериментальных исследований другого американского физика Артура Комптона (1892-1962 гг.) по изменению длины волны рентгеновского излучения из-за его рассеяния электронами твердого тела (*эффект Комптона*) [4]. В 1927 г. А. Комpton за открытие и построение теории *«квантового явления Комптона»* стал лауреатом Нобелевской премии по физике [3, 7].

**4. Луи де Бройль и открытие электронных волн.** В истории физики оказалось, что Луи де Бройль (рис. 4) первым внес в современную физику научную идею о волновых свойствах материальных микрочастиц [10]. Исходным пунктом в знаменитых работах выдающегося французского физика-теоретика Луи де Бройля (1892-1987 гг.), посвященных волновым свойствам материальных микрочастиц, стала гениальная физическая идея выдающегося немецкого физика-теоретика А. Эйнштейна, сформулированная им в 1905-1917 гг., о квантовой структуре света (о *«квантах света»*) [3, 11]. Он выдвинул и обосновал гипотезу об универсальности дуализма в микромире [10, 11].



Рис. 4. Выдающийся французский физик-теоретик Луи де Бройль (1892-1987 гг.)

В 1923 г. Луи де Бройль в своих трех научных статьях осуществил существенное развитие идеи А. Эйнштейна о двойственной природе света. Свой оригинальный подход он связал с переносом корпускулярно-волнового дуализма света (его одновременной

двойственности как частицы и как волны) на микро-частицы вещества с массой покоя. Исторически получилось так, что идея о волновой природе материи принадлежит именно этому талантливому ученому. А. Эйнштейн в свое время написал [10]: «...Де Бройль был первым, кто осознал тесную физическую и формальную взаимосвязь между квантовыми состояниями материи и явлениями резонанса еще в те времена, когда волновая природа материи не была открыта экспериментально». Каждой частице материи должна соответствовать волна материи. Эта смелая и революционная мысль Луи де Бройля позволила ему получить ставшее теперь классическим соотношение для длины  $\lambda_e$  волны нерелятивистского электрона в виде [4, 7]:  $\lambda_e = h/(m_e v_e)$ , где  $v_e$  – скорость электрона. Молодой Луи де Бройль считал, что [10]: «...Электрон не может более рассматриваться как простая крупинка электричества. С ним следует связать волну». Полученные физические результаты Луи де Бройль обобщил в 1924 г. в своей докторской диссертации на тему «Исследования по квантовой теории», которую он успешно защитил в Парижском университете (в знаменитой «Сорбонне») [3, 6]. За открытие волновой природы электрона Луи де Бройлю была присуждена Нобелевская премия по физике за 1929 г. [3]. На церемонии его представления и вручения ему этой премии говорилось [10]: «...Де Бройль открыл совершенно новый аспект природы материи, о котором ранее никто не подозревал. Блестящая догадка де Бройля разрешила давний спор, установив, что не существует двух миров, один – света и волн, другой – материи и корпускул. Есть только один общий мир». Какая мудрая и глубокая философско-физическая мысль!

Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля о волновых свойствах электронов было осуществлено выдающимся английским физиком-экспериментатором Джорджем Томсоном (1892-1975 гг.) – сыном ранее указанного мэтра мировой физики Джозефа Джона Томсона, который независимо от американских физиков-экспериментаторов Клинтона Дэвиссона (1881-1958 гг.) и Лестера Джермера (1896-1971 гг.) в 1927 г. открыл дифракцию электронов низких энергий («катодных лучей») на монокристалле никеля Ni [3, 4]. В ходе своих опытов Дж. Томсон показал, что полученные им дифракционные картины очень напоминали уже известную к тому времени дифракцию «рентгеновских лучей». За это выдающееся открытие Дж. Томсон и К. Дэвиссон были удостоены Нобелевской премии по физике за 1937 г. [3, 6].

**5. Эрвин Шрёдингер и создание волновой механики.** Опираясь на законы классической теоретической механики, австрийский физик-теоретик Эрвин Шрёдингер (рис. 5) в 1926 г. опубликовал свои знаменитые четыре статьи, в которых изложил принципиально новый подход к решению квантовых задач для объектов атомной физики [3, 6]. В них он задачи квантовой теории для микромира свел к задаче математической физики на собственные значения некоторой функции, названной им «волновой функцией» [6, 12].

Для математического нахождения данной волновой функции ( $\psi$ -функции) применительно к атому вещества он получил соответствующее дифференциаль-

ное уравнение в частных производных второго порядка (в историю физики оно вошло как «уравнение Шрёдингера» [3, 6]), описывающее поведение связанных электронов в известной ему планетарно-ядерной модели атома [4, 12, 13]. Это волновое уравнение Шрёдингера оказалось обобщением и применением указанных нами ранее «волновых идей» французского физика-теоретика Луи де Бройля к водородоподобному атому [4]. Решение данного уравнения сводилось к стоячим электронным волнам в указанном атоме [4, 6].



Рис. 5. Выдающийся австрийский физик-теоретик Эрвин Шрёдингер (1887–1961 гг.)

Создание волновой (квантовой) механики позволило Э Шрёдингеру по-новому взглянуть на атомную теорию и внутриатомные процессы. Применение волнового уравнения Шрёдингера к описанию квантово-механических процессов в водородоподобных атомах вещества показало, что распределение их связанных электронов в атомной сферической оболочке подчиняется соответствующей квантованной волновой  $\psi_n$ -функции, описывающей в трехмерном пространстве стоячую волну вещества (волну де Бройля). Причем, в указанном случае каждой квантованной волновой  $\psi_n$ -функции соответствовала строго определенная квантованная энергия связанного электрона, указывающая на его энергетический уровень. При таком квантовофизическом подходе для анализа внутриатомных процессов получалось, что связанный электрон рассматриваемого атома мог переходить из одного энергетического состояния, которому соответствовала одна квантованная волновая  $\psi_n$ -функция, в другое энергетическое состояние, описываемое другой квантованной волновой  $\psi_n$ -функцией [4, 6]. Мало того, полученные при этом на основе точного решения волнового уравнения Шрёдингера для изотопа атома водорода  $^1H$  (протия) собственные значения энергии его связанного  $s$ -электрона ( $E_s = -13,6$  эВ) и наиболее вероятного радиуса его орбиты ( $r_s = 0,529 \cdot 10^{-10}$  м) полностью совпадали с расчетными результатами, вытекающими из квантово-ядерной модели атома Бора [4, 7]. По существу Э. Шрёдингером на основе закономерностей волновой механики была разработана новая квантовомеханиче-



ская модель атома (в историю физики она вошла как *квантово-волновая модель атома Шрёдингера*) [3, 4, 13]. За разработку новых форм атомной теории (*волновой механики*) Э. Шрёдингер был удостоен Нобелевской премии по физике за 1933 г. [3]. Согласно этой модели атома распределение электронов в его атомной оболочке описывается квантованными волновыми  $\psi_n$ -функциями, являющимися пространственными стоячими волнами [4]. Из модели атома Шрёдингера вытекало, что связанный электрон, находящийся в атомной оболочке на стационарной орбите, не может излучать энергию по той причине, что его состояние определяется указанной стоячей электронной волной. В теории атома Бора такое положение лишь постулировалось без физического объяснения [4]. Новая атомная теория Шрёдингера объясняла явление смещения энергетических уровней атома под действием внешнего сильного электрического поля (эффект Штарка, открытый в 1913 г. [2, 4, 7]). Квантовая теория Шрёдингера правильно объясняла спектральные линии в водородоподобном атоме [4]. Данная квантовая теория явилась крупнейшим научным открытием первой половины 20-го столетия в области физики атомных процессов.

Американские физики Клинтон Дэвиссон и Лестер Джермер, изучая в конце 1927 г. рассеяние электронов на монокристалле никеля  $Ni$  и сравнивая полученные ими опытные данные с расчетными результатами по известной в материаловедении формуле Брэгга-Вульфа, экспериментально подтвердили существование в природе электронных волн материи. Кроме того, одними из первых экспериментальных подтверждений положений квантовой (волновой) механики явились также физические опыты немецкого ученого Отто Штерна, проведенные им в 1929 г. Данные эксперименты были связаны с изучением волновой природы нейтральных атомов и молекул, рассеиваемых на двухмерной дифракционной решетке кристалла  $LiF$  [4, 6]. О. Штерном при этом было показано, что для легких атомов изотопа водорода  $^1H$  (противя) и гелия  $^4He$  в указанных условиях наблюдается четкая дифракционная картина, а для тяжелых атомов вещества, имеющих малую «дебройлевскую» длину волны, дифракционная картина получается нечеткой (расплывчатой). Причем, в проведенных физических опытах максимумы интенсивности на вышеприведенных нами дифракционных картинах наблюдаются в местах, где волны материи («дебройлевские» волны) собираются (интерferируют) в одинаковой фазе [4].

**6. Вольфганг Паули и формулировка «принципа запрета».** Австрийский физик-теоретик Вольфганг Паули (рис. 6) внес существенный вклад в развитие квантовой механики как теории физических процессов и явлений в микромире природы. В период 1924-1925 гг. он сформулировал свой знаменитый «*принцип запрета*» (в историю физики это понятие вошло как «*принцип запрета Паули*» [3]). По словам самого В. Паули [14]: «...*В атоме не может быть двух электронов, у которых все четыре квантовых числа были бы одинаковы*». В этом и состоит суть этого принципа. Наверное, введение данного физического понятия явилось главным достижением В. Паули в квантовой теории внутриатомных процессов [3, 14].



Рис. 6. Выдающийся австрийский физик-теоретик Вольфганг Паули (1900-1958 гг.)

В соответствии с фундаментальным «*принципом запрета Паули*» в атоме вещества в его электронных оболочках может находиться только один так называемый связанный электрон, характеризующийся соответствующим только для него определенным количественным набором используемых в атомной физике четырех квантовых чисел [4, 7]: главного квантового числа  $n$ ; орбитального квантового числа  $l$ ; магнитного квантового числа  $m_l$ ; спинового квантового числа  $m_s$ . Как известно, в атоме материи квантовое число  $n$  определяет его кинетическую и потенциальную энергии, квантовое число  $l$  – форму электронной орбиты, квантовое число  $m_l$  – положение электронной орбиты в атомном пространстве и квантовое число  $m_s$  – направление его кругового вращения вокруг собственной оси [4, 7]. Этот физический принцип сыграл огромную роль в определении порядка застройки связанными электронами атомной оболочки. За научное открытие «*принципа запрета Паули*» выдающемуся физики-теоретику 20-го века В. Паули была присуждена Нобелевская премия по физике за 1945 г. [3, 5, 6].

**7. Вернер Гейзенберг и формулировка «соотношения неопределенности».** Выдающийся немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг (рис. 7) оказался автором ряда фундаментальных научных результатов в квантовой механике. В 1925 г. им была разработана «*матричная механика*», явившаяся одним из теоретических направлений квантовой физики (в дальнейшем эта механика была доведена до совершенства немецкими физиками-теоретиками Максом Борном и Паскуалем Йорданом) [3]. Отправной «точкой» при создании В. Гейзенбергом этой механики, эквивалентной *волновой механике* Э. Шрёдингера и удостоенной Нобелевской премии по физике за 1932 г. [3], явился его принципиальный отказ от классических и не наблюдаемых исследователем внутриатомных процессов понятий «*положения*» и «*импульса*» электрона в атоме материи и применение вместо них понятий «*частоты*» и «*амплитуды*» его колебаний, которые исследователь мог с высокой точностью определить из оптического эксперимента [15]. В кванто-

вой механике импульс микрочастицы  $p=mv$ , где  $m$  и  $v$  – соответственно масса покоя и скорость микрочастицы, с длиной ее волны  $\lambda$  связан соотношением де Бройля ( $p=h/\lambda$ ) [4]. Как известно, длина волны  $\lambda$  является функцией формы волны и никак не пространственной координаты (например,  $z$ ). Поэтому импульс микрочастицы  $p$  не будет являться функцией координаты  $z$ . В этой связи в квантовой механике невозможно одновременно определить координату  $z$  и импульс  $p$  микрочастицы. В 1927 г. В. Гейзенберг для разрешения этого физического парадокса сформулировал основополагающее положение квантовой механики – «соотношение неопределенности», названное в дальнейшем его именем и имеющее, например, для сопряженных переменных «координата–импульс» вид [4]:  $\Delta z \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$ , где  $\Delta z$ ,  $\Delta p$  – неопределенности в нахождении координаты и импульса микрочастицы.



Рис. 7. Выдающийся немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг (1901-1976 гг.)

**8. «Боровская» формулировка «принципов соответствия и дополнительности».** После разработки своей знаменитой квантовой теории атома Н. Бор продолжал развивать эту теорию, пытаясь обобщить её на случай более сложных, чем атом водорода  $^1\text{H}$  (протий) многоэлектронных атомов. В 1918 г. в статье «О квантовой теории линейчатых спектров» Н. Бор сформулировал количественно так называемый «принцип соответствия», связывающий квантовую теорию с классической физикой [3, 16]. При этом он использовал свою же идею от 1913 г. о том, что в атомной оболочке переходы связанных электронов между стационарными орбитами с большими квантовыми числами должны давать излучение с частотой, совпадающей с частотой обращения электрона в атоме [16]. Формулируя этот принцип, Н. Бор отмечал [16]: «...*Всякий процесс перехода между двумя стационарными состояниями связан с соответствующей гармонической компонентой так, что вероятность наличия перехода зависит от амплитуды колебания. Поляризация же излучения обусловлена более детальными свойствами колебания также, как интенсивность и поляризация излучения в системе волн, испускаемых атомом по классической теории вследствие наличия указанных компонент колебания, определя-*

*ется амплитудой и другими свойствами последних*». Этот принцип позволил Н. Бору определить вероятности переходов электронов и соответственно интенсивности спектральных линий, а также получить правило отбора (в частности, для гармонического осциллятора) и дать интерпретацию числу и поляризации компонент «штарковского и зеемановского расщеплений» спектральных линий в сильных электрических и магнитных полях. «Принцип соответствия» сыграл огромную роль при построении последовательной квантовой механики [16]. Согласно этому принципу уравнения квантовой физики для больших квантовых чисел или при вовлечении в исследуемый процесс большого числа квантов должны совпадать с уравнениями классической физики для определяемых ими усредненных физических величин [4]. Другим важным для понимания физических основ и интерпретации результатов квантовой механики оказался «принцип дополнительности», предложенный Н. Бором в 1927 г. [3, 16]. Этот принцип отражает логическое соотношение между двумя способами описания или наборами представлений для одного и того же события в микромире. Ведь, с одной стороны, предсказания квантовой механики являются вероятностными. С другой стороны, для их интерпретации применяются представления и терминология из классической физики. В основу интерпретации квантовой теории Н. Бор положил корпускулярно-волновой дуализм для микрочастиц, на который первым обратил свое острое и пронизательное внимание Луи де Бройль. Сущность «принципа дополнительности» состоит в том, что для микрочастицы не может возникнуть такой физической ситуации, в которой оба дополнительные аспекты для нее (для одного явления в микромире) проявились бы одновременно и одинаково отчётливо [16]. Иными словами, в микромире нет физических состояний, в которых микрообъект имел бы одновременно точные динамические характеристики (например, координату, импульс, энергию и др. величины), принадлежащие двум определённым различным понятиям, взаимно исключающим друг друга. Именно это научное положение и нашло свое конкретное выражение в сформулированном В. Гейзенбергом в 1927 г. независимо от Н. Бора «соотношении неопределенности».

**9. Создание квантовой статистики микрочастиц.** Начнем здесь с того, что укажем, что в физике под квантовой статистикой понимается статистический метод исследования систем, состоящих из большого числа микрочастиц и подчиняющихся законам квантовой (волновой) механики [7]. Разработка в такой новой для первой половины 20-го века области физики как квантовая механика (физика) статистического подхода к описанию поведения систем с тождественными (одинаковыми) микрочастицами столкнулась с серьезными научными трудностями при попытке ученых-физиков нахождения числа энергетических состояний в произвольном газе (системе микрочастиц), содержащем подобные микрочастицы, которые могут характеризоваться своим «вырождением». К этому для лучшего понимания читателем данного сложного материала следует добавить то, что газ применительно к микрочастицам (например, «элек-

тронный газ» или так называемое «электронное облако» металлического проводника) считается «вырожденным» в случае, когда его свойства, описываемые квантовофизическими закономерностями, существенно отличаются от свойств обычного газа, подчиняющихся законам классической физики и соответственно законам базирующейся на ней статистической физики [7]. Важный шаг в преодолении возникших научных трудностей при создании квантовой статистики газа, состоящего из «вырожденных» микрочастиц, был сделан талантливыми физиками-теоретиками из Азии и Европы в первой четверти 20-го столетия [3].

**Квантовая статистика Бозе-Эйнштейна.** Известный индийский физик-теоретик Шатъендранат Бозе (1894-1974 гг.) в 1924 г. независимо от выдающегося немецкого физика-теоретика Альберта Эйнштейна (1879-1955 гг.) разработал квантовую статистику тождественных микрочастиц с целым и нулевым спином (понятие «*спин*» обозначает собственный механический момент количества движения вращающейся вокруг своей оси микрочастицы), получивших в физике элементарных частиц название «*бозонов*» (к ним относятся фотоны, фононы и некоторые ядра атомов) [3, 4, 7]. Данная статистика по имени ее создателей в квантовой физике получила название «*статистика Бозе-Эйнштейна*» [7, 16]. Укажем, что важной особенностью *бозонов*, названных в честь ученого-физика Ш. Бозе (рис. 8), является их неподчинение фундаментальному «*принципу запрета Паули*». Поэтому для *бозонов* не накладываются ограничения на число микрочастиц, которые могут находиться в определенном квантованном энергетическом состоянии. Применительно к данной квантовой статистике микрочастиц в аналитическом виде были получены функции распределения  $f_B$  *бозонов* (бозе-газов) по энергиям, которые в квантовой физике получили название функций распределения Бозе-Эйнштейна [4, 7, 17].



Рис. 8. Выдающийся индийский физик-теоретик Шатъендранат Бозе (1894-1974 гг.)

**Квантовая статистика Ферми-Дирака.** Молодой и в будущем выдающийся итальянский физик-теоретик Энрико Ферми (1901-1954 гг.), удостоенный в 1938 г. Нобелевской премии по физике за открытие

искусственной радиоактивности химических элементов, вызванной их бомбардировкой «*медленными*» нейтронами, в 1925 г. независимо от тогда также молодого и в будущем тоже выдающегося английского физика-теоретика Поля Дирака (1902-1984 гг.), ставшего в 1933 г. за открытие новых форм атомной теории (за создание *квантовой механики*) лауреатом Нобелевской премии по физике [3], разработал квантовую статистику для микрочастиц с полуцелым *спином* (например, для электронов, протонов, нейтронов и других представителей микромира материи) [7]. Важной особенностью таких микрочастиц (в физике элементарных частиц такие микрочастицы принято сейчас называть «*фермионами*» [4]) является то, что они подчиняются «*принципу запрета Паули*» и в определенном квантованном энергетическом состоянии из них может находиться либо только одна микрочастица, либо ни одной микрочастицы. Эта статистика по имени ее талантливых ученых-разработчиков Э. Ферми (рис. 9) и П. Дирака (рис. 10) в квантовой физике получила название «*статистика Ферми-Дирака*» [7].



Рис. 9. Выдающийся итальянский физик-теоретик, Энрико Ферми (1901-1954 гг.)

Соавторами этой квантовой статистики также в аналитическом виде были получены функции распределения  $f_F$  *фермионов* (ферми-газов) по энергиям, отвечающие среднему числу таких микрочастиц в одном энергетическом состоянии [4, 7]. Данные квантовомеханические функции  $f_F$  в квантовой физике получили название функций распределения Ферми-Дирака [7]. Из сравнения указанных аналитических функций распределения  $f_B$  и  $f_F$  с функцией распределения  $f_{MB}$  Максвелла-Больцмана [4], характерной для «старой» классической физики (соответственно и классической статистики) и отражающей среднее число «*невыврожденных*» микрочастиц в одном энергетическом состоянии, следует, что ни *бозоны*, ни *фермионы* не подчиняются классическому распределению микрочастиц по энергиям (скоростям) в обычных газах, описываемому полученной ранее еще в 19-ом столе-

тии классической функцией распределения  $f_{MB}$  Максвелла-Больцмана [7]. Учитывая, что фермионы входят в состав всех без исключения известных нам атомов и молекул вещества, созданная в первой четверти 20-го века «статистика Ферми-Дирака» приобретала исключительно важное научно-практическое значение для таких интенсивно развивающихся во всем мире областей знаний как ядерная физика, физика элементарных частиц, высоких энергий, плазмы и конденсированного состояния любой материи [3, 4, 7].



Рис. 10. Выдающийся английский физик-теоретик, Поль Дирак (1902-1984 гг.)

**10. Макс Борн и формулировка статистической интерпретации волновой функции микрочастицы.** В 1926 г. выдающийся немецкий физик-теоретик Макс Борн (1882-1970 гг.), применив физическую идею А. Эйнштейна о том, что квадрат амплитуды световых волн характеризует плотность вероятности  $\rho_F$  появления фотонов («квантов электромагнитного поля») [4], предложил научному миру статистическую интерпретацию волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера [3, 18]. При этом М. Борн (рис. 11) постулировал, что величина квадрата модуля квантованной волновой функции  $|\psi_n|^2$  должна представлять собой плотность вероятности  $\rho_n$  для пребывания микрочастицы (например, электрона, протона, нейтрона или др. частицы) в том или ином объеме вещества. Раскрыв физический смысл «шрёдингеровской» волновой  $\psi$ -функции, М. Борн перекинул тем самым своеобразный «мостик» между волновым и корпускулярным представлениями микрочастиц материи. Разработанный М. Борном физический подход был важным «шагом» на пути «примирения» старого классического представления «частиц вещества» с новым квантовомеханическим представлением «волн вещества» [3]. Статистическая интерпретация в 1926 г. М. Борном волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера оказалась первым «шагом» на пути изучения учеными вероятностной интерпретации квантовой механики (физики), определяющей поведение микрочастиц любого вещества.



Рис. 11. Выдающийся немецкий физик-теоретик Макс Борн (1882-1970 гг.)

Такая интерпретация волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера указывала на фундаментальную роль вероятности в законах микромира окружающей нас природы. Более быстрому признанию в мире подобной интерпретации волновой  $\psi$ -функции Шрёдингера поспособствовало ранее описанное нами «соотношение неопределенности Гейзенберга», «примиряющее» корпускулярную и волновую картины распределения микрочастиц, объясняющее связь классической механики с квантовой механикой и ограничивающее применение к микроскопическим телам представлений классической физики. В 1954 г. М. Борн стал лауреатом Нобелевской премии по физике «за выдающиеся результаты в области квантовой механики» [3, 18].

**11. Лев Ландау и создание квантовой теории явления сверхтекучести жидкого гелия.** С приближением температуры физического тела к абсолютно нулю и резким уменьшением скоростей теплового движения атомов «дебройлевские» длины волн его атомов в соответствии с формулой де Бройля и квантовые неопределенности координат его атомов согласно «соотношению неопределенности Гейзенберга» становятся существенно больше его межатомных расстояний [6]. В этих условиях в конденсированном веществе существенную роль начинают играть квантовые эффекты и макроскопическим путем начинает проявляться квантово-волновая природа физических процессов, протекающих в конденсированном состоянии вещества («квантовой жидкости»). С подобным загадочным проявлением физических процессов столкнулись ученые-физики, получившие жидкий гелий-I с критической температурой 4,22 К и жидкий гелий-II (например, выдающийся нидерландский физик-экспериментатор Гейке Камерлинг-Оннес (1853-1926 гг.), ставший в 1911 г. лауреатом Нобелевской премии по физике за открытие явления сверхпроводимости металлов [3, 6]) и изучавшие их физические свойства (например, выдающийся советский физик-экспериментатор Петр Леонидович Капица (1894-1984 гг.), удостоенный в 1978 г. Нобелевской премии по физике за «фундаментальные изобретения и открытия в области низких температур» [3, 6]).

Эксперименты П.Л. Капицы в созданном им в 1935 г. Институте физических проблем (ИФП) АН СССР завершились открытием в 1937 г. явления сверхтекучести жидкого гелия-II с критической температурой 2,19 К [3, 4, 7]. Многие попытки отечественных и зарубежных физиков-теоретиков по объяснению парадоксального поведения жидкого гелия-II долгие годы оставались безуспешными. После перехода в 1937 г. из Украинского физико-технического института (г. Харьков) на работу в ИФП АН СССР (г. Москва) выдающийся советский физик-теоретик и будущий академик АН СССР (с 1946 г.) Лев Давидович Ландау (1908-1968 гг.) вплотную приступил к раскрытию феномена жидкого гелия-II. К 1941 г. Л.Д. Ландау (рис. 12) приходит к выводу о том, что в жидком гелии-II происходит фазовый переход II-рода, не сопровождающийся выделением (поглощением) тепла в отличие от фазового перехода I-рода и связанный с появлением у вещества качественно нового специфического свойства [4, 19].

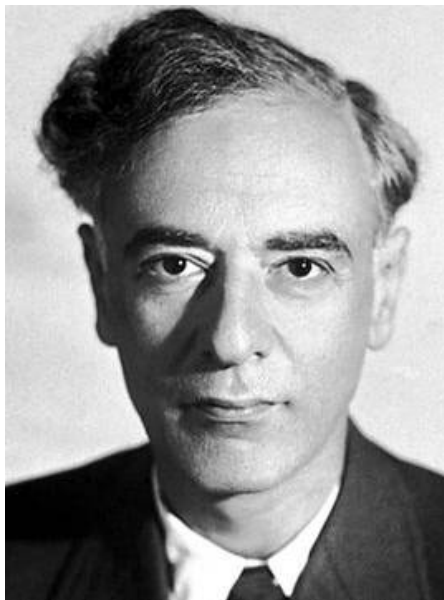


Рис. 12. Выдающийся советский физик-теоретик, академик АН СССР Лев Давидович Ландау (1908–1968 гг.)

Л.Д. Ландау при построении квантовой теории явления сверхтекучести жидкого гелия II-рода воспользовался понятием «квази-частиц» («как бы частиц»), в качестве которых выбрал *фононы* (звуковые кванты энергии, отвечающие за потенциальное движение материи) и *ротоны* (квантовые элементарные возбудители, отвечающие за вихревое движение материи) [3, 6]. Кроме того, Л.Д. Ландау при этом ввел понятия нормальной и сверхтекучей компонент жидкого гелия II-рода. Указанные квази-частицы описывали поведение нормальной компоненты в рассматриваемом гелиевом конденсате. Эта компонента двигалась в нем с трением и участвовала в переносе тепла. Сверхтекучая компонента двигалась в жидком гелии II-рода без трения и не участвовала в переносе в нем тепловой энергии. Таковы основные характеристики разработанной Л.Д. Ландау в 1945 г. двухжидкостной квантовой модели жидкого гелия II-рода. Выполненные в 1945 г. в ИФП АН СССР низкотемпературные

эксперименты с участием будущего доктора физико-математических наук Э. Андроникашвили подтвердили наличие в жидком гелии-II нормальной и сверхтекучей компонент, а также достоверность в целом созданной Л.Д. Ландау квантовой теории явления сверхтекучести жидкого гелия-II [3, 6]. Учитывая фундаментальность этого достижения, в 1962 г. Л.Д. Ландау была присуждена Нобелевская премия по физике «за пионерские исследования в теории конденсированного состояния, в особенности жидкого гелия» [3, 19].

## 12. Квантовая электроника и создание квантовых генераторов электромагнитного излучения.

Под «квантовой электроникой» понимается новая область физики, изучающая методы усиления и генерации электромагнитных колебаний, основанные на использовании эффекта вынужденного (индуцированного) излучения [4, 20]. Напомним, что в 1905 г. выдающийся немецкий физик-теоретик А. Эйнштейн, исходя из статистического анализа флуктуаций энергии равновесного излучения, выдвинул гипотезу о «световых квантах» [3]. В 1916 г. он пришел к пониманию природы равновесного излучения в квантовых системах, обладающих дискретными уровнями энергии излучения. Тогда же им для подобных систем было введено понятие «индуцированного испускания излучения», связанного с энергетическими квантовыми переходами частиц, входящих в единый физический ансамбль (атом, молекулу, твердое тело, газ и др.). В этой связи физическую основу квантовой электроники по [4, 20] составляют следующие три фундаментальных положения. *Первое* – энергия электромагнитного излучения состоит из дискретных порций энергии («световых квантов» или «фотонов»). *Второе* – излучение световых квантов при его высокой интенсивности определяется эффектом их индуцированного испускания. *Третье* – кванты вынужденного и вынуждающего электромагнитного излучения (фотоны) тождественны и подчиняются квантовой статистике Бозе-Эйнштейна. В результате квантовая природа электромагнитного излучения и квантование уровней энергии микрочастиц объективно приводят к существованию в микромире физических процессов, сопровождающихся генерированием тождественных друг другу световых квантов («бозонов»). Бозонность фотонов позволяет переходить в квантовой электронике от корпускулярного представления к волновому, для которого характерны принципы суперпозиции и усиления когерентных колебаний [4, 20]. В 1927 г. выдающимся английским физиком-теоретиком П. Дираком была разработана последовательная квантовая теория излучения (поглощения) света, важнейшим результатом которой явилось строгое обоснование «индуцированного излучения», постулированного А. Эйнштейном, и его когерентности [3, 21]. Несмотря на создание указанных выше физических предположений к возникновению в мире квантовой электроники, лишь к концу 1954 г. в области квантовой электроники был создан одновременно в СССР (в лаборатории колебаний Физического института АН СССР под научным руководством будущих академиков АН СССР Александра Михайловича Прохорова (рис. 13) и Николая Геннадиевича Басова (рис. 14), г. Москва) и



США (в лаборатории излучений Колумбийского университета под научным руководством профессора Чарльза Таунса (рис. 15), г. Нью-Йорк) первый «молекулярный квантовый генератор» микроволнового индуцированного излучения («аммиачный мазер»), имеющий узконаправленный пучок радиоизлучения с длиной волны 1,27 см [5, 21]. В этом физическом приборе благодаря примененной физиками энергетической сортировке и энергетическому возбуждению молекул аммиака в активной квантовой среде с инверсией населенностей, помещенной в объемный резонатор, осуществлялся квантовый переход между дискретными энергетическими уровнями в молекулах аммиака [4, 5]. Данный газовый мазер отличался высокой стабильностью вынужденного когерентного излучения.



Рис. 13. Выдающийся советский физик-экспериментатор, академик АН СССР Александр Михайлович Прохоров (1916–2002 гг.)



Рис. 14. Выдающийся советский физик-экспериментатор, академик АН СССР Николай Геннадиевич Басов (1922–2001 гг.)

Важный научный «шаг» отечественными учеными-физиками в области квантовой электроники был сделан в 1955 г., когда Н.Г. Басов и А.М. Прохоров предложили новый метод радиационного создания в

активной среде инверсии и неравновесных квантовых систем – «трехуровневый метод накачки», широко используемый в квантовых генераторах и понине [5].



Рис. 15. Выдающийся американский физик-экспериментатор Чарльз Таунс (1915–2015 гг.)

Квантовая электроника во второй половине 20-го столетия не ограничилась разработкой только усилителей микроволн посредством вынужденного электромагнитного излучения («мазеров»). В 1960 г. американским ученым-физиком Т. Мейманом на основе кристалла рубина был создан первый твердотельный «оптический квантовый генератор» («рубиновый лазер») [5]. Затем появились газовые, полупроводниковые, химические и иные «лазеры» [5, 21]. В 1964 г. Ч. Таунсу, А.М. Прохорову и Н.Г. Басову была присуждена Нобелевская премия по физике «за основополагающие работы по квантовой электронике, которые привели к созданию мазеров и лазеров» [3]. В настоящее время квантовые генераторы различной выходной мощности работают в непрерывном и импульсных режимах в достаточно широком частотном диапазоне волн индуцированного излучения. Сейчас в мире существует огромное разнообразие «мазеров» и «лазеров» с различными активными квантовыми средами и системами их возбуждения («накачки») [5, 20].

**13. Квантово-волновая природа дрейфа свободных электронов в металле.** Убедительным, наглядным и доступным для многих электрофизиков примером проявления квантово-волновых свойств у таких представителей микромира как электронов являются установленные на макроскопическом уровне недавно в Украине квантовофизические особенности протекания импульсного тока проводимости в металлах, обусловленного дрейфом их свободных электронов [22–27]. Данные особенности проявляются в том, что, например, в проводящей структуре тонкого оцинкованного стального проводника цилиндрической конфигурации с импульсным аксиальным током аperiодической временной формы 9/160 мс сравнительно большой плотности (до 0,37 кА/мм<sup>2</sup>) из-за формирования благодаря квантованным электронным полуволам де Бройля квантованных волновых электронных пакетов (ВЭП) макроскопических размеров в нем возникает продольная периодическая тепловая

макроструктура, состоящая из чередующихся между собой относительно «горячих» и «холодных» продольных участков с визуально фиксируемыми исследователем их длинами (ширинами)  $\Delta z_z$  и  $\Delta z_x$  соответственно. Причем, ширины  $\Delta z_z$  «горячих» продольных участков ВЭП проводника соответствуют указанному ранее «соотношению неопределенности Гейзенберга», определяющему неопределенность продольной координаты  $\Delta z$  дрейфующих электронов с максимальной энергией, приближающейся к энергии Ферми  $W_F$ , в наиболее вероятной зоне их нахождения, соответствующей квадрату модуля квантованной волновой функции  $|\psi_{en}|^2$  для этих электронов. В [22-27] было убедительно как теоретически, так и экспериментально показано, что дрейфующие в металлическом проводнике с электрическим постоянным, переменным или импульсным током свободные электроны («фермионы»), являющиеся квантовыми объектами и подчиняющиеся «принципу запрета Паули», а также удовлетворяющие «квантовой статистике Ферми-Дирака», из-за своей волновой природы по длине  $l_0$  и радиусу  $r_0$  указанного круглого цилиндрического проводника распределяются волновым образом так, что на его длине  $l_0$  и радиусе  $r_0$  всегда укладывается целое число квантованных электронных полувольт де Бройля соответственно длиной  $\lambda_{ln}/2=l_0/n$  и  $\lambda_{rn}/2=r_0/n$ , где  $n=1,2,3,\dots$  – целочисленное квантовое число. Квантованные величины  $\lambda_{ln}/2$  и  $\lambda_{rn}/2$  как раз и определяют шаг периодической структуры для указанных выше квантованных ВЭП в проводниках с электрическим током. Результаты исследований, представленные в [22-27], неопровержимо указывают на явное проявление в металлических проводниках с электрическим током большой плотности «квантового эффекта периодической макролокализации свободных электронов», определяющего возникновение в их проводящей структуре с ВЭП неоднородных периодических продольных и радиальных температурных полей.

**Вывод.** Природа существования и перехода материи на атомарном и субатомарном уровнях из ее одного физического состояния в другое, хаотичного (направленного) движения микрочастиц в физических полях и протекания обусловленных их пространственным перемещением тех или иных вероятностных микро- и макрособытий определяется стохастическими квантовыми физическими явлениями, протекающими в микромире любого вещества и описываемыми известными закономерностями квантовой, атомной и ядерной физики, а также закономерностями физики элементарных частиц, плазмы, высоких энергий и конденсированного состояния материи. В этой связи с учетом имеющихся на сегодня в научном мире теоретических и экспериментальных данных можно уверенно констатировать то одно принципиально важное научное положение, что известные (да, наверное, и еще неведомые) физические процессы и явления в микромире материи носят квантово-волновой и вероятностный характер. Несмотря на это, квантово-волновые процессы, характеризующие объекты микромира, причинно связаны между собой и детерминированы. Они могут быть описаны соответствующими дифференциальными

уравнениями, однозначно определяющими искомые квантованные волновые  $\psi_n$ -функции и иные необходимые физические величины при изучении поведения и эволюции рассмотренных нами микроскопических представителей природы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества. – М.: Просвещение, 1977. – 160 с.
2. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
3. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Изд-во «Феникс», 2006. – 1176 с.
4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Х.: НТМТ, 2011. – 311 с.
6. 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.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
9. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,\\_Альберт](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,_Альберт).
10. <http://100v.com.ua/en/node/2822>.
11. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Де\\_Бройль,\\_Луи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Де_Бройль,_Луи).
12. Грашин А.Ф. Квантовая механика. – М.: Просвещение, 1974. – 207 с.
13. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,\\_Эрвин](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,_Эрвин).
14. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,\\_Вольфганг](https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,_Вольфганг).
15. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,\\_Вернер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,_Вернер).
16. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,\\_Нильс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,_Нильс).
17. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,\\_Шатъендрат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,_Шатъендрат).
18. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,\\_Макс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,_Макс).
19. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,\\_Лев\\_Давидович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,_Лев_Давидович).
20. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/94619>.
21. [http://edu.sernam.ru/lect\\_qe.php?id=13](http://edu.sernam.ru/lect_qe.php?id=13).
22. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2005. – №7. – С. 25-33.
23. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. – С. 13-19.
24. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // Технічна електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 6-11.
25. Баранов М.И. Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током // Электротехника. – 2014. – №4. – С. 34-42.
26. Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макропроявления // Электротехніка і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
27. Баранов М.И. Основные характеристики волнового распределения свободных электронов в тонком металлическом проводнике с импульсным током большой плотности // Электротехника. – 2015. – №10. – С. 20-32.

#### REFERENCES

1. Astafurov V.I., Busev A.I. *Stroenie veshchestva* [Structure of matter]. Moscow, Education Publ., 1977, 160 p. (Rus).
2. Kudryavtsev P.S. *Kurs istorii fiziki* [The course of the history of physics]. Moscow, Education Publ., 1974, 312 p. (Rus).

3. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
5. Baranov M.I. *Antologiiia vydaiushchikhsia dostizhenii v nauke i tekhnike: Monografiia v 2-kh tomakh. Tom 1.* [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.1]. Kharkov, NTMT Publ., 2011. 311 p. (Rus).
6. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiia v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushhiesja 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).
7. Javorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. (Rus).
8. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
9. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,\\_Альберт](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эйнштейн,_Альберт) (accessed 10 April 2014). (Rus).
10. Available at: <http://100v.com.ua/en/node/2822> (accessed 12 May 2011). (Rus).
11. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Де\\_Бройль,\\_Луи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Де_Бройль,_Луи) (accessed 18 September 2013). (Rus).
12. Grashin A.F. *Kvantovaja mehanika* [Quantum mechanics]. Moscow, Education Publ., 1974, 207 p. (Rus).
13. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,\\_Эрвин](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шрёдингер,_Эрвин) (accessed 15 June 2012). (Rus).
14. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,\\_Вольфганг](https://ru.wikipedia.org/wiki/Паули,_Вольфганг) (accessed 10 April 2014). (Rus).
15. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,\\_Вернер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Гейзенберг,_Вернер) (accessed 21 May 2012). (Rus).
16. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,\\_Нильс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бор,_Нильс) (accessed 10 May 2013). (Rus).
17. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,\\_Шатъендранат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бозе,_Шатъендранат) (accessed 22 February 2010). (Rus).
18. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,\\_Макс](https://ru.wikipedia.org/wiki/Борн,_Макс) (accessed 21 April 2008). (Rus).
19. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,\\_Лев\\_Давидович](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ландау,_Лев_Давидович) (accessed 18 September 2013). (Rus).
20. Available at: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/94619> (accessed 11 May 2011). (Rus).
21. Available at: [http://edu.sernam.ru/lect\\_qe.php?id=13](http://edu.sernam.ru/lect_qe.php?id=13) (accessed 20 August 2012). (Rus).
22. Baranov M.I. Wave distribution of free electrons in conductor with electric current of the conductivities. *Electrical Engineering*, 2005, no.7, pp. 25-33. (Rus).
23. Baranov M.I. New physical mechanisms and approaches in the study of the formation and distribution of the electric conduction current in the conductor. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2007, no.1, pp. 13-19. (Rus).
24. Baranov M.I. Characteristic radial distribution of free electrons in a cylindrical conductor with varying electric current. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2009, no.1, pp. 6-11. (Rus).
25. Baranov M.I. Features heating thin bimetallic conductor large pulse current. *Elektrichestvo*, 2014, no.4, pp. 34-42. (Rus).

26. Baranov M.I. Quantum-wave nature of electric current in a metallic conductor and some of its electrophysical macrophenomena. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 25-33. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
27. Baranov M.I. Main characteristics of the wave distribution of free electrons in a thin metallic conductor with a pulse current of high density. *Elektrichestvo*, 2015, no.10, pp.20-32. (Rus).

Поступила (received) 21.12.2015

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 34: Discovery and study of quantum-wave nature of microscopic world of matter.**

**Purpose.** Implementation of brief analytical review of the basic distinguished scientific achievements of the world scientists-physicists in area of discovery and study of quantum-wave nature of physical processes and phenomena flowing in the microscopic world of circumferential people matter. **Methodology.** Scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of scientific and technical information in area of theoretical and experimental physics, devoted the results of researches of quantum and physical processes flowing in nature on atomic and subatomic levels. **Results.** The brief scientific and technical review of the basic scientific discovery and achievements of scientists-physicists is resulted in area of structure of atom of matter, generation, radiation, distribution and absorption of physical bodies of short-wave hertzian waves, indicative on a dominating role in the microscopic financial world of positions and conformities to the law of wave (by quantum) mechanics, carrying especially probabilistic character a microstructure. **Originality.** Systematization is executed with exposition in the short concentrated form of the known materials on the quantum theory (electromagnetic) of caloradiance, quantum theory of atom, electronic waves, quantum theory of actinoelectricity, quantum statistics of microparticleless, quantum theory of the phenomenon superfluidity of liquid helium, quantum electronics and quantum-wave nature of drift of lone electrons in the metal of explorers with an electric current. **Practical value.** Popularization and deepening of fundamental physical and technical knowledges for students and engineer and technical specialists in area of classic and quantum physics, extending their scientific range of interests, and also support a further scientific study by them surrounding nature and to development of scientific and technical progress in society. References 27, figures 15.  
**Key words:** quantum theory of thermal radiation, quantum theory of atom, electron waves, quantum theory of photoelectric effect, quantum statistics of microparticles, quantum theory of the phenomena of superfluidity of helium, quantum electronics, quantum wave nature of the drift of electrons in metal, review.

В.И. Милых

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СТАТОРЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ АВТОНОМНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

*На основі чисельних розрахунків обертового магнітного поля виконана оцінка роботи турбогенератора при несиметричному навантаженні. Аналізуються часові функції магнітної індукції в нерухомих точках магнітної системи статора, форма і гармонійний склад ЕРС його обмоток, їхні потужності. Результати розрахунків при несиметричному навантаженні порівнюються з аналогічними результатами при симетричному навантаженні. Бібл. 14, табл. 2, рис. 9. Ключові слова: турбогенератор, несиметричне навантаження, магнітні поля, чисельні розрахунки, електромагнітні процеси, часові функції.*

*На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля проведена оценка работы турбогенератора при несимметричной нагрузке. Анализируются временные функции магнитной индукции в неподвижных точках магнитной системы статора, форма и гармонический состав ЭДС его обмоток, их мощности. Результаты расчетов при несимметричной нагрузке сопоставляются с аналогичными результатами при симметричной нагрузке. Библ. 14, табл. 2, рис. 9. Ключевые слова: турбогенератор, несимметричная нагрузка, магнитные поля, численные расчеты, электромагнитные процессы, временные функции.*

**Введение.** Наряду с основным режимом работы турбогенераторов (ТГ) на симметричную нагрузку, на который они обычно и проектируются [1], Межгосударственным стандартом ДСУ 533-2000 регламентируется и длительная работа при несимметричной нагрузке. И это относится как к автономной работе ТГ, так и к работе на электроэнергетическую систему [2].

Работа на несимметричную нагрузку приводит к целому ряду дополнительных проблем в эксплуатации ТГ, которые имеют электромагнитную природу и выливаются в повышенную термическую и силовую напряженность, в проблемы вибрации и некачественной трехфазной системы электроснабжения.

Так, например, для ТГ мощностью до 100 МВ·А, согласно стандарту и нормам VDE 0530, допускается длительная несимметричная нагрузка с током обратной последовательности, составляющим до 8 % от номинального тока. При больших мощностях, ввиду повышенного использования, допустимая несимметричная нагрузка должна быть уменьшена.

Эти ограничения являются результатом многочисленных исследований несимметричных режимов турбогенераторов [3], которыми выявлено, что необходимо усиление конструкции для достаточной термической стойкости ротора.

Расчетные исследования работы при несимметричной нагрузке, проводимые ранее аналитическими методами, не могли охватить всей полноты электромагнитных процессов в ТГ. С развитием численных методов расчета электромагнитных полей, возможности математического моделирования существенно возросли. Однако предпринимаемые попытки исследования в основном касаются расчета вихревых токов (ВТ) в локальных электропроводящих элементах на поверхности ротора от магнитного поля токов обратной последовательности при весьма серьезных упрощениях области расчета.

Так, например, в [4] и [5] выполнено компьютерное моделирование электромагнитных процессов ТГ 300 МВт в двухмерной постановке при продолжи-

тельной несимметричной нагрузке. Основное внимание уделено исследованию ВТ и добавочных потерь мощности в пазовых клиньях ротора. Однако в этих двух работах приводятся настолько противоречивые результаты, что приходится сомневаться в их достоверности: плотности тока и тепловыделений различаются на несколько порядков.

Выявить проблемы эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке с разных сторон, а не только с точки зрения ВТ в клиньях ротора, с достаточной степенью адекватности можно, только рассматривая ТГ в целом, не ограничиваясь его локальными упрощенными частями. В полной постановке это задача чрезвычайной сложности. Поэтому здесь, сохраняя полную структуру электромагнитной системы ТГ, рассматриваем иной крайний вариант допущений – отсутствие реакции ВТ в элементах ротора.

Это позволяет выявить «верхний» уровень проблем электромагнитного характера, которые в реальности будут сглажены демпфирующей реакцией токов, возникающих в электропроводящем массиве бочки ротора и в отдельных его элементах.

Новые возможности для исследования проблем электромагнитного характера при эксплуатации ТГ с несимметричной нагрузкой предоставляют численные методы расчета магнитных полей [6, 7] в сочетании с быстродействующими компьютерами и эффективным программным обеспечением. Это и способствовало новизне предоставляемых результатов, так как рассматривается электромагнитная система ТГ в целом.

**Цель работы.** Данная работа посвящена оценке влияния несимметрии нагрузки ТГ на распределение магнитного поля, электрические и энергетические процессы в них на основе численно-полевого анализа в рамках указанных ограничений стандартов. Это проводится посредством выявления и анализа временных функций магнитной индукции (МИ) в различных точках статора ТГ, а также аналогичных функций магнитного потокоцепления (МПС) и ЭДС фазных обмоток статора.

© В.И. Милых

Численные методы расчета магнитных полей снимают ограничения на учет реальных конструктивных форм электрических машин в целом и их элементов, на учет насыщения магнитопровода. При этом мощные современные компьютеры позволяют это сделать и в статике, и в динамике. Примеры таких исследований приведены в работах автора [7, 8] и других исследователей, например, в [9].

**Объект исследования.** Демонстрационные расчеты проводятся на двухполюсном трехфазном ТГ, поперечное сечение электромагнитной системы которого дано на рис. 1. Он имеет номинальные: мощность  $P_N=35$  МВт, фазные напряжение  $U_{sN}=6,3$  кВ и ток  $I_{sN}=2315$  А при схеме обмотки статора – «треугольник»; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{sN}=0,8$ ; частоту  $f_s=50$  Гц. Активная длина статора  $l_a=2,7$  м; немагнитный зазор – 27 мм; радиус ротора – 0,408 м; на фазную обмотку статора приходится  $N_s=18$  последовательных витков, ее относительное укорочение  $\beta_s=22/27$ ; сопротивления фазной обмотки: активное  $R_s = 0,00537$  Ом; реактивное от лобового рассеяния  $X_v = 0,134$  Ом; в обмотке ротора число витков  $N_r=224$ .

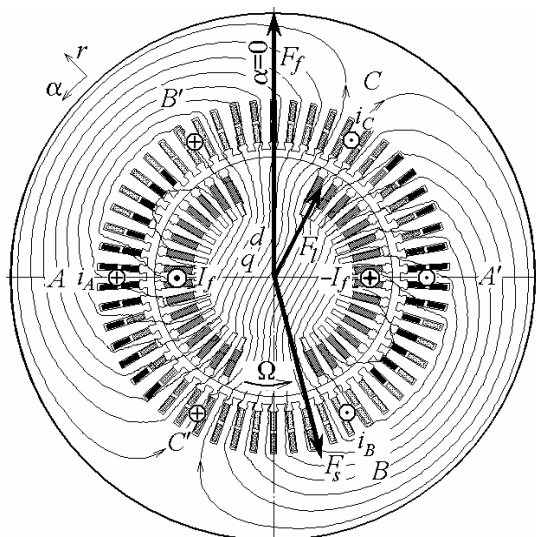


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора с картиной магнитного поля при несимметричной нагрузке

**Теоретические основы анализа несимметричного режима работы ТГ.** Несимметричные режимы в трехфазных ТГ обуславливаются различием фазных токов ввиду разных нагрузок фазных обмоток статора. Эти режимы исследуются с помощью метода симметричных составляющих [2, 3]. Конкретно рассматриваются фазные токи прямой  $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}$  и обратной  $I_{A2}, I_{B2}, I_{C2}$  последовательностей и результирующие токи  $I_A, I_B, I_C$ . Принятая исходная их система представлена на рис. 2 посредством векторной диаграммы.

Согласно ДСУ 533–2000, действующие значения токов обратной последовательности приняты равными  $0,08 \cdot I_{sN}$ . Кроме того, наибольшее действующее значение из всех результирующих фазных токов ограничено номинальным значением  $I_{sN}$ .

На этой основе расчетным путем определено, что действующие значения фазных токов составляют  $I_A=2170,2$  А;  $I_B=2314,7$  А;  $I_C=2015,3$  А, а подробнее методика их расчета представлена в [10].

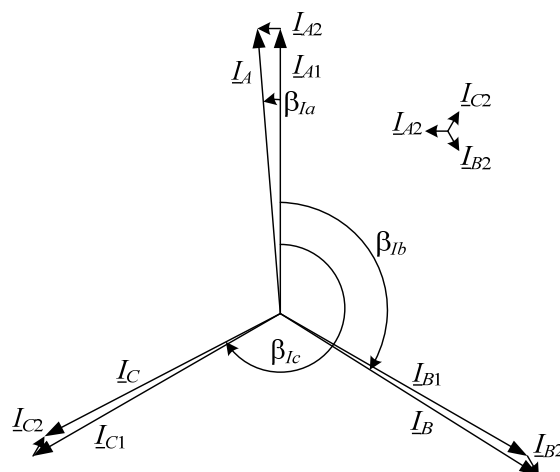


Рис. 2. Фазные токи прямой и обратной последовательностей и результирующие токи ТГ

В расчетах вращающихся магнитных полей используются мгновенные значения фазных токов [7, 8]. В данной работе при несимметричной нагрузке фазные токи определяются их временными функциями:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{ma} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ia} + \beta); \\ i_B &= I_{mb} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ib} + \beta); \\ i_C &= I_{mc} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ic} + \beta), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega=2 \pi f_s$  – угловая частота;  $I_{ma}, I_{mb}, I_{mc}$  – амплитуды токов, определяемые через уже упомянутые их действующие значения.

Начальные фазы токов  $\beta_{Ia}, \beta_{Ib}, \beta_{Ic}$  определились изначально суммированием векторов на рис. 2 и поэтому жестко связаны друг с другом. Затем они были повернуты все на подобранный численными экспериментами некоторый угол таким образом, чтобы при  $\beta=0$  результирующая МДС обмотки статора  $F_s$  была направлена по продольной оси ротора  $d$ , которая показана на рис. 1. Так получены необходимые начальные фазы  $\beta_{Ia} = 9,15^\circ$ ;  $\beta_{Ib} = -117,56^\circ$ ;  $\beta_{Ic} = -237,88^\circ$ .

В (1) дополнительный угол поворота  $\beta$  для всех токов, соответственно, поворачивает вектор МДС  $F_s$  на тот же угол с таким условием, чтобы при заданных токах статора и токе возбуждения обеспечить необходимую выходную электрическую мощность ТГ, как это представлено в [11]. Поставленный в такую позицию вектор  $F_s$  показан на рис. 1. Вместе с вектором МДС обмотки возбуждения  $F_f$  они образуют условную результирующую МДС в режиме нагрузки  $F_l$ .

Система фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ подробно представлена в [11] для режима его симметричной нагрузки. Этот угол  $\beta$  и ток возбуждения  $I_f$  определяются по специальной методике из условия, что они должны обеспечить номинальные выходные данные ТГ: напряжение  $U_{sN}$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_{sN}$ , что дает при номинальном токе статора  $I_{sN}$  номинальную активную мощность  $P_N$ . Конкретно, для рассматриваемого ТГ при симметричной нагрузке выявлено  $\beta=-165,12^\circ$  и  $I_f=632$  А. Действующие значения фазных токов составляли  $I_A=I_B=I_C=2315$  А, а в системе (1) было принято  $\beta_{Ia}=0$ ;  $\beta_{Ib}=-120^\circ$ ;  $\beta_{Ic}=-240^\circ$ .



Для адекватного отображения изменений, которые происходят в ТГ при переходе от симметричной нагрузки к несимметричной, установлено, что при этом управляющие воздействия на ТГ отсутствуют. То есть от турбины на вал ТГ поступает та же механическая мощность и сохраняется ток возбуждения, что и при симметричной нагрузке. На этой основе численными экспериментами, используя уже названное значение  $\beta$  как первое приближение, было выявлено, что номинальная мощность при несимметричной нагрузке получается при  $\beta=167,2^\circ$  и уже представленном токе возбуждения  $I_f=632$  А. Векторная диаграмма сформированной несимметричной системы токов и полученных в результате расчета других электромагнитных величин будет представлена далее.

Для анализа электромагнитных процессов в активной части ТГ магнитное поле при заданных токах его обмоток рассчитывалось в двухмерной постановке в его поперечном сечении (рис. 1). Это поле описывается известным дифференциальным уравнением

$$\operatorname{rot} \left[ \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (2)$$

где  $A_z, J_z$  – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока;  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\vec{k}$  – орт по аксиальной оси  $z$ .

**Организация расчета временных функций электромагнитных величин.** Значения заявленных вместе с целью работы величин МИ, МПС и ЭДС определяются на основе расчета магнитного поля ТГ, а их временные функции – многопозиционными такими расчетами [7, 8] для временного ряда с шагом  $\Delta t$ :

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); k=1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

при соответствующих угловых позициях ротора

$$\alpha_k = \Delta \alpha (k-1); k=1, 2, \dots, K, \quad (4)$$

и с синхронным вращением магнитного поля статора изменениями фазных токов (1) в его обмотке в соответствии с рядом  $t_k$  (3).

В (3) и (4)  $\Delta \alpha = \Omega \Delta t$ ,  $\Omega = \omega/p$  – угловые шаг и скорость вращения ротора;  $p$  – число пар полюсов.

Символ  $K$  в (3), (4) обозначает число позиций, позволяющее в достаточной мере сформировать временные функции на их периоде изменения  $T$ .

Рассматриваемые в данной работе функции имеют полупериодичную асимметрию с условием типа

$$\Gamma(t_k + T/2) = -\Gamma(t_k), k=1, 2, \dots, K, \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – пока некоторое обобщенное обозначение.

Поэтому реально функции конкретных величин с учетом периодичности магнитного поля ТГ сформированы при повороте ротора от 0 до  $180^\circ$  с угловым шагом в  $1^\circ$ , то есть  $K$  равняется 180.

Магнитное поле на основе (2) рассчитывается методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по программе FEMM [12]. Операции при ее работе по расчету поля, определению электромагнитных параметров и формированию временных функций выполнялись управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [13].

Картина магнитного поля в режиме несимметричной нагрузки в исходный момент времени пред-

ставлена на рис. 1 силовыми линиями. Отметим, что структура магнитного поля примерно соответствует тому, что было и в случае симметричной нагрузки.

#### Временные функции магнитной индукции.

Базовой величиной магнитного поля, используемой при электромагнитных расчетах, является МИ в форме радиальной и угловой составляющих и модуля:

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \alpha}; B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}; B = \sqrt{B_r^2 + B_\alpha^2}. \quad (6)$$

Заметим, что в зонах шихтованных сердечников программа FEMM «выдает» значения МИ, «размазанные» на всю их аксиальную длину. Поэтому надо делить эти значения на  $k_{Fe}$  – коэффициент заполнения сердечника сталью. Тогда получатся значения МИ непосредственно для стальных листов. Для данного ТГ, с учетом шихтовки и пакетирования сердечника статора, этот коэффициент составил 0,78.

В неподвижных точках электромагнитной системы ТГ получены по уже представленному принципу временные функции МИ в дискретной форме:

$$B_r(t_k), B_\alpha(t_k), B(t_k), k=1, 2, \dots, K. \quad (7)$$

Отметим, что при распространении полученных значений на второй полуцикл по условию (5) для модуля  $B$  знак менять не надо.

Графики временных функций (7) для двух зафиксированных в зазоре точек представлены на рис. 3, где время дано в относительных единицах. Вариант  $a$  соответствует точке в середине зазора,  $b$  – на расточке сердечника статора.

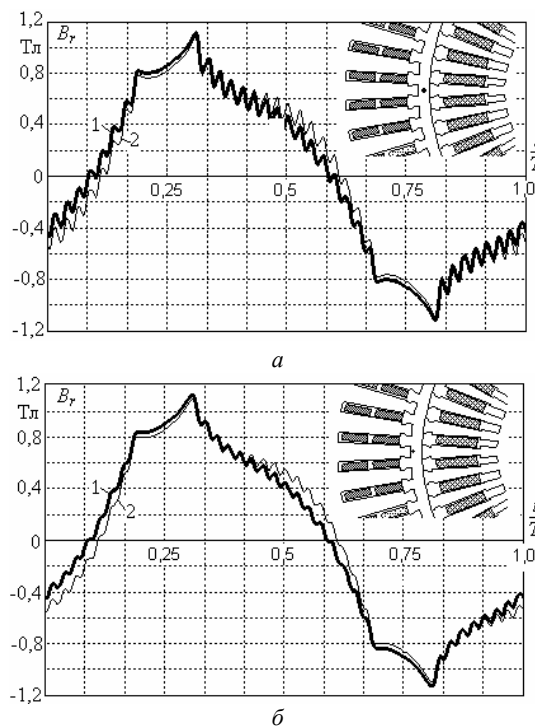


Рис. 3. Временные функции радиальной составляющей МИ в обозначенных точках в зазоре на оси зубца сердечника статора: 1 – несимметрия; 2 – симметрия

Представленные функции далеки от синусоидальных. В их графиках очевидны зоны влияния больших зубов ротора и зубцовые пульсации от остальных его зубцов. Пульсации усиливаются по мере приближения к поверхности ротора (от рис. 3, б до

рис. 3,а). Во временных функциях в неподвижных точках зубцовые пульсации от сердечника статора не проявляются, как это подробнее представлено в [8].

На рис. 4 изображены временные функции радиальной составляющей магнитной индукции в зубце сердечника статора в обозначенных на фрагменте рисунка точках  $z1$  и  $z2$  – в его коронке и основании. Функции  $B_r(t)$  опять далеки от синусоидальных, и в значительной мере формируются зубчатой структурой ротора, хотя с некоторым затуханием зубцовых пульсаций по сравнению с тем, что было в зазоре (рис. 3). Полученные графики свидетельствуют о том, что принятый при проектировании ТГ синусоидальный характер магнитной индукции в зубцах является весьма грубым приближением.

На рис. 5 показаны временные функции угловой составляющей  $B_\alpha$  и модуля МИ  $B$  в обозначенной точке в спинке сердечника статора. Функции  $B_\alpha(t)$  близки к синусоидальным, хотя и испытывают некоторые искажения, доходящие от уже представленных функций в зазоре и зубцах.

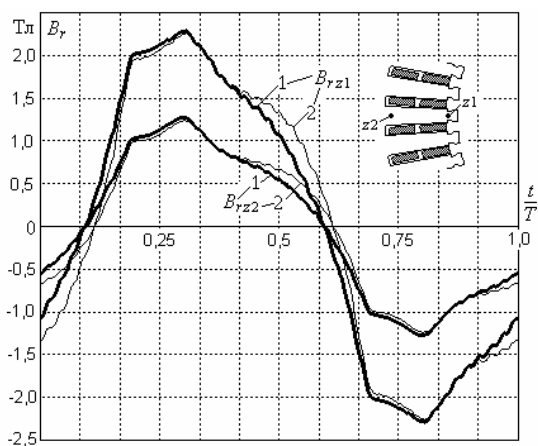


Рис. 4. Временные функции радиальной составляющей  $B_r$  магнитной индукции в зубце сердечника статора: 1 – несимметрия; 2 – симметрия

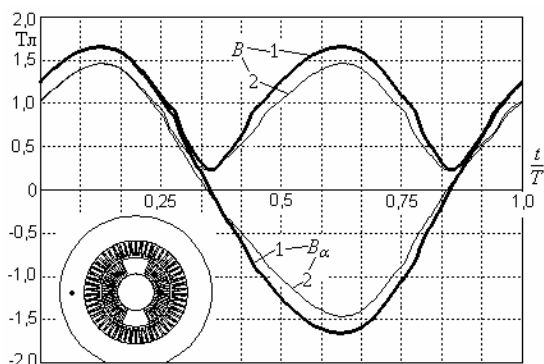


Рис. 5. Временные функции угловой составляющей  $B_\alpha$  и модуля  $B$  магнитной индукции в сердечнике статора: 1 – несимметрия; 2 – симметрия

В целом на рис. 3 – 5 отличия для разных типов нагрузки ТГ хотя и заметны, но не принципиальны. А интерес в целом представляет характер этих функций, получение которых, в принципе, оказалось возможным именно на основе многопозиционных расчетов магнитных полей. Это является нетривиальным подходом для электрических машин вообще.

**Магнитное потокоцепление и ЭДС фазных обмоток статора.** Как уже представлялось в [7], основой для ЭДС является временная функция МПС фазной обмотки статора.

МПС находится по распределению ВМП. Так, например, для любой из шести фазных зон (рис. 1) МПС определяется на основании формулы

$$\Psi = \frac{N_s I_a}{S_\phi} \int_{S_\phi} A_z dS, \quad (8)$$

где  $S_\phi$  – площадь сечения по токопроводящим элементам фазной зоны.

Определение МПС по формуле (8) не составляет труда, так как для определения  $S_\phi$  и интеграла в интегрированном в программу FEMM скрипте Lua есть соответствующие процедуры [14].

Для всей фазной обмотки, например для фазы  $A$ , МПС находится по формуле

$$\Psi_A = \Psi_{sA} - \Psi_{sA'}, \quad (9)$$

где  $\Psi_{sA}$  и  $\Psi_{sA'}$  – МПС в фазных зонах  $A$  и  $A'$  (рис. 1), определенные по формуле (8).

На этой основе, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося магнитного поля, была сформирована дискретная временная функция МПС

$$\Psi_s(t_k), k=1,2,\dots,K, \quad (10)$$

где индекс  $s$  является обобщенным обозначением любой из фазных обмоток:  $A, B, C$ .

Функция  $\Psi_s(t_k)$  раскладывается аналогично [7, 8] по известным правилам в косинусный гармонический ряд из нечетных гармоник с учетом условия (5)

$$\Psi_s = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \gamma_v), \quad (11)$$

где суммирование по номерам гармоник  $v$  возможно вплоть до номера  $N_g$ , который, в принципе, ограничен принятым в (5, 10) значением  $K$ .

На основании закона электромагнитной индукции от (11) делается переход к ЭДС фазной обмотки:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} v \omega \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \gamma_v - \pi/2), \quad (12)$$

откуда получаются амплитуды гармоник  $E_{m,v} = v \omega \Psi_{m,v}$ .

Временные функции МПС (11) и ЭДС (12) определялись для каждой из фазных обмоток и при несимметричной нагрузке оказались, естественно, разными. Они представлены на полном периоде их изменения на рис. 6.

Для сравнения, расчеты были проведены по той же методике и при симметричной нагрузке ТГ. Соответствующие результаты представлены на рис. 7.

Очевидно, что при симметричной нагрузке временные функции МПС близки к синусоидальным, а вот в характере ЭДС уже проявляется заметное влияние высших гармоник, которые, в отличие от аналогичных гармоник МПС, умножаются на их номера.

При несимметричной нагрузке различие функций ЭДС разных фаз и их отличия от правильных синусоид проявились в значительно большей мере, причем искажения и отличия заметны уже и для исходных для ЭДС функций МПС.

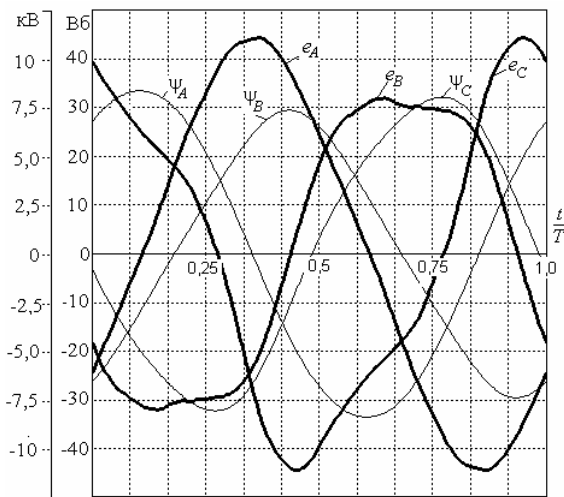


Рис. 6. Временные функции фазных МПС и ЭДС при несимметричной нагрузке ТГ

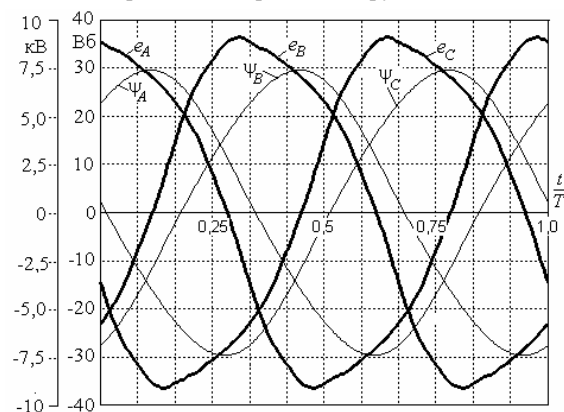


Рис. 7. Временные функции фазных МПС и ЭДС при симметричной нагрузке ТГ

В табл. 1 представлены числовые данные для фазных ЭДС при несимметричной нагрузке ТГ. Здесь амплитуда первой гармоники ЭДС  $E_{m,1}$  и ее действующее значение  $E_{s,1}$  даны в абсолютном измерении, а амплитуды высших гармоник – в относительной форме  $E_{m,v,*} = E_{m,v} / E_{m,1}$ . В целом, влияние высших гармоник оценивается коэффициентом искажения

$$d_{dist} = \frac{E_{m,1}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{N_g} E_{m,v}^2}} \quad (13)$$

Таблица 1

Гармонический состав ЭДС обмотки статора				
Фаза	$E_{m,1}$ , В	$E_{s,1}$ , В	$E_{m,3,*}$	$E_{m,5,*}$
A	10702	7568	0,043	0,007
B	8865	6268	0,144	0,018
C	10071	7121	0,183	0,015
Фаза	$E_{m,7,*}$	$E_{m,9,*}$	$E_{m,11,*}$	$d_{dist}$
A	-	0,005	0,003	0,999
B	0,003	0,007	0,003	0,990
C	0,004	0,008	0,004	0,983

Очевиден большой удельный вес третьей гармоники, которая при схеме «треугольник» также создаст проблему значительных паразитных циркуляционных токов в трех фазных обмотках [5].

В дополнение к уже упоминавшимся величинам фазовых соотношений в (1), из разложения типа (11)

для каждой фазной обмотки по аргументу  $\gamma_v$  определяются начальные фазы МПС  $\gamma_{\psi a}$ ,  $\gamma_{\psi b}$  и  $\gamma_{\psi c}$  для первых гармоник. Фазные ЭДС отстают от своих МПС на  $\pi/2$  или  $90^\circ$  соответственно (12). Тогда начальные фазы ЭДС составляют  $\gamma_{Ea} = \gamma_{\psi a} - 90^\circ$ ;  $\gamma_{Eb} = \gamma_{\psi b} - 90^\circ$ ;  $\gamma_{Ec} = \gamma_{\psi c} - 90^\circ$ . Определенными становятся и фазовые сдвиги ЭДС относительно токов своих фазных обмоток:

$$\varphi_{IEa} = \gamma_{Ea} - \beta_{Ia}; \varphi_{IEb} = \gamma_{Eb} - \beta_{Ib}; \varphi_{IEc} = \gamma_{Ec} - \beta_{Ic} \quad (14)$$

Все эти фазовые соотношения и соотношения величин фазных токов, МПС, ЭДС и напряжений представлены в масштабе на рис. 8 посредством векторной диаграммы. Это соответствует первым гармоникам электромагнитных величин ТГ при несимметричной нагрузке для всех фазных обмоток.

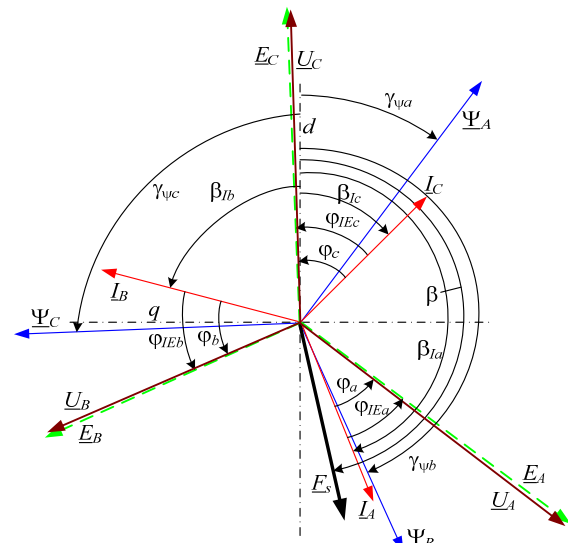


Рис. 8. Векторная диаграмма электромагнитных величин при несимметричной нагрузке ТГ

Определение фазного напряжения проведем на примере фазной обмотки A. Необходимый для этого фрагмент векторной диаграммы с рис. 8 дан на рис. 9, а в оригинале с увеличением масштаба, а в повернутом виде без соблюдения пропорций показан на рис. 9, б. Здесь дополнительно изображены падение напряжения на активном сопротивлении  $\underline{U}_R = R_s I_A$ , а также ЭДС от потока лобового рассеяния  $\underline{E}_v = -jX_v I_A$ .

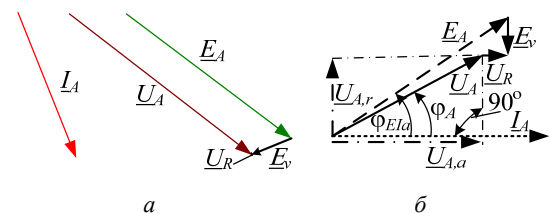


Рис. 9. Фрагменты векторной диаграммы

Из геометрических соотношений на рис. 9, б получаются активная и реактивная составляющие напряжения, его действующее значение и фазовый сдвиг от вектора тока, активная мощность:

$$U_{A,a} = E_A \cos \varphi_{IEa} - U_R; U_{A,r} = E_A \sin \varphi_{IEa} - E_v; \quad (15)$$

$$U_A = \sqrt{U_{A,a}^2 + U_{A,r}^2}; \varphi_{sA} = \arctg(U_{A,r} / U_{A,a}); \quad (16)$$

$$P_{aA} = U_A I_A \cos \varphi_{sA} \quad (17)$$

Аналогично все проделано для других фазных обмоток и результаты расчетов с обобщающим индексом  $s$  представлены в табл. 2. Очевидно, что суммарная активная мощность ТГ составила 34,90 МВт, т.е. выработана практически номинальная мощность. При уменьшенных токах статора, но при номинальном токе возбуждения, это произошло за счет увеличения ЭДС и напряжения ввиду увеличения МПС при уменьшенной реакции якоря.

Таблица 2

Данные расчета при несимметричной нагрузке

Фаза	$I_s$	$U_s$	$\cos \varphi_s$	$\varphi_s$ , град	$P_a$ , МВт
A	2170	7489	0,861	30,55	14,00
B	2315	6174	0,785	38,28	11,22
C	2015	7029	0,684	46,86	9,69

В табл. 2 следует обратить внимание на различие нагрузок фазных обмоток – по активным мощностям и по характеру, заданному коэффициентами мощности. Это значит, что одна из причин конкретно рассмотренной несимметрии – разный характер и величина фазных сопротивлений трехфазной нагрузки.

Значения фазных напряжений в табл. 2 не очень сильно отличаются от фазных ЭДС в табл. 1. Следовательно, напряжения имеют примерно такой же гармонический состав, как и ЭДС. Поэтому и фазные токи будут иметь аналогичный состав. Значит, несимметричная нагрузка сопровождается всегда не синусоидальными, а более сложными функциями токов в виде гармонических рядов примерно такого же состава, как и в табл. 1.

Из всего этого вытекает, что принятый синусоидальный характер токов здесь (1) и в стандарте является еще одним серьезным допущением принятой расчетной методики как в данной работе, так и при расчетах несимметричной нагрузки в упомянутых [4, 5] и других аналогичных работах.

Видимо, более точная постановка задачи расчета несимметричных режимов работы заключается в том, чтобы согласовать временные функции фазных токов и ЭДС – возможно, итерационным путем или другим каким-либо эффективным методом.

Поставленная в [10] и продолженная здесь тема исследования не исчерпывает возможностей разработанного метода анализа несимметричного режима работы ТГ. Этот метод позволяет продолжить начатые исследования, и, прежде всего, рассмотрением электромагнитных процессов в роторе и силовых действий во всей электромагнитной системе ТГ.

#### Выводы.

1. Проблемы эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке в достаточно полной мере выявить можно, рассматривая ТГ в целом, а не его локальные упрощенные части. При этом для анализа широкого спектра проблем электромагнитного характера эффективной основой являются многопозиционные численные расчеты вращающихся магнитных полей, позволяющие сформировать временные функций рассматриваемых величин.

2. Чрезвычайно сложная задача анализа электромагнитных явлений в полной структуре электромагнитной системы ТГ пока решается при допущении отсутствия реакции ВТ в элементах конструкции

ротора, а также, как выявилось, синусоидального характера фазных токов ТГ. Это позволило выявить предельный уровень проблем электромагнитного характера, которые в реальности будут сглажены демпфирующей реакцией указанных токов.

3. По рассмотренному комплексу электромагнитных явлений в рамках стандартных ограничений несимметричного режима работы ТГ установлено, что:

- функции магнитной индукции в неподвижных точках магнитной системы в целом претерпели изменения, но не принципиальные, в зазоре и зубцах сердечника статора они далеки от синусоидальных, да еще имеют проявление зубцовых пульсаций из-за сердечника ротора, в спинке статора она приближены к синусоидам;

- временные функции ЭДС, а, значит, и напряжений фазных обмоток статора по форме значительно отличаются от синусоид и друг от друга, очевидны также отличия этих ЭДС и по значениям;

- наблюдается значительный небаланс активных мощностей, вырабатываемых отдельными фазными обмотками статора.

4. Смысл показанного «верхнего» уровня проблем электромагнитного характера в том, что понимать: для их «сглаживания» до приемлемого уровня требуется адекватная реакция названных токов, которая фактически перенесет проблемы с них на эти токи, что также является серьезной проблемой эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов. 2-е издание. – М.: МЭИ, 2005. – 440 с.
2. Коган Ф.Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 188 с.
3. Тер-Газарян Г.Н. Несимметричные режимы синхронных машин. – М.: Энергия, 1969. – 214 с.
4. Шульженко Н.Г., Пантелят М.Г., Руденко Е.К., Зозулин Ю.В. Добавочные потери в роторе турбогенератора при продолжительной несимметричной нагрузке // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – №1. – С. 54-57. doi: 10.20998/2074-272X.2006.1.11.
5. Зозулін Ю.В., Антонов О.С., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. – Харків: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
6. Bianchi Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements* (Copyrighted Material) // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.
7. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – №2. – С. 40-46. doi: 10.20998/2074-272X.2006.2.09.
8. Милых В.И., Полякова Н.В. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки // *Электротехника і електромеханіка*. – 2013. – №6. – С. 40-45. doi: 10.20998/2074-272X.2013.6.07.
9. Титко О.І., Мельник А.М. Моделювання і розподіл електромагнітних сил, що діють на зубці та стержні обмотки статора турбогенератора // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №3. – С. 40-46.
10. Милых В.И. Организация численно-полевых расчетов электромагнитных процессов в турбогенераторе при его

несимметричной нагрузке // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2016. – №11(1183). – С. 3-10.

11. Милых В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – №1. – С. 36-41. doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.08.

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

13. Милых В. И., Полякова Н. В. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 24-30. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.04.

14. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений в турбогенераторах автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – №1. – С. 26-32. doi: 10.20998/2074-272X.2016.1.05.

#### REFERENCES

1. Izvekoy V.I., Serihin N.A., Abramov A.I. *Proektirovanie turbogeneratorov* [Planning of turbogenerators]. Moscow, MEI Publ., 2005. 440 p. (Rus).
2. Kogan F.L. *Anormal'nye rezhimy moshchnykh turbogeneratorov* [Anormal modes of powerful turbogenerators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 188 p. (Rus).
3. Ter-Gazaryan G.N. *Nesimmetrichnye rezhimy sinkhronnykh mashin* [Asymmetrical modes of synchronous machines]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 214 p. (Rus).
4. Shulzhenko N.G., Pantelyat M.G., Rudenko E.K., Zozulin Yu.V. Additional losses in a turbogenerator rotor under long-time unbalanced load. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.1, pp. 54-57. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2006.1.11.
5. Yu.V. Zozulin, O.Ye. Antonov, V.M. Bychik, A.M. Borychevs'kyi, K.O. Kobzar, O.L. Livshyts', V.H. Rakohon, I.Kh. Rohovyy, L.L. Khaymovych, Cherednyk V.I. *Stvorennja novykh typiv ta modernizacija dijuchykh turbogeneratoriv dlja teplovyh elektrychnykh stancij* [Creation of new types and modernization of the existing turbogenerators for the thermal electric stations]. Kharkiv, PF Kolehium Publ., 2011. 228 p. (Ukr).
6. Bianchi Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. 276 p.
7. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.2, pp. 40-46. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2006.2.09.
8. Milykh V.I., Polyakova N.V. Calculated and harmonic analysis of the magnetic fields in the active zone of the turbogenerator in the load mode. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 40-45. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2013.6.07.
9. Tytko O.I., Melnyk A.M. Modelling and distribution of electromagnetic forces operated on the teeth and the cores of stator winding of the turbogenerator. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2015, no.3, pp. 40-46. (Ukr).
10. Milykh V.I. Organization of the numerical-field calculations of electromagnetic processes in a turbogenerator at its asymmetrical loading. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2016, no.11(1183), pp. 3-10. (Rus).
11. Milykh V.I., Polyakova N.V. Organization of numerical calculation of turbogenerator magnetic field under load with

specified output parameters control. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 36-41. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.08.

12. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable*. Available at: www.femm.info/wiki/OldVersions (accessed 10 March 2014).

13. Milykh V.I., Polyakova N.V. Automated calculations of the dynamics of turbogenerator electromagnetic processes in software environment FEMM. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 24-30. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.04.

14. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.1, pp. 26-32. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.1.05.

Поступила (received) 26.07.2016

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
тел/phone +38 057 7076514, e-mail: mvikemkpi@gmail.com

V.I. Milykh

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

**The numerical-field analysis of the magnetic field and the electrical quantities in the turbogenerator stator under autonomous unbalanced loading.**

**Purpose.** Assessing the impact of load asymmetry of turbogenerator (TG) on the magnetic field distribution, on the electrical and energy processes in it based on the numerical-field analysis within the constraints regulated by the standards. **Methodology.** The calculation model of TG has been constructed on the method of symmetrical components of the three-phase current system. The formed asymmetric system of the currents is used for multi-position numerical calculations of rotating magnetic fields. The temporal functions of the electromagnetic quantities which are subjected to the harmonic analysis are obtained on this basis. **Results.** Test calculations are conducted on a three-phase 35 MW TG during his work under autonomous unbalanced loading. The analysis of the temporal functions of the magnetic induction at different points of the TG stator and also similar functions of the magnetic flux linkage, EMF phase stator windings and other variables have been executed. **Originality.** Problems of exploitation of turbo-generators under unbalanced loading are detected by the consideration of their electromagnetic system on the whole, but not their simplified local parts, as usual. It has been shown that the temporal functions of EMF of the phase stator windings under unbalanced loading significantly differ in shape from sine waves and from each other and contain a number of significant upper harmonics. It has been detected that the phase currents would contain not only the first but also significant upper harmonics under unbalanced loading. **Practical value.** Analysis of the work of TG under unbalanced loading showed the «top» level of problems of electromagnetic character. It has been established that the function of the magnetic induction at the fixed points of the magnetic system on the whole have been changed but not in principle. The temporal functions of EMF, and, hence, the voltage of the stator phase windings significantly differ in shape from sine waves and from each other, there is a considerable imbalance of active powers generated by the individual phase windings of the stator. The information provided will allow the measures to ensure a durable and reliable operation of turbo-generators. References 14, tables 2, figures 9.

**Key words:** turbo-generator, unbalanced loading, magnetic fields, numerical calculations, electromagnetic processes, temporal functions.



М.А. Поляков, Т.Ю. Ларионова

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Розроблено методику оцінки ефективності використання силового напівпровідникового перетворювача постійної напруги в системі електропостачання. Методика включає виявлення множини зовнішніх чинників, що впливають на ефективність використання перетворювача; розробку моделі оцінки ефективності як функції зовнішніх чинників; вибір варіанта використання перетворювача; встановлення коефіцієнтів кореляції між значеннями зовнішніх чинників; визначення значень ККД перетворювача; знаходження розподілу ККД перетворювача. Застосування запропонованої методики проілюстровано на прикладі синхронного проміжного вольтодобавкового перетворювача постійної напруги. Для цієї мети виконано статистичне моделювання перетворювача цього типу при стохастичній зміні вхідної напруги. Бібл. 10, рис. 8.*

*Ключові слова:* напівпровідниковий перетворювач, ефективність використання перетворювача, статистичне моделювання, оцінка ефективності, ККД перетворювача.

*Разработана методика оценки эффективности использования силового полупроводникового преобразователя постоянного напряжения в системе электроснабжения. Методика включает выявление множества внешних факторов, влияющих на эффективность использование преобразователя; разработку модели оценки эффективности как функции внешних факторов; выбор варианта использования преобразователя; установление коэффициентов корреляции между значениями внешних факторов; определение значений КПД преобразователя; нахождение распределения КПД преобразователя. Применение предложенной методики проиллюстрировано на примере синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения. Для этой цели выполнено статистическое моделирование преобразователя этого типа при стохастическом изменении входного напряжения. Библ. 10, рис. 8.*

*Ключевые слова:* полупроводниковый преобразователь, эффективность использования преобразователя, статистическое моделирование, оценка эффективности, КПД преобразователя.

**Введение.** Для удовлетворения потребностей в электроэнергии разных видов и параметров, а также для эффективного управления ее распределением необходимы различные преобразовательные устройства. Важным требованием, которое предъявляется к преобразователям, является обеспечение высокой эффективности.

Силовые полупроводниковые преобразователи имеют высокую эффективность, поэтому широко применяются в промышленном оборудовании и электротранспорте [1].

Для количественной оценки эффективности используется коэффициент полезного действия (КПД), равный отношению выходной мощности (или энергии) к мощности, потребляемой преобразователем от сети, при определенном входном напряжении и нагрузке, чаще всего номинальных. Для преобразователей величина КПД приводится в документации и является одним из важных показателей. Снижение КПД в преобразователях обусловлено потерями в электро-радиоэлементах преобразователя – силовых полупроводниковых приборах (СПП), трансформаторах, индуктивностях, емкостях. Основные виды потерь в преобразователях – это коммутационные потери, возникающие при коммутации силовых ключей, и потери на проводимость [2]. Известные исследования [3-5] направлены на нахождение максимальной эффективности преобразователя, которая достигается выбором топологии, оптимизацией параметров пассивных компонентов, применением СПП с низким значением сопротивления в проводящем состоянии и потерь при

переключении, выбором алгоритма коммутации и частоты переключения СПП. Величина КПД также зависит от внешних факторов, таких как входное напряжение, сопротивление нагрузки и др. Существует ряд областей применения полупроводниковых преобразователей, для которых характерно изменение в широких пределах входного напряжения и тока нагрузки. Это преобразователи для ветроэнергетики, источников питания от аккумуляторных батарей, электротранспорта и другие. Исследователи [6] выявили зависимости  $E = f(V_{in}, I_o)$ , которые имеют экстремум в области средних значений диапазонов изменения  $V_{in}$  и  $I_o$ . Например, входное напряжение преобразователя системы питания собственных нужд (СПСН) электроподвижного состава (ЭПС) меняется в широких пределах (на токоприемнике электроподвижного состава с номинальным напряжением 3000 В – от 2200 до 3850 В [7]). В этом случае преобразователь СПСН большую часть времени работает в неоптимальных условиях, эффективность его применения снижается. [8].

**Постановка задачи.** Само по себе значение КПД не дает полной информации о величине потерь энергии в преобразователе в конкретном его применении в системе электроснабжения, так как режим использования преобразователя может отличаться от того, в котором производилось измерение КПД. В реальных условиях преобразователь работает в некотором диапазоне КПД. Следовательно, для усредненной оценки эффективности использования преобразователя

в системе электроснабжения требуется учитывать характер изменения во времени входного напряжения и нагрузки. В зависимости от области применения преобразователя эти изменения могут носить как детерминированный, так и стохастический характер.

**Цель работы** – оценка эффективности использования силового полупроводникового преобразователя постоянного напряжения в системе электроснабжения при стохастическом изменении его входного напряжения.

Для оценки распределения КПД и определения соответствующей интегральной функции распределения в работе применен метод статистического моделирования Монте-Карло.

### Результаты исследований.

Предложенная методика включает следующие этапы:

1. Выявление множества внешних факторов  $A_{ext}$ , от которых зависит КПД преобразователя. Как правило, это напряжение  $V_{in}$  и ток  $I_o$ .

2. Разработка модели оценки КПД преобразователя как функции внешних факторов  $\eta = f(A_{ext})$ . Как известно, КПД преобразователя определяется потерями в элементах его схемы. Эти потери зависят от номиналов и качества элементов схемы, топологии и алгоритмов коммутации ключей преобразователя. На этапе разработки модели оценки КПД выявляются зависимости составляющих потерь от значений внешних факторов.

3. Выбор варианта использования преобразователя, который описывается некоторым временным интервалом  $[t_1, t_2]$ , длительностью  $\Delta t$ , характеристиками изменения во времени значений внешних факторов  $A_{ext} = f(t)$ ,  $t \in [t_1, t_2]$ , включая диапазон возможных значений  $[A_{ext\_min}, A_{ext\_max}]$  и продолжительность воздействия на преобразователь внешнего фактора со значением  $A_{ext}$ . При стохастическом характере изменений во времени значений внешних факторов  $A_{ext(i)}$  определить функцию плотности распределения значения  $A_{ext(i)}$  на входе модели преобразователя.

4. Определение коэффициентов корреляции между значениями внешних факторов на входах модели преобразователя. Эти коэффициенты учитываются при задании значений зависимых друг от друга внешних факторов. Например, интеллектуальная система управления электроснабжением может ограничить нагрузку при снижении напряжения  $V_{in}$  до критического значения.

5. Расчет КПД преобразователя путем моделирования его работы с заданными значениями внешних факторов для каждого подынтервала  $\Delta t_i$  принадлежащего интервалу  $\Delta t$ . Для стохастически изменяющихся внешних факторов провести серию экспериментов с моделью преобразователя и значениями входных факторов, которые выбираются случайным образом с учетом вероятности появления данного значения.

6. Разбиение полученных в результате моделирования значений КПД на диапазоны и определение относительной частоты появления значений КПД, принад-

лежащих каждому интервалу. Определение на основании полученных частот плотности распределения и интегральной функции распределения КПД преобразователя для выбранного варианта его использования.

Проиллюстрируем предложенную методику на примере оценки эффективности использования синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения при случайном изменении входного напряжения. Функциональная схема рассматриваемого преобразователя приведена на рис. 1 [9].

Для оценки эффективности преобразователя выполняем действия согласно предложенной методике.

1. В качестве входного фактора выбрано  $V_{in}$ , которое, как было отмечено выше, существенно влияет на КПД преобразователя.

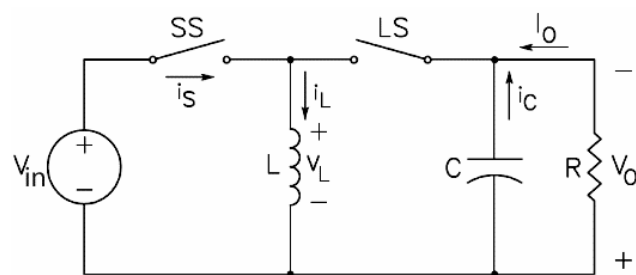


Рис. 1. Функциональная схема синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения

2. Для получения зависимости эффективности преобразователя от напряжения, меняющегося случайным образом, выполнено моделирование синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения с подсистемой, выполняющей расчет выходной мощности, мощности потерь и КПД преобразователя [9].

На рис. 2 представлена модель синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения, а на рис. 3 – подсистемы, выполняющей расчет выходной мощности, мощности потерь и КПД преобразователя. В модели учтены основные факторы, влияющие на эффективность преобразователя: сопротивление ключа в открытом состоянии; прямое напряжение сток-исток; коэффициент заполнения; рабочая частота; время спада и нарастания фронтов при коммутации ключа; статические и динамические потери в индукторе и на эквивалентном последовательном сопротивлении конденсатора.

Приведенная на рис. 3 модель для расчета КПД (efficiency) определяет мощность потерь в преобразователе как сумму мощностей потерь на переключении в ключах (SS Switch Loss и LS Switch Loss), мощностей потерь в ключах в проводящем состоянии (SS Conduction Loss и LS Conduction Loss), потери во «внутреннем» диоде ключа (LS Body Diode Loss), потери за счет «мертвого времени» (Dead-Time Loss).

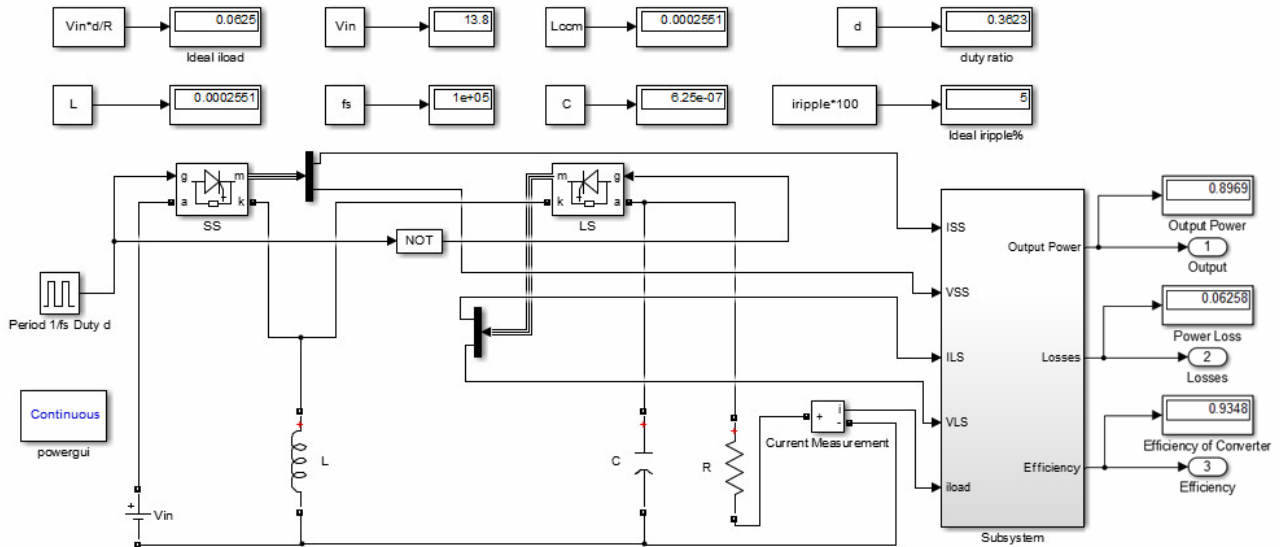


Рис. 2. Модель синхронного промежуточного вольтодобавочного преобразователя постоянного напряжения

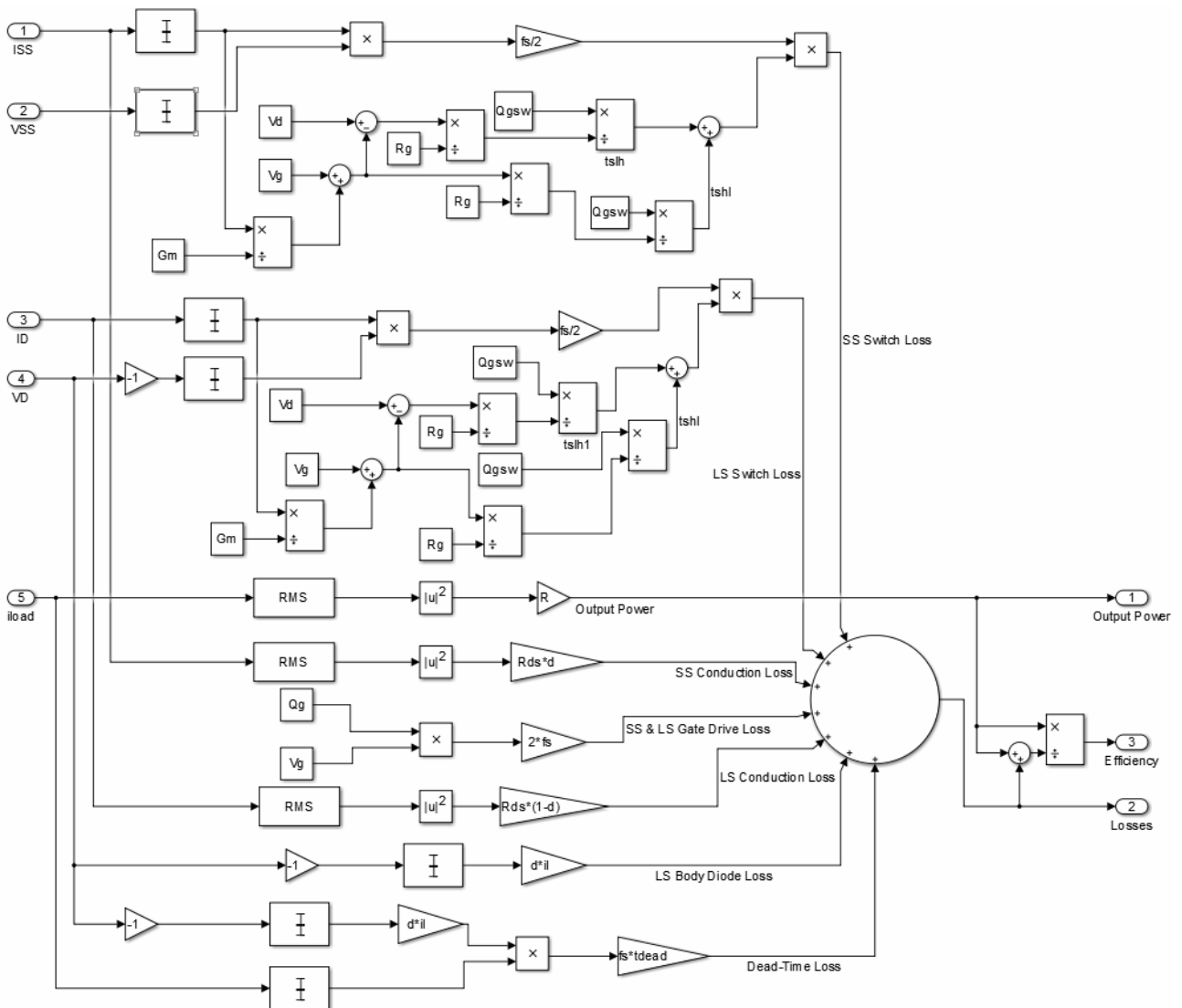


Рис. 3. Модель подсистемы, выполняющей расчет выходной мощности, мощности потерь, эффективности

Не указанные в работе [9] значения параметров элементов модели преобразователя приведены в листинге *m*-файла (рис. 4).

```

%Параметры преобразователя
Vin=13.8; %номинальное входное напряжение, В
Vout=5; %требуемое выходное напряжение, В
fs=100e3; %частота переключения, 1/с
vripple=0.05; %максимально допустимая
%пульсирующая компонента напряжения
iripple=0.05; %максимально допустимая
%пульсирующая компонента постоянного тока
R=80; %нагрузка, Ом (чистая резистивная нагрузка)
P=1/fs; %период регулирования, с
d=Vout/Vin; %коэффициент заполнения

Lscm=((Vin-Vout)*R)/(2*fs*Vin); %минимальное значение
%индуктивности, Гн
Lambda=(2/iripple)*(Vout/R); %коэффициент масштабирования
%катушки индуктивности
L=Lscm; %индуктивность при минимальном значении для
%режима непрерывного тока, Гн
C=(1-(Vout/Vin))/(8*L*vripple*fs^2); %емкость конденсатора, Ф
Qgsw=20e-9; %заряд затвора MOSFET в точке переключения, Кл
Qg=175e-9; %полный заряд затвора MOSFET в точке переключения, Кл
il=0.15; %ток включения, А
tdead=60e-9; %потери на время задержки, с
Rds=0.5; %PMOS прямое сопротивление во включенном состоянии, Ом
Gm=0.32e-3; %MOSFET активная межэлектродная проводимость, См
Vg=3; %MOSFET напряжение переключения, В
Rg=50; %MOSFET сопротивление затвора, Ом
Vd=0.8; %напряжение на диоде, В

```

Рис. 4. Листинг *m*-файла задающего параметры элементов схемы преобразователя

3. Моделируем условия характерные для работы преобразователя СПСН ЭПС. Напряжение на его входе такого преобразователя ( $V_{in}$ ) зависит от напряжения тяговой подстанции, местоположения ЭПС относительно точек подвода этого напряжения к контактному проводу, наличия других нагрузок на участке данной подстанции, метеоусловиями и другими факторами, носящими случайный характер. Согласно положения центральной предельной теоремы А.М. Ляпунова, если случайная величина  $x$  представляет собой сумму очень большого числа взаимно независимых случайных величин, влияние каждой из которых на всю сумму ничтожно мало, то  $x$  распределена по закону, близкому к нормальному [10]. Поэтому полагаем, что входное напряжение преобразователя  $V_{in}$  имеет нормальное распределение.

Плотность случайной величины  $V_{in}$  имеет вид [7]:

$$f(V_{in}; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V_{in}-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – среднее значение (номинальное входное напряжение преобразователя);  $\sigma$  – стандартное отклонение.

Для преобразователя постоянного напряжения СПСН ЭПС [7, 10]  $\mu = 3000$  В и  $\sigma = 2,1$ . При моделировании схемы (рис. 2) принято  $\mu = 13,8$  В и  $\sigma = 2,1$ .

Случайные значения  $\mu$  сгенерированы с помощью функций НОРМ.ОБР и СЛЧИС программы Microsoft Excel пакета Microsoft Office 2010.

График плотности вероятности распределения входного напряжения приведен на рис. 5. Сгенерированная выборка состоит из 100 значений. При таком числе значений максимальное относительное отклонение сгенерированной плотности распределения от плотности распределения, определенной по формуле (1),

не превышает 12 % (рис. 6), что является допустимым в инженерных расчетах.

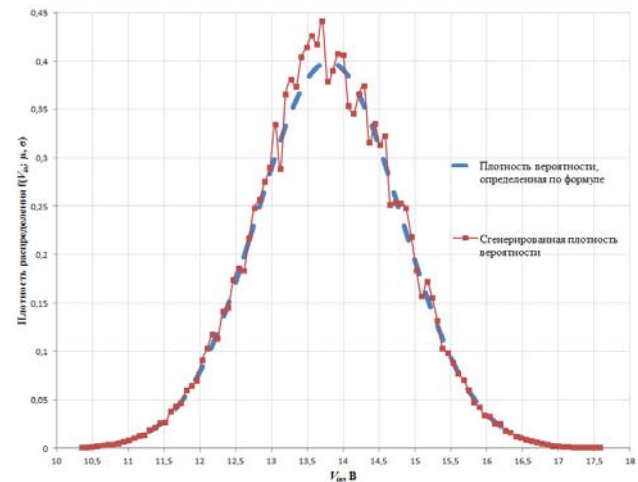


Рис. 5. График плотности вероятности сгенерированной и определенной по формуле (1) плотности распределения величины входного напряжения  $V_{in}$

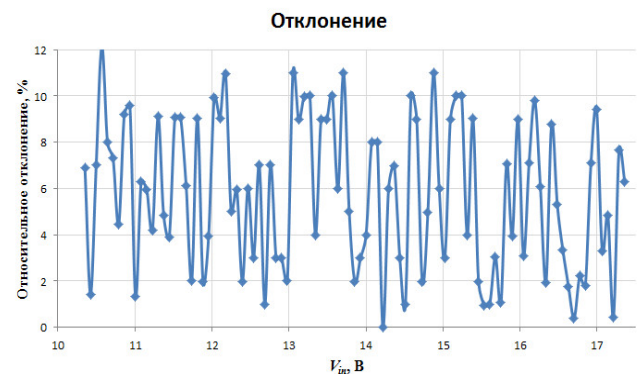


Рис. 6. Относительное отклонение сгенерированной плотности распределения

4. Так как в примере рассматривается влияние только одной величины (входного напряжения) на эффективность преобразователя, то корреляции между значениями влияющих факторов отсутствуют.

5. Для сгенерированных случайных значений  $V_{in}$  выполнено моделирование токов в ветвях и напряжений в узлах схемы, а также моделирование выходной мощности, потерь и КПД преобразователя. Результаты моделирования при сопоставимых входных данных совпадают с точностью до 1 % с данными, полученными в работе [10].

6. В результате выполнения серии экспериментов получено 100 значений эффективности преобразователя, которые находятся в диапазоне от 0,9187 до 0,9584. Далее этот диапазон разбит на интервалы (в примере – 0,005) и определены относительная и абсолютная частота встречаемости значения эффективности в пределах каждого интервала. На основании этих данных построен график плотности распределения КПД преобразователя (рис. 7) и интегральная функция распределения КПД преобразователя (рис. 8).

Графику рис.6 соответствует распределение:

$$f(E; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $E$  – КПД преобразователя;  $\mu$  – среднее значение;  $\sigma$  – стандартное отклонение.

В соответствии с графиком, представленном на рис. 7,  $\mu = 0,935$ , а  $\sigma = 0,016$ .

В соответствии с графиком (рис. 8), вероятность того, что КПД преобразователя в данных условиях применения будет равна не менее 0,935, составит 0,65. Таким образом, учет рисков снижения КПД на основе предложенной интегральной оценки позволяет уточнить оценку эффективности использования преобразователя в конкретном применении.

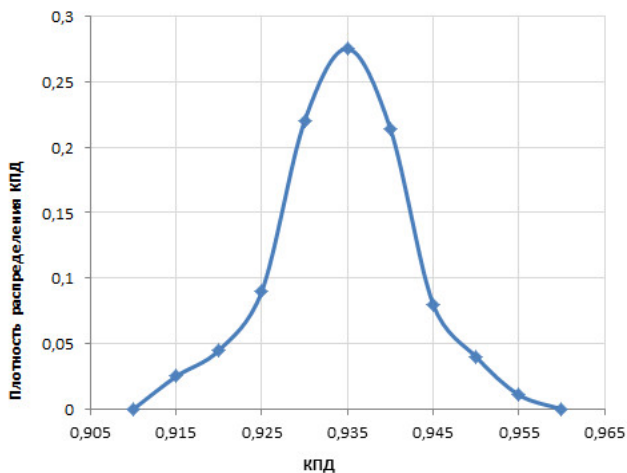


Рис. 7. График плотности распределения КПД преобразователя, построенный по результатам статистического моделирования

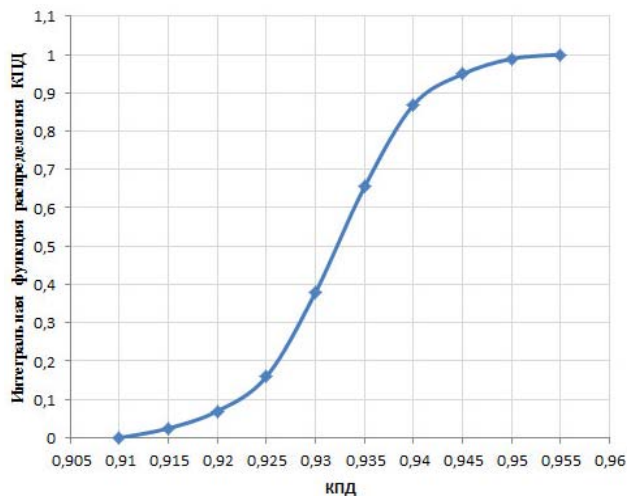


Рис. 8. Интегральная функция распределения КПД преобразователя

#### Выводы.

1. КПД преобразователя напряжения, рассчитанное при фиксированных внешних факторах, не является показателем эффективности использования преобразователя в условиях изменяющихся внешних факторов, особенно когда их изменение носит стохастически характер

2. Эффективность использования преобразователя в системе электроснабжения может быть оценена путем статистического компьютерного моделирования, в ходе которого определяются зависимости токов и напряжений в преобразователе от времени, а также рассчитываются потери в преобразователе, его выходная мощность и КПД.

3. При оценке эффективности использования преобразователя в системе электроснабжения при стохастическом изменении внешних факторов необходимо учитывать не только ожидаемое среднее значение, но и риски снижения КПД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковая схемотехника: [справ. руководство]: пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 144 с.
3. Gildersleeve M., Forghani-zadeh H.P., Rincon-Mora G.A. A Comprehensive Power Analysis and a Highly Efficient, Mode-Hopping DC-DC Converter // Proceedings. IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC. – September 2002. – pp. 153-156. doi: 10.1109/apasic.2002.1031555.
4. Arvind Raj. Application Report. Calculating Efficiency. PMP-DCDC Controllers [Электронный ресурс]: SLVA390 – February 2010. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/slva390/slva390.pdf>.
5. Chen M., Afridi K.K., Chakraborty S., Perreault D.J. A high-power-density wide-input-voltage-range isolated dc-dc converter having a MultiTrack architecture // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 2015. doi: 10.1109/ecce.2015.7309945.
6. Nowakowski R., Tang Ning. Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converters // Texas Instruments Analog Applications Journal. –2009. – no.4Q. – pp. 15-18.
7. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 8 с.
8. Ларионова Т.Ю. Сравнение систем питания собственных нужд электроподвижного состава постоянного тока напряжением 3000 В по энергоэффективности // Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського. – 2015. – №3(92). – С. 34-39.
9. Katsikis V. MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Volume 1. – InTech Publisher, 2012. – 534 p. doi: 10.5772/2557.
10. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. Изд. 2-е, стереотип. – К.: «Техніка», 1977. – 768 с.

#### REFERENCES

1. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaja shemotehnika* [Semiconductor engineering]. Moscow, Mir Publ., 1983. 512 p. (Rus).
2. Lukutin B.V., Obuhov S.G. *Silovye preobrazovateli v elektrosnabzhenii* [Power converters in electricity supply]. Tomsk, TPU Publ., 2007. 144 p. (Rus).
3. Gildersleeve M., Forghani-zadeh H.P., Rincon-Mora G.A. A Comprehensive Power Analysis and a Highly Efficient, Mode-Hopping DC-DC Converter. *Proceedings. IEEE Asia-Pacific Conference on ASIC*, September 2002, pp. 153-156. doi: 10.1109/apasic.2002.1031555.
4. Arvind Raj. *Application Report. Calculating Efficiency. PMP-DCDC Controllers: SLVA390* – February 2010. – Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slva390/slva390.pdf> (accessed September 28, 2015).
5. Chen M., Afridi K.K., Chakraborty S., Perreault D.J. A high-power-density wide-input-voltage-range isolated dc-dc converter having a MultiTrack architecture. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2015. doi: 10.1109/ecce.2015.7309945.

6. Nowakowski R., Tang Ning. Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converters. *Texas Instruments Analog Applications Journal*, 2009, no.4Q, pp. 15-18.
7. GOST 6962-75. *Transport elektrifitsirovannyj s pitaniem ot kontaktnoj seti. Rjad naprjazhenij* [State Standart 6962-75. Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1975. 8 p. (Rus).
8. Larionova T.Y. Comparison of the auxiliary power supply systems of the electric railway rolling stock DC 3000 V according to the energy efficiency *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2015, no.3(92), pp. 34-39. (Rus).
9. Katsikis V. *MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Volume 1*. InTech Publisher, 2012. 534 p. doi: 10.5772/2557.
10. Sigorskij V.P. *Matematicheskij apparat inzhenera. Izd. 2-e. stereotip*. [Engineer's mathematical apparatus. 2nd ed. stereotype]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1977. 786 p. (Rus).

*Поступила (received) 20.04.2016*

Поляков Михаил Алексеевич<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
 Ларионова Татьяна Юрьевна<sup>1</sup>, аспирант,  
<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет,  
 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,  
 тел/phone +380 61 7698395,  
 e-mail: polyakov@zntu.edu.ua, electro-eng@yandex.ru

*M.A. Polyakov<sup>1</sup>, T.Y. Larionova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Zaporozhye National Technical University,  
 64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

**Efficiency evaluation technique of the semiconductor DC-DC converter application in the power-supply system.**

**Purpose.** To specify efficiency evaluation of the DC-DC power semiconductor converter application in the power-supply system.

**Methodology.** We have chosen application version of converter and then used the statistical modeling of DC-DC converter for its efficiency evaluation at varied input voltage according to proposed technique. We have compared the simulated result with the data presented in reference literature. **Results.** We have proposed the efficiency evaluation technique of converter application. Proposed technique includes detection of external factors influenced on the converter efficiency; development of efficiency evaluation models; selecting application version of converter; determination of the correlation coefficients between the values of external factors; definition of the converter efficiency; obtaining of the converter efficiency distribution. **Originality.** For the first time, we have developed the evaluation technique of converter efficiency corrected for application version of converter. **Practical value.** Presented in the study results could be useful for specialists in semiconductor equipment, electrical facilities and systems. References 10, figures 8.

**Key words:** semiconductor converter, efficiency of converter application, statistical modeling, evaluation of the effectiveness, converter efficiency.



М.И. Баранов, С.В. Рудаков

## УСРЕДНЕННЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАКЕТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ С ИМПУЛЬСНЫМ АКСИАЛЬНЫМ ТОКОМ БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

*Приведені результати наближеного вибору усередненого значення  $\bar{n}$  цілого квантового числа  $n$  для мод квантованих хвильових пси-функцій  $n$ -го порядку і квантовомеханічного розрахунку на основі знайденого квантового числа  $\bar{n}$  усереднених геометричних характеристик квантованих періодичних подовжніх і радіальних хвильових електронних пакетів (ХЕП) в круглих суцільних металевих провідниках з великим імпульсним аксіальним струмом. Дані характеристики включають усереднені ширини «гарячих» і «холодних» подовжніх і радіальних ділянок вказаних провідників, що формується відповідними ХЕП, і усереднені кроки періодизації у вказаних структурах ХЕП. Виконані експерименти на потужному генераторі тривалої аперіодичної С-компоненти імпульсного струму штучної блискавки з амплітудою його щільності до  $0,37 \text{ кА/мм}^2$  в оцинкованому сталевому дроті радіусом  $0,8 \text{ мм}$  і заводовжки  $320 \text{ мм}$  підтвердили результати вибору для нього квантового числа  $\bar{n}$  і розрахунку усередненої ширини «гарячих» і «холодних» ділянок подовжніх ХЕП, які візуально спостережуються вздовж досліджуваного дроту, що інтенсивно нагрівається цим струмом, за рахунок слабого розсіяння електронних півхвиль де Бройля на атомах кристалічної решітки його металу. Бібл. 14, рис. 2.*

*Ключові слова:* металевий провідник, імпульсний струм великої щільності, хвильовий електронний пакет провідника, «гарячі» і «холодні» подовжні і радіальні ділянки провідника, квантування і усереднювання геометричних характеристик хвильових електронних пакетів провідника.

*Приведены результаты приближенного выбора усредненного значения  $\bar{n}$  целого квантового числа  $n$  для мод квантованных волновых пси-функций  $n$ -го порядка и квантовомеханического расчета на основе найденного квантового числа  $\bar{n}$  усредненных геометрических характеристик квантованных периодических продольных и радиальных волновых электронных пакетов (ВЭП) в круглых сплошных металлических проводниках с большим импульсным аксиальным током. Данные характеристики включают усредненные ширины «горячих» и «холодных» продольных и радиальных участков указанных проводников, формируемых соответствующими ВЭП, и усредненные шаги периодизации в указанных структурах ВЭП. Выполненные эксперименты на мощном генераторе длительной аперіодической С-компоненты импульсного тока искусственной молнии с амплитудой его плотности до  $0,37 \text{ кА/мм}^2$  в оцинкованном стальном проводе радиусом  $0,8 \text{ мм}$  и длиной  $320 \text{ мм}$  подтвердили результаты выбора для него квантового числа  $\bar{n}$  и расчета усредненных ширин «горячих» и «холодных» участков продольных ВЭП, визуально наблюдаемых вдоль интенсивно нагреваемого этим током исследуемого провода за счет слабого рассеяния электронных полуволи де Бройля на атомах кристаллической решетки его металла. Библ. 14, рис. 2.*

*Ключевые слова:* металлический проводник, импульсный ток большой плотности, волновой электронный пакет проводника, «горячие» и «холодные» продольные и радиальные участки проводника, квантование и усреднение геометрических характеристик волновых электронных пакетов проводника.

**Введение.** В [1, 2] были приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований волнового продольного и радиального распределений свободных электронов в круглом сплошном металлическом проводнике с импульсным аксиальным током большой плотности. Полученные результаты указывают на стохастический характер возникновения в проводящей структуре такого проводника радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0 \gg r_0$ , содержащей квантовое число  $n$  электронных полуволи де Бройля, периодических квантованных волновых электронных пакетов (ВЭП) [3]. Отличительной особенностью проявления данных макроскопических ВЭП является то, что они образуют относительно «горячие» и «холодные» продольные и радиальные участки проводника, геометрические размеры которых определяются установленными в [1, 2] закономерностями в волновых распределениях дрейфующих электронов и квантованными значениями продольного  $k_{nz} = \pi n / l_0$  и радиального  $k_{nr} = \pi n / r_0$  волновых чисел ( $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$  – целое квантовое число;  $n_m$  – максимальное значение квантового числа  $n$ , определяемое главным квантовым числом  $n_k$  для атомов металла проводника [3]). Причем, шаг периодической структуры ВЭП проводника оказывается равным сумме ширин его соседних «горячих» продольных

$\Delta z_{nh}$  (радиальных  $\Delta r_{nh}$ ) и «холодных» продольных  $\Delta z_{nc}$  (радиальных  $\Delta r_{nc}$ ) участков. При этом согласно [2, 4] уровни температур джоулева нагрева «горячих» и «холодных» продольных и радиальных участков ВЭП проводника могут отличаться в 3,5 раза. Данные из [2] свидетельствуют о том, что квантовое число  $n_m = 2n_k^2$  для медных, цинковых и стальных проводников ( $n_k = 4$  [3]) составляет 32, что указывает на возможность наличия в их внутренней электропроводящей структуре до 32 мод собственных продольных  $\Psi_{nz}(z, t)$  и радиальных  $\Psi_{nr}(r, t)$  волновых функций. Именно суперпозиция (взаимное наложение) этих квантованных волновых пси-функций  $n$ -го порядка и формирует в проводнике его макроскопические квантованные продольные и радиальные ВЭП. Каждому квантовому числу  $n$  будут соответствовать свои ВЭП, размещенные вдоль длины  $l_0$  или радиуса  $r_0$  проводника. Показатель моды (число  $n$ ) для указанных квантованных волновых пси-функций определяется энергетическим состоянием свободных электронов проводника в момент приложения к нему электрического напряжения и начала протекания по нему тока проводимости [5]. Вероятностный характер возникновения в металлических проводниках с электрическим током явления

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

квантованной периодической макролокализации свободных электронов при их дрейфе [5] и соответственно появления в указанных проводниковых материалах квантованных продольных и радиальных ВЭП с  $n \leq 32$  в значительной мере затрудняет прогнозирование возникающей картины периодического распределения в нем указанных ВЭП. Определенному решению этого электрофизического вопроса, имеющего квантово-волновую природу и важное электротехнологическое значение при расчетной (опытной) оценке результатов локального действия больших разрядных импульсных токов на токонесущие части проводов (кабелей) силовых электрических цепей мощных испытательных высоковольтных электроустановок [6], а также ударных импульсных токов короткого замыкания [4, 7] и линейной молнии [8] на токонесущие части силовых цепей электроэнергетических объектов, будет способствовать знание усредненных значений квантового числа  $n$  (величины  $\bar{n}$ ) и соответственно усредненных геометрических характеристик квантованных периодических продольных и радиальных ВЭП в круглых металлических проводниках с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  большой плотности.

**Целью статьи** является расчетное и экспериментальное определение усредненных геометрических характеристик распределения макроскопических ВЭП в круглых цилиндрических металлических проводниках с импульсным аксиальным током большой плотности.

**1. Постановка задачи о распределении ВЭП в металлическом проводнике с импульсным током.** Рассмотрим в цилиндрической системе координат неподвижно размещенный в воздушной среде прямой цилиндрической сплошной немагнитный металлический проводник радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0 \gg r_0$  (рис. 1). Пусть параметры воздушной среды соответствуют нормальным атмосферным условиям (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура  $T_0$  равна  $0^\circ \text{C}$  [3]). Считаем, что к противоположным концам рассматриваемого проводника с удельной электропроводностью  $\gamma_0$  его материала приложена разность электрических потенциалов, униполярно изменяющаяся во времени  $t$  по произвольному закону. Примем, что по исследуемому проводнику поперечным сечением  $S_0 = \pi r_0^2$  вдоль его продольной оси  $OZ$  протекает импульсный однополярный ток проводимости  $i_0(t)$ , характеризующийся усредненной плотностью  $\delta_0(t)$ . Ограничимся рассмотрением случая, когда толщина токового скин-слоя  $\Delta$ , в материале проводника существенно больше его радиуса  $r_0$ . Для приближенного описания поведения дрейфующих свободных электронов проводника воспользуемся известным одноэлектронным приближением Хартри – Фока, пренебрегая их взаимным влиянием друг на друга, а также влиянием ионов (узлов) кристаллической решетки материала проводника на его коллективизированные электроны [2, 3]. Пусть продольные и радиальные распределения свободных электронов проводника будут определяться в предположении того, что их пространственное движение и соответственно распределения по координатам  $z$  и  $r$  в первом приближении подчиняются одномерным временным волновым уравнениям Шрёдингера [3]. Требуется на ос-

нове квантомеханического подхода в приближенном виде с учетом полученных в [1, 2, 5] данных о продольных и радиальных волновых распределениях дрейфующих свободных электронов в рассматриваемом проводнике определить усредненные характеристики пространственного распределения в его однородном электропроводящем материале периодических квантованных продольных и радиальных ВЭП.

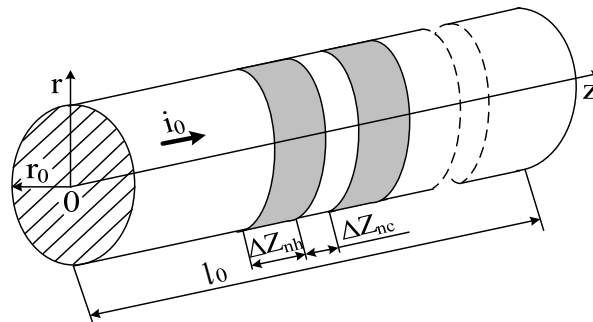


Рис. 1. Сплошной металлический проводник радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0$  с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  большой плотности, содержащий квантованные «горячие» шириной  $\Delta z_{nh}$  и «холодные» шириной  $\Delta z_{nc}$  продольные участки [2]

**2. Выбор усредненного значения квантового числа для волновых пси-функций дрейфующих электронов металлического проводника с импульсным током.** Для квантованных дебройлевских электронных полувольт, распространяющихся по длине  $l_0$  и радиусу  $r_0$  исследуемого проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , выполняются следующие известные аналитические соотношения [2]:

$$\lambda_{enz}/2 = l_0/n; \quad (1)$$

$$\lambda_{enr}/2 = r_0/n, \quad (2)$$

где  $\lambda_{enz} = h/(m_e v_{enz})$  – квантованная длина продольной волны дрейфующего свободного электрона с массой покоя  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг [3];  $v_{enz} = nh/(2m_e l_0)$  – квантованная продольная скорость дрейфующего свободного электрона;  $\lambda_{enr} = h/(m_e v_{enr})$  – квантованная длина радиальной волны дрейфующего свободного электрона;  $v_{enr} = nh/(2m_e r_0)$  – квантованная радиальная скорость дрейфующего свободного электрона в материале проводника;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [3].

Используя (1) и зная пределы изменения квантового числа  $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$ , определим вначале для исследуемого провода усредненную длину продольной электронной полуволны  $\lambda_{enz}^*/2$  в следующем виде [9]:

$$\lambda_{enz}^*/2 = l_0 (n_m - 1)^{-1} \int_1^{n_m} n^{-1} dn = l_0 (n_m - 1)^{-1} \ln n_m. \quad (3)$$

Исходя из (2), аналогично (3) для усредненной длины радиальной дебройлевской электронной полуволны  $\lambda_{enr}^*/2$  или шага макроскопической структуры радиального ВЭП в электропроводящем материале рассматриваемого круглого проводника находим:

$$\lambda_{enr}^*/2 = r_0 (n_m - 1)^{-1} \ln n_m. \quad (4)$$

Из (1)-(4) видно, что для целого квантового числа  $n$  его усредненное значение  $\bar{n}$ , удовлетворяющее соотношениям  $\lambda_{enz}^*/2 = l_0/\bar{n}$  и  $\lambda_{enr}^*/2 = r_0/\bar{n}$ , можно записать в следующем аналитическом виде [10]:

$$\bar{n} = (n_m - 1) / (\ln n_m). \quad (5)$$

Из (5) для медного, цинкового и стального проводников ( $n_k=4$  [3];  $n_m=2n_k^2=32$  [2]) с импульсным током  $i_0(t)$  следует, что усредненное значение для квантового числа  $n$ , определяющее усредненную моду волновой пси-функции в каждом периодическом квантованном продольном и радиальном ВЭП для таких проводниковых материалов, окажется примерно равным  $\bar{n}=9$ . Данному числу  $\bar{n}$  будет соответствовать такое же усредненное число «горячих» и «холодных» продольных и радиальных участков, суммы усредненных ширин которых  $(\Delta z_{nh}^* + \Delta z_{nc}^*)$  и  $(\Delta r_{nh}^* + \Delta r_{nc}^*)$  образуют в материале проводника усредненные шаги периодических структур продольных и радиальных ВЭП. Ниже в разделе 5 будет приведено экспериментальное обоснование предлагаемому расчетному выбору по (5) такого численного значения для числа  $\bar{n}$  применительно к указанным выше электропроводящим материалам исследуемых проводников с током.

**3. Усредненные геометрические характеристики для периодических квантованных продольных ВЭП в металлическом проводнике с импульсным током.** Для краевых зон исследуемого металлического проводника, прилегающих к местам его закрепления в сильноточной цепи с импульсным током  $i_0(t)$  и содержащих продольные ВЭП, с учетом (1) будет выполняться следующее соотношение [5]:

$$\lambda_{enz}^* / 2 = \Delta z_{nh}^* + 2 \Delta z_{nce}^* = l_0 / \bar{n}, \quad (6)$$

где  $\Delta z_{nh}^*$ ,  $\Delta z_{nce}^*$  – соответственно усредненные значения квантованных ширин «горячих» и крайних «холодных» продольных участков ВЭП проводника.

Для внутренних зон проводника, соседствующих с указанными выше его краевыми зонами или удаленных от них, усредненные геометрические характеристики квантованного продольного ВЭП будут описываться следующим аналитическим соотношением [5]:

$$\lambda_{enz}^* / 2 = \Delta z_{nh}^* + \Delta z_{nci}^* = l_0 / \bar{n}, \quad (7)$$

где  $\Delta z_{nci}^*$  – усредненное значение квантованной ширины внутренних «холодных» продольных участков ВЭП проводника.

Из (6) и (7) видно, что усредненные квантованные ширины  $\Delta z_{nci}^* = \Delta z_{nc}^*$  внутренних «холодных» продольных участков ВЭП вдвое превышают усредненные квантованные ширины  $\Delta z_{nce}^*$  соответствующих крайних «холодных» продольных участков проводника. Для расчетного определения с учетом (6) и (7) усредненных квантованных величин  $\Delta z_{nce}^*$  и  $\Delta z_{nci}^*$  необходимо предварительно найти усредненное значение квантованной величины  $\Delta z_{nh}^*$ . Для этого применительно к «горячему» продольному участку ВЭП воспользуемся фундаментальным принципом квантовой электродинамики (механики) – соотношением неопределенности Гейзенберга в следующем виде [3]:

$$\Delta z_{nh}^* \cdot \Delta p_{nz}^* \geq h / (4\pi), \quad (8)$$

где  $\Delta p_{nz}^* = m_e v_{enz}^* = \bar{n} h / (2l_0)$  – усредненная квантованная продольная проекция импульса дрейфующих в микроструктуре проводника свободных электронов;  $v_{enz}^* = \bar{n} h / (2m_e l_0)$  – усредненная квантованная продольная скорость дрейфующих свободных электронов проводника.

Тогда из (8) для наименьшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta z_{nh}^*$  «горячего» продольного участка ВЭП проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  большой плотности имеем:

$$\Delta z_{nh}^* = l_0 / (2\pi \bar{n}) = l_0 \ln n_m / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (9)$$

Из (6) с учетом (9) для усредненных квантованных ширин  $\Delta z_{nce}^*$  крайних «холодных» продольных участков ВЭП исследуемого проводника в приближенном виде получаем расчетное соотношение вида:

$$\Delta z_{nce}^* = l_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [4\pi(n_m - 1)]. \quad (10)$$

Из (7) и (9) для усредненных квантованных ширин  $\Delta z_{nci}^*$  внутренних «холодных» продольных участков ВЭП рассматриваемого проводника получаем следующее приближенное расчетное соотношение:

$$\Delta z_{nci}^* = l_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (11)$$

В результате усредненный шаг периодической структуры продольного ВЭП для исследуемого проводника с учетом (9)-(11) может быть определен из следующего расчетного выражения:

$$\Delta z_{nh}^* + 2 \Delta z_{nce}^* = \Delta z_{nh}^* + \Delta z_{nci}^* = l_0 \ln n_m / [(n_m - 1)]. \quad (12)$$

**4. Усредненные геометрические характеристики для периодических квантованных радиальных ВЭП в металлическом проводнике с импульсным током.** Для центральных и наружных зон цилиндрического проводника радиусом  $r_0$  с током  $i_0(t)$ , содержащих радиальные ВЭП, с учетом (2) имеем:

$$\lambda_{enr}^* / 2 = \Delta r_{nh}^* + 2 \Delta r_{nce}^* = r_0 / \bar{n}, \quad (13)$$

где  $\Delta r_{nh}^*$ ,  $\Delta r_{nce}^*$  – соответственно усредненные значения квантованных ширин «горячих» и крайних «холодных» радиальных участков ВЭП проводника.

Для внутренних круговых зон рассматриваемого проводника усредненные геометрические характеристики радиальных ВЭП будут удовлетворять следующему приближенному расчетному соотношению [5]:

$$\lambda_{enr}^* / 2 = \Delta r_{nh}^* + \Delta r_{nci}^* = r_0 / \bar{n}, \quad (14)$$

где  $\Delta r_{nci}^*$  – усредненное значение квантованной ширины внутренних «холодных» радиальных участков ВЭП проводника.

Запишем далее фундаментальное соотношение неопределенности Гейзенберга для локализующихся на «горячих» радиальных участках ВЭП дрейфующих свободных электронов в следующем виде [3]:

$$\Delta r_{nh}^* \cdot \Delta p_{nr}^* \geq h / (4\pi), \quad (15)$$

где  $\Delta p_{nr}^* = m_e v_{enr}^* = \bar{n} h / (2r_0)$  – усредненная квантованная радиальная проекция импульса дрейфующих в микроструктуре исследуемого проводника свободных электронов;  $v_{enr}^* = \bar{n} h / (2m_e r_0)$  – усредненная квантованная радиальная скорость дрейфующих свободных электронов в круглом цилиндрическом проводнике.

Из (15) и (5) для наименьшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta r_{nh}^*$  «горячего» радиального участка ВЭП исследуемого проводника с импульсным током  $i_0(t)$  большой плотности получаем:

$$\Delta r_{nh}^* = r_0 / (2\pi \bar{n}) = r_0 \ln n_m / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (16)$$

В результате из (13) и (16) для усредненных квантованных ширин  $\Delta r_{nce}^*$  крайних «холодных»

радиальных участков ВЭП рассматриваемого проводника в принятом нами приближении находим:

$$\Delta r_{nce}^* = r_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [4\pi(n_m - 1)]. \quad (17)$$

Из (14) с учетом (16) для усредненных квантованных ширин  $\Delta r_{nci}^*$  внутренних «холодных» радиальных участков ВЭП исследуемого проводника запишем следующее расчетное соотношение:

$$\Delta r_{nci}^* = r_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (18)$$

Тогда для усредненного шага периодической локализации дрейфующих свободных электронов на «горячих» участках ВЭП вдоль наружного радиуса  $r_0$  рассматриваемого проводника из (16)-(18) имеем:

$$\Delta r_{nh}^* + 2\Delta r_{nce}^* = \Delta r_{nh}^* + \Delta r_{nci}^* = r_0 \ln n_m / [(n_m - 1)]. \quad (19)$$

Из (9)-(12) и (16)-(19) следует, что найденные в используемом приближении усредненные геометрические размеры «горячих» и «холодных» участков радиальных ВЭП в  $l_0/r_0$  раз меньше соответствующих усредненных размеров для продольных ВЭП проводника с импульсным током  $i_0(t)$  большой плотности. Эта особенность в пространственных распределениях продольных и радиальных ВЭП сплошного круглого проводника важна для ряда современных электротехнологий [11], использующих протекание по металлическим проводникам больших импульсных токов с целью их электрического взрыва (ЭВ). В наиболее полной мере она будет проявляться при получении за счет ЭВ в газах тонких металлических провололок малоразмерной «металлической» плазмы и затем после сепарации таких плазменных продуктов нано- и микродисперсных проводниковых материалов [12].

**5. Результаты экспериментальной проверки выбора усредненных характеристик для квантованных продольных ВЭП в металлическом проводнике с импульсным током.** Для верификации (проверки истинности) выбора по (5) усредненного значения  $\bar{n}$  квантового числа  $n$  и предложенных расчетных соотношений (9)-(12) применительно к усредненным квантованным характеристикам продольных ВЭП в исследуемом проводнике используем представленные в [1, 2, 5] результаты экспериментальных исследований волнового продольного распределения дрейфующих свободных электронов и соответственно «горячих» и «холодных» продольных участков в оцинкованном стальном проводе ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>;  $n_k=4$ ) с толщиной наружного защитного покрытия  $\Delta_0=5$  мкм, испытывающем в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора длительной  $C-$  компоненты тока искусственной молнии [13] прямое воздействие аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  временной формы  $t_m/\tau_p=9$  мс/160 мс большой усредненной плотности  $\delta_{0m} \approx I_{0m}/S_0 \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>. Данному амплитудному значению  $\delta_{0m}$  соответствует амплитуда униполярного импульса тока  $I_{0m}=745$  А, время наступления которой было равно  $t_m=9$  мс. На уровне  $0,5I_{0m}$  согласно выполненным измерениям с помощью поверенного в метрологической службе коаксиального измерительного шунта типа ШК-300, имеющего для данного режима работы коэффициент преобразования  $56,42 \cdot 10^2$  А/В [2, 13], длительность используемого в проведенных экспериментах импульса тока

составляла  $\tau_p=160$  мс, а полная длительность протекающего по проводу указанного токового импульса при частичном разрушении его металлической структуры из-за интенсивного джоулева нагрева немагнитных материалов провода достигала около 576 мс [1, 2]. Отметим, что в рассматриваемом случае для токового скин-слоя круглого стального провода в стационарном режиме выполняется соотношение вида [2, 6]:  $\Delta_i/r_0 \approx 2r_0^{-1} [t_m/(\pi\mu_0\gamma_0)]^{1/2} \approx 42$ , где  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная [3], а  $\gamma_0 \approx 8 \cdot 10^6$  См/м – удельная электропроводность основания используемого в опытах провода [3]). Выполнение для  $\Delta_i/r_0$  указанного количественного значения может свидетельствовать о правомерности используемых расчетных оценок для амплитуды усредненной плотности тока  $\delta_{0m}$ , для которых амплитудно-временные параметры (АВП) испытательного аperiodического импульса тока вида 9 мс/160 мс в стальном проводе брались из соответствующих опытных осциллограмм, приведенных в [2].

На рис. 2 приведены результаты электротеплового воздействия на выбранный нами стальной провод аperiodического импульса тока 9 мс/160 мс с указанным АВП ( $I_{0m}=745$  А;  $t_m=9$  мс;  $\tau_p=160$  мс). Видно, что в этом случае ( $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) вдоль продольной оси оцинкованного стального провода располагаются четыре сферообразных «горячих» (квантованной шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм) и два цилиндрических внутренних «холодных» (квантованной шириной  $\Delta z_{nci} \approx 27$  мм) продольных участков ВЭП. Остальные пять «горячих» и восемь «холодных» (из них два крайних шириной  $\Delta z_{nce} = \Delta z_{nci}/2$ , экспериментально подтвержденной согласно этому соотношению в [14]) продольных участков ВЭП провода подверглись полной сублимации. Указанное число «горячих» и «холодных» участков продольных ВЭП исследуемого провода может говорить о том, что в данном опытном стохастическом случае для квантового числа  $n$  выполняется равенство  $n = \bar{n} = 9$ . Из расчетного соотношения (9) при  $n_m = 2n_k^2 = 32$  и соответственно  $\bar{n} = 9$  следует, что значение усредненной ширины «горячего» продольного участка ВЭП стального провода численно составляет около  $\Delta z_{nh}^* = 5,7$  мм (при опытном значении этой ширины  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм [1]). Здесь важно подчеркнуть то, что найденная по (9) усредненная ширина  $\Delta z_{nh}^*$  «горячего» продольного участка ВЭП практически соответствует численному значению квантованной ширины  $\Delta z_{nh}$  этого участка ВЭП указанного провода, определенной в [1, 2, 5] по следующему расчетному соотношению:

$$\Delta z_{nh} = e_0 n_{e0} h (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}, \quad (20)$$

где  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль электрического заряда электрона;  $n_{e0}$  – усредненная плотность свободных электронов в металле рассматриваемого проводника до начала протекания по нему импульсного тока  $i_0(t)$ .

Из (20), полученного в [2, 5] на основе фундаментального соотношения неопределенностей Гейзенберга [3], для используемого нами стального провода при  $n_{e0} = 16,82 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup> [2, 3] и  $\delta_{0m} \approx 0,37 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> следует, что  $\Delta z_{nh} \approx \Delta z_{nh}^* \approx 5,7$  мм. Эти расчетные ширины «горячих» продольных участков ВЭП в пределах 19 % отличаются от ранее экспериментально полученных в [1] для данного электрофизического случая

ширин ( $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм) соответствующих участков указанного провода. Отсюда можно обоснованно заключить, что квантованная ширина  $\Delta z_{nh}$  «горячего» продольного участка ВЭП металлического проводника согласно (20) является также усредненной геометрической характеристикой продольного ВЭП. Ее численное значение при неизменном значении  $\delta_{0m}$  в исследуемом проводнике остается также неизменным, что подтверждается результатами выполненных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» высокотемпературных экспериментов с использованием подобного стального провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) [1, 2, 5]. Приведенные выше расчетно-экспериментальные данные для ширины  $\Delta z_{nh}$  ВЭП указывают на правомерность выбора по (5) с учетом соотношения  $n_m=2n_k^2$  усредненного значения  $\bar{n}$  для целого квантового числа  $n$ .



Рис. 2. Внешний вид остывающих на атмосферном воздухе и асбестовом полотне квантованных сферообразных «горячих» (шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм) и цилиндрических внутренних «холодных» (шириной  $\Delta z_{nci} \approx 27$  мм) продольных участков (макроскопических зон квантованных продольных ВЭП) оцинкованного стального провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) сразу после воздействия на него аperiodического импульса аксиального тока  $i_0(t)$  временной формы  $t_m/\tau_p=9$  мс/160 мс большой плотности ( $I_{0m}=745$  А;  $t_m=9$  мс;  $\tau_p=160$  мс;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n=\bar{n}=9$ ) [1]

Что касается усредненной квантованной ширины  $\Delta z_{nci}^*$  внутренних «холодных» продольных участков ВЭП стального провода, то она согласно (11) при  $n_m=32$  и  $\bar{n}=9$  с учетом (5) численно составляет примерно 29,9 мм (при опытным значении этой ширины  $\Delta z_{nci} \approx 27$  мм [1]). Видно, что расчетное по (11) усредненное значение ширины  $\Delta z_{nci}^*$  внутреннего «холодного» участка продольного ВЭП для рассматриваемого стального провода отличается от экспериментально полученного в нем значения ширины  $\Delta z_{nci}$  соответствующего участка продольного ВЭП в пределах 10 %.

Выполнить даже в грубом приближенном виде на мощной высоковольтной сильноточной электроустановке верификацию расчетных соотношений (16)-(19) применительно к усредненным квантованным геометрическим характеристикам радиальных ВЭП в исследуемых металлических проводниках с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  большой плотности для нас в настоящее время из-за отсутствия необходимой высокоскоростной фоторегистрирующей аппаратуры практически не представляется возможным. Хотелось надеяться на их экспериментальную проверку в последующих в ближайшие годы своих собственных сильноточных электрофизических исследованиях или в поисковых работах других ученых-электрофизиков.

## Выводы.

1. В рамках квантовомеханического подхода к электрофизическому исследованию возникающих в круглых металлических проводниках с импульсным аксиальным током большой плотности периодических ВЭП макроскопических размеров выполнены определенные научные обобщения и предложены расчетные соотношения (3)-(5) для приближенного определения усредненного значения  $\bar{n}$  целого квантового числа  $n$  для распространяющихся в их электропроводящем материале квантованных мод волновых пси-функций  $n$ -го порядка и квантованных электронных дебройлевских полуолн и на их основе получены расчетные соотношения (9)-(12) и (16)-(19) для оценки усредненных геометрических характеристик продольных и радиальных ВЭП, периодически размещенных вдоль длины  $l_0$  и радиуса  $r_0$  исследуемых проводников.

2. Экспериментальная проверка на мощном сильноточном высоковольтном генераторе длительной аperiodической  $C$ -компоненты тока искусственной молнии результатов предложенного выбора по (5) усредненного значения  $\bar{n}$  целого квантового числа  $n$  и приближенного расчета по (9)-(12) усредненных геометрических характеристик для квантованных продольных макроскопических ВЭП в сплошном оцинкованном стальном проводе ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) с аperiodическим импульсом тока временной формы 9 мс/160 мс большой плотности ( $I_{0m}=745$  А;  $t_m=9$  мс;  $\tau_p=160$  мс;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) подтвердила их достоверность.

3. Верификация расчетных соотношений (16)-(19) для усредненных геометрических характеристик квантованных радиальных ВЭП в электрически взрывающихся металлических проводниках с большим импульсным аксиальным током требует проведения в дальнейшем сложных и дорогостоящих соответствующих экспериментальных электрофизических исследований в условиях высоковольтной лаборатории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током // Электричество. – 2014. – №4. – С. 34-42.
2. Баранов М.И. Основные характеристики волнового распределения свободных электронов в тонком металлическом проводнике с импульсным током большой плотности // Электричество. – 2015. – №10. – С. 20-32.
3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
4. Баранов М.И. Локальный нагрев токопроводов силового электроэнергетического оборудования при аварийных режимах и токовых перегрузках // Электротехника. – 2014. – №6. – С. 13-17. doi: 10.3103/s1068371214060030.
5. Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макропроявления // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
6. 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.
7. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
8. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к по-

ражающему действию импульсного тока молнии // Электричество. – 2013. – №10. – С. 7-15.

9. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1973. – 228 с.

10. Баранов М.И., Рудаков С.В. Усредненные характеристики волнового распределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2013. – №60(1033). – С. 12-20.

11. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.

12. Баранов М.И. Получение дисперсных материалов с микронными, субмикронными и наноструктурными частицами вещества при электрическом взрыве тонких металлических проводников // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №4. – С. 45-49. doi: 10.20998/2074-272X.2012.4.09.

13. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85. doi: 10.1134/s0020441208030123.

14. Баранов М.И. Теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию существования в микроструктуре металлического проводника с током электронных дебройлевских полуволн // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №3. – С. 45-49. doi: 10.20998/2074-272X.2014.3.09.

#### REFERENCES

1. Baranov M.I. Features heating thin bimetallic conductor large pulse current. *Elektrichestvo*, 2014, no.4, pp. 34-42. (Rus).
2. Baranov M.I. The main characteristics of the wave distribution of free electrons in a thin metallic conductor with a pulse current of high density. *Elektrichestvo*, 2015, no.10, pp. 20-32. (Rus).
3. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
4. Baranov M.I. Local heating of electrical pathways of power electrical equipment under emergency conditions and overcurrents. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol.85, no.6, pp. 354-357. doi: 10.3103/s1068371214060030.
5. Baranov M.I. Quantum-wave nature of electric current in a metallic conductor and some of its electrophysical macrophenomena. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
6. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriia 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).
7. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, Kn. 1* [Electrical engineering handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, Book 1. Ed. I.N. Orlov]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 880 p. (Rus).
8. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance wire and cable to the aircraft to the striking action pulsed current lightning. *Elektrichestvo*, 2013, no.10, pp. 7-15. (Rus).
9. Dwight H.B. *Tablicy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Tables of integrals and other mathematical data]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 228 p. (Rus).
10. Baranov M.I., Rudakov S.V. Averaged characteristics of the wave drifting distribution of electrons in a metal conductor with a pulse current conduction of high density. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2013, no.60(1033), pp. 12-20. (Rus).
11. Guly G.A. *Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij* [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
12. Baranov M.I. Preparation of disperse materials with micron, submicron and nanostructured matter particles under electric explosion of thin metallic conductors. *Electrical engineering &*

*electromechanics*, 2012, no.4, pp. 45-49. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2012.4.09.

13. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.

14. Baranov M.I. Theoretical and experimental results of research into explanation of de Broglie half-wave existence in the microstructure of an active metallic conductor. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.3, pp. 45-49. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.3.09.

*Postynula (received) 25.05.2016*

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., гл.н.с.,

Рудаков Сергей Валерьевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,

61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg\_73@i.ua

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

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

<sup>2</sup> National University of Civil Protection of Ukraine,

94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

**Average geometrical features of the electron wave packages distribution in metallic conductors with pulsed axial current of high density.**

**Purpose.** Calculation and experimental determination of average geometrical features of distributing of macroscopic electron wave packages (EWP) in round cylindrical metallic conductors with the pulsed axial current of high density. **Methodology.** Theoretical bases of the electrical engineering, bases of atomic and quantum physics, electrophysics bases of technique of high voltage and high pulsed currents. **Results.** The results of the conducted calculation and experimental researches are resulted on close determination of average geometrical features of distribution of longitudinal and radial EWP of macroscopic sizes in the indicated conductors. These descriptions are included by the average widths of «hot» and «cold» longitudinal and radial areas of conductor, and also average steps of division into the periods of similar areas. Results of the executed calculations and high temperature experiments for average geometrical features of longitudinal EWP in the zincked steel wire of diameter of 1.6 mm and length of 320 mm with the aperiodic impulse of current of temporal form 9 ms/160 ms and by amplitude 745 A coincide within the limits of 19 %. **Originality.** First with the use of methods of atomic and quantum physics the features of the stochastic distributing and mean values of basic geometrical sizes are analysed macroscopic longitudinal and radial EWP in round cylindrical metallic conductors with the pulsed axial current of high density. **Practical value.** Drawing on the got results in practice will allow more reliably to forecast geometrical sizes and places of localization of arising up in the probed metallic conductors with pulsed axial current of high density longitudinal and radial EWP. References 14, figures 2.

**Key words:** metallic conductor, pulsed current of high density, electron wave package of conductor, «hot» and «cold» longitudinal and radial areas of conductor, quantization and averaging of geometrical features of electron wave packages of conductor.



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

## MAGNETIC PULSED PROCESSING OF METALS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES OF MODERNITY – A BRIEF REVIEW

*The aim of the article is dedicated to the brief review of the main achievements of the advanced technologies with usage of the energy of the pulsed magnetic fields. Originality. The new suggestions are represented. They are based on the results of development of the new scientific direction in area of the magnetic pulsed processing of thin-walled sheet metals when a penetration of the acting fields is quite significant. The known traditional approaches based on the skin-effect in electro-dynamics and were successfully implemented. Methodology of the analysis consist of careful theoretical and practical experiments review and its future development. Results of the research based on the existing experimental approbation were presented visually with the description followed The known approaches to solution actual production problems based on the skin-effect in electro-dynamics are described. Practical value. The first of practical propositions is related to stamping of the drawing the printed circuit boards on the cooper foil with thickness about ~50 mkm. This operation is realizing by the forces of magnetic pressure directly without any supplements introduction. The second consists in usage the magnetic pulsed attraction for external removing the dents in the car body. This operation does not demand disassembling of elemental base and allows preserving the paint of coverings. Both of these technologies could to minimize the working time, to decries the volume of the waste products and to make the manufacturing existed much cheaper. References 10, figures 3.*

*Key words: magnetic pulsed processing, metal forming, printed circuit boards stamping, external flattening.*

*Работа посвящена краткому обзору основных достижений передовых технологий с использованием энергии импульсных магнитных полей. Описаны известные традиционные подходы, основанные на скин-эффекта в электродинамике и были успешно реализованы. Представлены новые предложения, основанные на результатах развития нового научного направления в области магнитно-импульсной обработке тонкостенных листовых металлов, когда проникновение действующих полей весьма существенно. Первое из этих предложений связано с оттиском рисунка печатных плат на медной фольге толщиной около ~ 50 мкм. Эта операция реализуется силами магнитного давления непосредственно. Второе предложение заключается в использовании магнитного импульсного притяжения для внешнего удаления вмятин в кузове автомобиля. Эта операция не требует демонтажа элементной базы и позволяет сохранить краску покрытий. Библ. 10, рис. 3.*

*Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, обработка металлов, оттиск печатных плат, внешняя рихтовка.*

### Introduction and publications analysis.

The ecology, economy of resources and energy are the most sharp problems among the main problems of modernity. Discussion of what is the first one, what is the second one, and what is the third one has no sense. The different viewpoints may consider these problems, as they want. The main thing is in answers for questions: where energy and material resources can be taken, and how to preserve our environment for the next generations?

Solving these problems will define the future of the all Humanity.

The practical usage of energy of the pulsed electromagnetic fields (in the other terminology this is the «Electromagnetic Metal Forming» – «EMF») opens exclusive perspectives for creation of advanced technologies for processing of the materials of any physical nature. They have the doubtless advantages, among which there are ecological purity, low energy consumption, economic expenditure of the material resources, at last, high speed of the manufacture process.

A scientific technical information about the magnetic pulsed metal working (EMF) appeared beginning in the fifties year's end of the last century. First magnetic pulsed equipment for processing the tubular objects was demonstrated by «General Dynamics Corp» in Geneva at the Nuclear Energy Peaceful Usage Exhibition in 1958.

The intensive development of the magnetic pulsed technologies was continued till beginning of eighties approximately. The next fifteen - twenty years may be characterized by decreasing of the interest to the processing field methods. There were many different technical and

social obstacles. They are not interesting and should not be announced. But at the beginning of 2000th the magnetic pulsed processing technologies are again attracting attention of the industrial manufacture. The quantity of the science-practical publications essentially increases. They are devoted to elaboration and practical usage of the magnetic pulsed technologies in different branches of industrial manufacture in USA, Germany, France, Sweden etc. There are many reasons of the increasing interest to the magnetic pulsed methods. The new alloys appeared. They had some unique properties which may be displayed in the pulsed action only. For example, hyper-plasticity property was among them, when the relative deformations may reach ~200 %.

For the time being worsening of the natural conditions for the Humanity is one of reason of the high interest to the magnetic pulsed technologies. The world public is worried by exhausting of the natural resources, by pollution and poisoning of the Planet Earth. The Humanity owns by the known high productive technologies in the different areas of activity. But increasing of the work productivity becomes not a main problem of the Science Technical Progress. The ECOLOGY, RESOURCES and ENERGY SAVING are becoming by the main problems.

There are many European and American publications of the different authors devoted to the description of magnetic pulsed working metals, for example [1]. But the most of them are not acquainted with achievements of the former soviet schools (in the main question is about the Russian language scientific literature!) which was one of

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

the first in this area of the SCIENTIFIC TECHNICAL PROGRESS [2]. That is why the main attention of this article will be concentrated on the publications of the scientists from former Soviet Union.

**Purpose of the article** is to make a brief review of the main achievements of the advanced technologies with usage of the energy of the pulsed magnetic fields.

**Main equipment for the magnetic pulsed metal processing.** The distinguishing particularity of the methods of the field action is an absence of any immediate contacts with processed object. The practical sense of this particularity becomes obvious, for example, in comparison the mechanical processing and electromagnetic stamping. The electromagnetic stamping is being realized without any puncheon (striking element!). The pressure forces are appearing during interaction of the field with metal of the conducting work-piece. Nevertheless, as it is in mechanics for the technological operation realization the two main components are necessary. These are a source of energy and the tool. The energy source is a system of the high voltage. In the special technical literature it was named «THE MAGNETIC PULSED INSTALLATION». The tool is a complex consisting of the generator of the field which is named «INDUCTOR» and a processed work-piece. In the whole, the present complex is the INDUCTOR SYSTEM.

Should mark if the energy source (the Magnetic Pulsed Installation!) is an universal element of equipment in different production operations, but the tool of the method has to be created for implementation of a particular manufacturing operation only. Thus, the MAGNETIC PULSED INSTALLATION plus the INDUCTOR SYSTEM are the necessary components of the technical equipment for the metal working with help of the energy of the pulsed magnetic fields [3](see Fig. 1).

**Some implemented and new advanced technologies.** First of all a brief information about the traditional implemented magnetic pulsed technologies should be given [1-3].

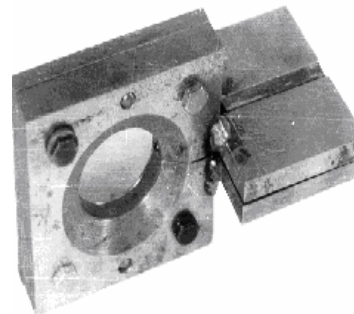
In the special literature there is some general adopted classification of the technological operations. It defines belonging to three of the possible scheme of their practical realization.

The first group unites the manufacturing processes, which are being fulfilled according to scheme what was named as «COMPRESSION». The magnetic pressure forces are directed to a system axis. They are working for compression.

The second group includes the production operations which were named «EXPANSION» according to the type of deformation of the work-pieces. In this case the INDUCTOR (tool!) was placed in inner cavity of the work-piece. The magnetic pressure forces are directed from the system axis. They are working for expansion.

The third group of operations is realized according to scheme what was named as «FLAT SHEET STAMPING». In this case the inductor and work-piece are the parallel flat objects divided by insulating inserts. The magnetic pressure forces are directed from inductor to work-piece. They are working for repelling. The last remark demands more precision. The last experiments showed that under decreasing of frequencies of the acting

magnetic fields the pressure forces are changing their direction. They are working for attraction the sheet work-piece to inductor. For the first time this phenomenon was displayed and described by scientists of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Professors Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky and L.T. Khimenko for a flat variant of the INDUCTOR SYSTEM. It may be suggested this phenomenon would appear and in a case of the known cylindrical constructions of the tools under some fixed conditions too. But should mark that it is hypothesis only. A final conclusion demands its experimental confirmation.



a



b

Fig. 1. The technical equipment created in the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Ukraine) for processing of the tubular work-pieces: a) it is the massive single turn INDUCTOR; b) it is the MAGNETIC PULSED INSTALLATION MIU-24 (the stored energy is ~ 24 kJ)

The given classification is general one. In its turn each of the distinguished schemes may be divided by sub-groups with more detailed any separate properties. All magnetic pulsed schemes which were pointed out above allow fulfilling not only different assemblage and separation in the production operations. The cold welding, all necessary and possible combinations of the schemes which were distinguished have to be mentioned too.

For example, the known compression of the cable tips is a clear illustration of the effective assemblage. A wire is being put into a cavity tip of the body. Then the body is being compressed by the magnetic pressure. Identically, not only cable tips for electrical engineering elements but also the tips onto flexible hoses, ropes etc. can be compressed by this way too. A quality of this connection is very high. Its strength till destruction, is not lower than analogical index for the material of the cable, rope, wire, as a rule.

The schemes of «compression» or «expansion» allow realizing the strength connections of the metal details with elements of glass, ceramics and other non-metal materials. Connection of metal with a non-metal by the magnetic pulsed action provides a high density and reliability of the connection, increasing the working exploitation characteristics in many cases.

All above enumerated the magnetic pulsed schemes of force action allow realizing the cold welding of not only the identical metals but also different ones (aluminum-cooper, aluminum-steel, cooper-steel etc.). For qualitative welded connection of the work-pieces their speeds of the movement in the opposite directions must have maximum values. In this case a mixed boundary layer of the metals is appearing during their clash at the expense of the inertial effects.

Some production operations for quite big areas on the flat metal sheets have to be distinguished particularly. Usually they are being fulfilled in accordance with scheme of the «flat sheet stamping». The most successful among them are forming of membranes, stamping of the automobile and airplane components, the pictures and inscriptions minting. These operations characterize possibilities of the magnetic pulsed action for processing of the quite large-scale articles of the ordered shape. In dependence on the energy-capacity of equipment a dimension of the processed area may be increased to  $\sim 0.2 \text{ m}^2$ .

Finishing description of the typical and successful magnetic pulsed technologies, should point out that all adduced examples had been implemented practically for the metals with high value of the specific electrical conductivity. The processing is being fulfilled under condition of the skin-effect regime when the field penetration processes through the work-piece are not essential and they do not decrease the magnetic pressure forces.

The scheme of the traditional magnetic pulsed processing demands some supplements to design of the tool when the question is about deformation of the bad conductors or enough thin metal objects.

The most effective supplement in the inductor systems turned out usage of the «sputniks» together with elastic transmitting inserts. This solution suggests placement (for any scheme of the magnetic pulsed action!) by layers: the inductor - the good conductor (it is the «sputnik»!) - the elastic insert which is transmitting the force action on the object of processing. The magnetic pressure is acting on the well conducting «sputnik». This pressure is being transmitted on the work-piece through elastic insert. Usually, the «sputnik» is made from a cooper. Some special sorts of rubber are being used as transmitting inserts. As well, some liquids may be used for this goal.

The usage of «sputniks» at the radio manufacture allows successful to fulfill some production operations for stamping small flat details and to print quite complicated picture on the cooper foil for fixing of different components of radio apparatus.

In spite of successful usage «sputniks» for solving many production problems this technical solution essentially decreases effectiveness of the process deforming and excludes the non-contact force action on the work-

piece what is the main advantage of the magnetic pulsed metal processing.

Unlike the known methods of processing massive conductors in the skin-effect regime the qualitatively new direction in the magnetic pulsed working of metals provides the intensive non-contact force action on thin-walled metal objects (practically, the «transparent» for magnetic fields!) was founded and was formulated in the works of scientists of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» at beginning of the last century. Its physical essence consists in creation of the demanded spatio-temporal distribution of the acting magnetic field in the metal work-piece [3, 4].

The investigations of processes of the force interaction between the pulse magnetic fields and thin-walled («transparent» for acting fields!) conductors led to the patented technical solutions for designs of the inductor system which permit the practical realizing the most important production operations in the modern industrial manufacture.

The new progressive technology of the magnetic pulsed stamping the printed circuit boards for the electrical engineering devices was suggested for the first time. This operation for stamping of the conducting drawing in the charging-rectifying device of the micro-calculators «Electronics» was tested experimentally. The positive results were got. The experimental specimens are represented on Fig. 2.

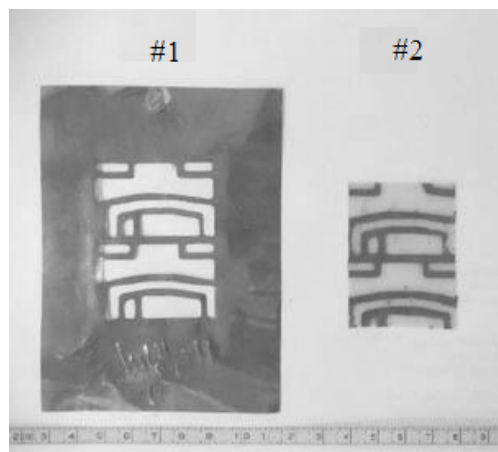


Fig. 2. The experimental specimens of the printed circuit boards conducting elements which were stamped in the cooper foil with thickness  $\sim 50 \text{ mkm}$  by the magnetic pulsed pressure:

- #1 – it is the drawing in the cooper foil;
- #2 – it is the ready-made printed circuit board

The principle action of the inductor system was based on the phenomenon in the electrodynamics. Its essence consists in what the packet of the flat electromagnetic waves does not penetrate practically through thin-walled conductive screens into the free space. Technically, this phenomenon is being realized with help of the inductor system where a drawing in a foil sheet has to be stamped with help of a dielectric die.

Should mark what the practical usage of the suggested inductor systems is not limited by stamping of printed circuit boards from the cooper foil only. The accepted principle action permits realizing the effective magnetic pressure on the thin-walled objects from the

wide class of metals with different electrophysical and mechanical characteristics.

Continuing discussion of processing the thin-walled metals should particularly distinguish a clear example of new usage of the electromagnetic energy under low frequencies of the acting fields. A question is about a practical realization of the magnetic pulsed attraction of the sheet work-pieces under excitation of the electrodynamic forces.

For the first time at 2004 the scientists from the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Professors Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko) had watched an interesting phenomenon. The question is about the force action of the pulsed magnetic fields with enough low working frequencies on the steel specimens. As it followed from experiments, decreasing of the frequency till a definite limit was leading to the work-piece attraction in direction to the working surface of the single turn inductor-tool. The question is about the deforming and pulling out of a part of the sheet metal [5].

A practical application of the displayed effect may be an operation for the dent removing on the body car without any mechanical contacts with it and without possible damages of their outer painted coats. Should mark the more deep sense of this direction of the magnetic pulsed working metals. It consists in essential widening of possibilities of the force action with help of the energy of the electromagnetic fields. A combination of the magnetic pulsed repelling and the magnetic pulsed attracting can give absolutely new solutions for creating absolutely new flexible progressive technologies of the future.

Let us stop on the attraction for the dent removing. For the time being some positive results have a place here already. Some experimental results could be illuminated more in detail [6, 7].

Many technical solutions for the outer magnetic pulsed flattening of the airplane are known long ago. The most practical and interesting suggestions in this area are belonged to the American engineers from the «Boeing», «ElectroImpact» and «Fluxtronic». As it follows from their publications the attraction could be realized with help of a single turn inductor with two pulsed currents of the different frequencies [8, 9].

Should mark the suggestion of the magnetic pulsed attraction with help of superposition of «slow» and «quick» magnetic fields had been discussed in the works of the former soviet scientists too [3].

The physical essence of these both suggestions is identical. Eventually they are based on superposition of the magnetic fields with low and high frequencies which are excited in the inductor system.

The technical level of these ideas for practical realization is approximately identical too. According to these suggestions the real devices for the magnetic pulsed attraction of the sheet metals must have two synchronized power sources, the high-voltage and high-current electronics for the complicated controlling systems, etc. All these factors are the reasons of a high cost and of low reliability what decreases essentially a practical significance of these elaborations.

The practical usage of the displayed effect of the steel sheets attraction by the forces of the low-frequency

magnetic fields opens new possibilities for creating enough simple, reliable and relatively cheap devices for the magnetic pulsed flattening the sheet metals.

These devices must have the evident advantages.

Among them the following positions may be distinguished particularly.

- Any mechanical contacts with a processed surface are absent, the magnetic pulsed forces are acting.
- The list of the processed metals (steel and its different alloys which are being used in the auto branch of the manufacture) is quite wide.
- Flattening is being realized from the outer side of the body car without any disassembling what is sure necessary in the traditional technologies.
- The possible preserving of the outer coating (without any damages!) on the surface being worked.
- There is possibility of the damaged element restoration till the initial state with preserving the existing coating.

The experimental model of the inductor system allowing to excite the magnetic pulsed attracting forces was elaborated, made and tested in the real conditions for different specimens of the sheet steels.

The single turn inductor was connected to output of the magnetic pulsed installation (power source) with energy stored ~4.5 kJ.

Creating and removing the dents in the different parts of the metal sheet were fulfilled. One of them will be removed but other dent will stay for comparison.

The first operation was dedicated to creating the dents with help of the attraction forces. Two dents with half-sphere shape with diameter about ~ 0.03 m and depth about ~ 0.002 m were pulled from the steel sheets after eight repetitions of the force action.

The next experiment was dedicated to removing of one of the before created dents on the sheet surface with help of the attraction forces too. This specimen was placed on the flat insulated surface of the inductor so that the interior of existing dent turned out opposite the inner hole of the inductor. Removing the dent was produced by the same way as it was created by the magnetic pulsed attraction.

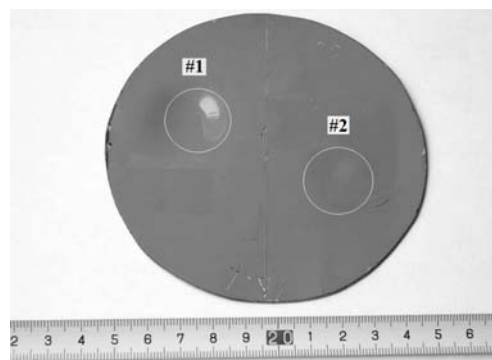


Fig. 3. The experimental specimen from the sheet steel of the body car «Mitsubishi» with the painted covering: #1 – is the dent got by the magnetic pulsed attraction from the assigned part of the experimental sheet specimen, #2 – is the part of the experimental sheet specimen with removed dent

After five repetitions the dent had been practically removed. The surface of the sheet, where it was, had



become quite smooth. The subsequent magnetic pulsed attraction would lead to appearance of a new dent with opposite curvature in relation to the initial.

The experimental specimen with initial and removed dents is shown on Fig. 3.

The main results of the conducted experiments are the following.

- The energy of the force action what is necessary for the dent removing is essentially smaller what is necessary for the dents creating on the smooth surface.
- In fulfilling production operations of the magnetic pulsed attraction the repetition stability of the got results was marked. This fact testifies about reliability of the tested method for the practical application. For example, it could be external flattening of a damaged body car.

Ending a description of the conducted experiments should mark that the magnetic pulsed attraction with help of the presented equipment may be realized for the ferromagnetic steels only.

Besides should point out that the practical achievement not only for steels but and suggestions for non-magnetic metals are represented on Web Site of Laboratory of the Electromagnetic Technologies (Kharkiv National Automobile & Highway University, Ukraine) [10].

#### Conclusions.

The conducted review is briefly illuminating the main achievements of the advanced technologies with usage of the energy of the pulsed magnetic fields.

1. The known approaches to solution actual production problems based on the skin-effect in electrodynamics are described. They were demonstrated their effectiveness in many cases of the practical approbation and were implemented in different branches of the industrial manufacture.

2. The new suggestions of the magnetic pulsed force action are represented.

They are based on the results of development of the new scientific direction in area of the magnetic pulsed processing thin-walled sheet metals when a penetration of the acting fields is quite significant. The first of these suggestions is related to stamping of the drawing the printed circuit boards on the cooper foil with thickness about 50μm. The second suggestion consists in usage the magnetic pulsed attraction for external removing the dents in the car body. The operation does not demand disassembling of elemental base. As well the paint of coverings may be preserved.

#### REFERENCES

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol.211, no.5, pp.787-829. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012**.
2. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impulsoj obrabotke metallov* [Directory of magnetic-pulse treatment of metals]. Kharkiv, Vishcha shkola Publ., 1977, 189 p. (Rus).
3. 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).
4. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I. Electromagnetic processes in an inductor system for stamping printed circuit boards. *Electrical Technology Russia*, 2001, no.4, pp. 129-136.
5. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on High Speed Metal Forming*. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany, pp. 157-160.
6. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol.213, no.3, pp. 444-452. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003**.
7. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Chaplygin E.A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference High Speed Forming 2014*, May 26-29, 2014, Daejeon, Korea, pp. 253-260.
8. *Electromagnetic Dent Removal*. Available at: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp> (accessed 25 May 2014).
9. *Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover*. Available at: <http://www.fluxtronic.com/product.php> (accessed 07 August 2014).
10. *Laboratoriia elektromagnitnykh tekhnologii* (Laboratory of Electromagnetic Technology) Available at: <http://electromagnetic.comoj.com> (accessed 10 July 2014).

Received 13.06.2016

Yu.V. Batygin<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor,  
E.A. Chaplygin<sup>1</sup>, Candidate of Technical Science, Associate Professor,

O.S. Sabokar<sup>1</sup>, postgraduate student,  
<sup>1</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University,  
25, Petrovskogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.  
phone +38 057 7073727, e-mail: batygin48@mail.ru,  
chaplygin.e.a@gmail.com, o.s.sabokar@gmail.com

В.К. Беляев, Е.Н. Паненко

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПРИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

*Розглянуто особливості методик обробки результатів множинних вимірів тангенсу діелектричних втрат високовольтної ізоляції, заснованих на методі порівняння. Проаналізовано відомі методики визначення тангенсу втрат з призначенням окремого еталонного об'єкта і без призначення такого еталона. Отримано вирази для визначення методичних похибок. Проведено порівняння і показано, що застосування методик обробки без призначення окремого еталонного об'єкта може призводити до суттєвих ускладнень в оцінці результатів контролю ізоляції. Запропоновано удосконалення методик обробки, що зменшують названі похибки методик і трудомісткість вимірювань. Бібл. 8, табл. 1, рис. 5.*

*Ключові слова:* діагностика, високовольтна ізоляція, методика обробки, похибка, тангенс кута діелектричних втрат, трансформатор струму.

*Рассмотрены особенности методик обработки результатов множественных измерений тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции, основанных на методе сравнения. Проанализированы известные методики определения тангенса потерь с выделением отдельного эталонного объекта и без выделения такого эталона. Получены выражения для определения методических погрешностей. Проведено сравнение и показано, что применение методик обработки без выделения отдельного эталонного объекта может приводить к существенным сложностям в оценке результатов контроля изоляции. Предложены усовершенствования методик обработки, уменьшающие указанные погрешности методик и трудоемкость измерений. Библ. 8, табл. 1, рис. 5.*

*Ключевые слова:* высоковольтная изоляция, диагностика, методика обработки, погрешность, тангенс угла диэлектрических потерь, трансформатор тока.

**Введение.** В энергокомпаниях Украины внедряются технологии контроля состояния высоковольтной изоляции измерительных трансформаторов тока без вывода из эксплуатации (под рабочим напряжением) [1-5]. На настоящий момент, основным методом такого контроля для маслонаполненных трансформаторов тока (изоляция конденсаторного типа) следует считать дифференциальный контроль, при котором среди всех проверяемых трансформаторов тока (далее обозначаются как объекты контроля – ОК) одной фазы выделяются «эталонные», имеющие наилучшее состояние изоляции, а состояние других оценивают по изменению тангенса угла диэлектрических потерь относительно выделенного эталона [3, 6]. Можно выделить технологии периодического и непрерывного контроля, различающиеся, по сути, частотой измерения параметров изоляции объекта контроля (ОК), которая является следствием степени автоматизации процесса измерений [3, 5]. В обеих технологиях могут использоваться сходные средства (мостовые, векторные измерители) и методы измерений.

Для повышения эффективности контроля в таких технологиях предложено [2, 5] использовать множественные измерения, при проведении которых предполагается, что каждый ОК поочередно используется как эталонный для всех других контролируемых ОК (без выделения отдельного эталонного объекта). Названный подход позволяет отказаться от специального контроля и неудобных смен эталонных объектов. Указанные методики обработки результатов таких измерений отличаются от обработки при выделении эталона использованием различного рода усреднений по всем результатам, что естественно будет приводить к уменьшению влияния случайных отклонений вызванных, например, кратковременными помехами.

В то же время, в [7], указано на возможность возникновения при такой обработке дополнительных ошибок, не возникающих при обработке традиционных измерений с выделением специального эталонного объекта.

**Цель работы** – определение погрешности методики обработки результатов множественных измерений тангенса угла потерь изоляции без выделения эталонного объекта, разработка способов снижения погрешности.

**Основы методик обработки результатов измерений тангенса потерь изоляции.** В основе дифференциального контроля лежит мостовой метод сравнения с образцовым объектом (эталонном) [3, 6]. Используя мост переменного тока (в последнее время используют высокоточные векторные измерители, например [1]), измеряют тангенс ( $tg\delta_{meg}$ ) разницы углов диэлектрических потерь ОК ( $\delta_{ok}$ ), подключенного к входу «X» и угла потерь эталона ( $\delta_e$ ), подключенного к входу «0», так что (ввиду малости реальных значений углов потерь можно не учитывать отличие тангенса разницы от разницы тангенсов):

$$tg\delta_{ok} = tg\delta_{meg} + tg\delta_e. \quad (1)$$

Проблема заключается в том, что действительное значение тангенса потерь эталонного объекта, используемое как база для отсчета, во время измерения (контроля) неизвестно, и вместо него используют приближенные значения, что и является источником методических ошибок – расчетный тангенс отличается от действительного тангенса потерь ОК.

Для случая измерений множества объектов под рабочим напряжением, для ОК одной фазы в произвольный момент времени  $k$  запишем формулу (1)



следующим образом (для упрощения здесь и далее вместо  $tg\delta$  записываем  $\delta$ ):

$$\delta_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(k)}, \text{ или } \partial\delta_{ij(k)} = \delta_{j(k)} - \delta_{i(k)}, \quad (2)$$

где  $\delta_{j(k)}$  – тангенс угла потерь  $j$ -го ОК;  $\partial\delta_{ij(k)}$  – тангенс дифференциального угла при измерении для  $j$ -го ОК при  $i$ -м эталоне (первый индекс – эталона, второй – проверяемого ОК). Здесь, в соответствии с [3], измеряемый тангенс разницы углов потерь ОК и эталона назван тангенсом дифференциального угла.

При дифференциальном контроле определяется не сам тангенс дифференциального угла ОК, а его приращение ( $\Delta\delta_{ij}$ ) относительно базовых значений – значений в начале контроля [3, 6]. Так, при измерении в  $k$  момент времени для  $j$ -го ОК при  $i$ -м эталоне (одно парное измерение), приращение тангенса дифференциального угла:

$$\Delta\delta_{ij(k)} = \partial\delta_{ij(k)} - \partial\delta_{ij(0)} = -\Delta\delta_{ji(k)}, \quad (3)$$

где  $\partial\delta_{ij(0)}$  – начальное значение тангенса дифференциального угла, измеряемое при взятии объектов на контроль.

Согласно методике 1, описанной в СОУ-Н МПЕ [3], измерения проводят с выделенным эталонным ОК ( $i$  – индекс эталона). Используя полученное по (3) приращение, определяют текущее расчетное значение тангенса проверяемого ОК [3, 6]:

$$\delta p_{j(k)} = \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}, \quad (4)$$

где  $\delta_{j(0)}$  – начальное значение тангенса для  $j$ -го ОК, определяемое при взятии объектов на контроль.

Для эталонного ОК:

$$\delta p_{i(k)} = -\Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (5)$$

Полученные расчетные значения сравнивают с допустимыми значениями тангенса угла потерь (0,005...0,008), нормированными в [3] (критерии отбраковки).

Подставляя определение (3) в формулу (4), после преобразований получаем такое выражение для определения расчетного значения тангенса:

$$\delta p_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (6)$$

Сравнивая (6) с точным выражением (2) для действительного значения тангенса ОК видим, что в методике 1 при определении расчетного тангенса предлагается вместо неизвестного во время измерений значения тангенса эталонного объекта  $\delta_{i(k)}$  использовать значение, определяемое при взятии объектов на контроль  $\delta_{i(0)}$ . Получаемое расчетное значение тангенса угла потерь  $\delta p_{j(k)}$  (которое сравнивается с допустимой нормой), будет отличаться от действительного  $\delta_{j(k)}$  на величину приращения тангенса эталонного объекта за время от начала контроля.

При массовом контроле изоляции ОК на ОРУ, возникают определенные неудобства с выбором и контролем состояния эталонного ОК, а при выборе одного эталона для всех ОК фазы (наиболее удобный вариант) формула (5) для оценки эталонного ОК становится неприемлемой [5]. Действительно, для каждого проверяемого ОК при неизменном эталоне получаем свой, отличный от других результат для  $\Delta\delta_{ij(k)}$

и как следствие – разные значения расчетного тангенса  $\delta p_{i(k)}$  для одного и того же  $i$ -го эталона.

Чтобы получить возможность контроля эталонного ОК, в Днепровской энергосистеме [5] предложено вместо одного конкретного измеренного значения  $\Delta\delta_{ij(k)}$  использовать в (5) усредненное, по всем полученным значениям для  $N$  контролируемых объектов на фазе, приращение:

$$\delta p_{i(k)} = -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (\Delta\delta_{ij(k)}) + \delta_{i(0)}, \quad (7)$$

где  $i$  – индекс эталона.

**Методики обработки без выделения отдельного эталона.** В случаях проведения автоматизированного периодического или непрерывного контроля трансформаторов тока, предложено несколько методик (алгоритмов) определения расчетного тангенса, основанных на проведении множества измерений, без выделения отдельного эталонного ОК [2, 7]. В этих измерениях каждый ОК поочередно выступает в качестве эталонного для других проверяемых ОК одноименной фазы. Поскольку каждый ОК проходит измерения в паре с каждым, общее количество измерений значительно возрастает – пропорционально квадрату количества ОК.

Методика 2, используемая на девяти подстанциях Донбасской энергосистемы [5]. При контроле  $N$  объектов на фазе, предлагается при определении текущего значения расчетного тангенса каждого ОК вместо формул (4) и (5) использовать следующие выражения, построенные по аналогии с формулой (7):

$$\delta p_{i(k)} = -\Delta\delta_{iav(k)} + \delta_{i(0)}, \Delta\delta_{iav(k)} = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta\delta_{ij(k)}, \quad (8)$$

где индекс  $iav$  означает усредненное по всем ОК (кроме  $i$ -го) значение.

Объединяем (8) в одно выражение и подставляем определение (3):

$$\begin{aligned} \delta p_{i(k)} &= -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (-\partial\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}) = -\partial\delta_{iav(k)} + \delta_{iav(0)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Полученное выражение показывает (сравним с (6)), что, согласно данной методики, расчетное значение тангенса потерь представляет собой среднее всех парных результатов (каждый ОК с каждым, кроме, как сам с собой) проведенных по методике 1.

Методика 3, предложенная в [2] к использованию в системе непрерывного контроля на подстанции 330 кВ Днепровской энергосистемы. Согласно [2], при контроле  $N$  объектов одноименной фазы сначала определяются промежуточные значения тангенса ( $\delta^1_{ij(k)}$ ) для каждого  $i$ -го ОК при парных измерениях с разными эталонами  $j$  по формуле сходной с (6), где вместо значения тангенса эталона в начале контроля, используется расчетное значение тангенса  $i$ -го ОК полученное в предыдущем по времени измерении. Для определения окончательного расчетного значения для  $i$ -го ОК берется среднее всех промежуточных

значений для этого ОК при разных эталонах  $j$ . В формульном выражении описанный алгоритм можно записать так:

$$\delta 1_{ji(k)} = \delta p_{j(k-1)} - \delta \delta_{ij(k)}, \quad \delta p_{i(k)} = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \delta 1_{ji(k)}. \quad (10)$$

Последние формулы запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta p_{i(k)} &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (-\delta \delta_{ij(k)} + \delta p_{j(k-1)}) = \\ &= -\delta \delta_{iav(k)} + \delta p_{iav(k-1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Сравнивая выражения (11) и (9) видим, что алгоритмы обработки результатов для определения расчетного значения тангенса двух последних методик, без выделения отдельного эталона, отличаются только значениями, взятыми за базовые, от которых отсчитываются приращения. Во второй методике за базовое берется среднее всех значений тангенсов ОК при взятии на контроль, в третьей используется среднее всех расчетных значений в предыдущем измерении. В обеих методиках применяют усреднение измеренных значений тангенса дифференциального угла.

**Сравнение погрешностей методик.** Интерес представляет анализ методических погрешностей, возникающих в результате применения для расчета тангенса потерь приведенных выше формул, вместо точной формулы (2). Под методической погрешностью конкретной методики понимаем отличие расчетных значений тангенса ОК, получаемых при обработке согласно соответствующему выражению, от действительных его значений:

$$D_{j(k)} = \delta p_{j(k)} - \delta_{j(k)}.$$

Представляя каждую методику как отдельную модель для определения выходной величины (расчетного тангенса), данную погрешность можно рассматривать как погрешность адекватности модели, показывающую минимально возможную погрешность, при использовании данной модели-методики [8]. Полу-

ченные выражения для определения  $D_{j(k)}$  всех рассмотренных методик приведены в таблице. Для характеристики качества методик целесообразно провести анализ чувствительности, определив соответствующие коэффициенты чувствительности (влияния), которые связывают изменение каждой входной величины с результирующим изменением выходной. В таблице приводятся выражения коэффициентов  $b_{i(k)}$ , характеризующих чувствительность изменения результирующего расчетного значения тангенса  $j$  ОК в  $k$  момент  $\varepsilon \delta p_{j(k)}$  к изменению действительного значения тангенса каждого  $i$  ОК  $\varepsilon \delta_{i(k)}$ :

$$\varepsilon \delta p_{j(k)} = \sum_{k1=k}^k \left( \sum_i b_{i(k1)} \varepsilon \delta_{i(k1)} \right) + \sum_i b_{i(0)} \varepsilon \delta_{i(0)}, \quad i, j = 1 \dots N. \quad (12)$$

Здесь приведено общее выражение связи. Очевидно, что составляющие, связанные с моментами времени от 1 до  $k-1$ , появляются только при использовании методики 3. Предполагая малость изменения входных величин, коэффициенты чувствительности определялись на основе производных соответствующих функциональных связей выходной величины с входными [8]. Коэффициенты последней составляющей приведенного выражения ( $k=0$ ) характеризуют чувствительность к ошибкам при принятии на контроль.

Приведенные в табл. 1 выражения показывают, что наибольшее влияние на расчетный результат для какого-либо проверяемого ОК оказывают значения последних измерений на этом же ОК ( $b_{j(k)}=1$ ). Значения тангенсов других ОК не влияют на результат у проверяемого ОК в случае использования методики 1, но могут существенно влиять при использовании других методик. Это влияние обратно пропорционально количеству ОК.

Отрицательные знаки коэффициентов влияния  $b_{i \neq j(k)}$  указывают, что любое повышение значения тангенса на каком-либо ОК приведет к уменьшению значений расчетных тангенсов на других ОК.

Таблица 1

Выражения погрешностей рассмотренных методик и коэффициенты чувствительности (влияния)

№ методики, формула расчета	Погрешность $D_{j(k)}$ :	Коэффициенты чувствительности
1, (4), $i$ – эталон	$-(\delta_{i(k)} - \delta_{i(0)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i(k)} = -1, b_{i(0)} = 1$
2, (9)	$-\frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j}^N (\delta_{i(k)} - \delta_{i(0)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i \neq j(k)} = -1/(N-1), b_{i \neq j(0)} = 1/(N-1)$
3, (11)	$-\frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j}^N (\delta_{i(k)} - \delta p_{i(k-1)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i \neq j(k)} = -1/(N-1), b_{j(k-1)} = -1/(N-1),$ $b_{i \neq j(k-1)} = 1/(N-1)^2, \dots, b_{j(0)} \rightarrow 0$
4, (13)	$-\frac{1}{Nm-1} \sum_{i \neq j}^{Nm} (\delta_{i(k)} - \delta_{i(0)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i \neq j(k)} = -1/(Nm-1), b_{i \neq j(0)} = 1/(Nm-1).$

К примеру, предположим, что произошло изменение на одном («поврежденном») ОК. Пусть до  $k$ -го момента времени никаких изменений не происходило. В  $k$ -й момент времени на  $m$ -м ОК скачком изменился тангенс потерь на величину  $\varepsilon \delta_{m(k)} = \delta_{m(k)} - \delta_{m(k-1)} = d$ , на

остальных ОК изменений тангенса не было ( $\varepsilon \delta_{j \neq m(k)} = 0$ ) и в последующие моменты времени значения тангенса на всех ОК более не изменялись ( $\delta_{i(k+n)} = \delta_{i(k+1)} = \delta_{i(k)}$ ) для любых  $i, n$ . В соответствии со значениями коэффициентов влияния, по (12) получаем изменения

расчетного тангенса, а по выражениям в табл. 1 определяем погрешности  $D_{j(k)}$ :

- По методике 1: для «поврежденного» ОК  $\varepsilon\delta p_{m(k)}=d, D_{j(k)}=0$ ; для других ОК  $\varepsilon\delta p_{j\neq m(k)}=0, D_{j\neq m(k)}=0$ .
- По методике 2: для «поврежденного» ОК  $\varepsilon\delta p_{m(k)}=d, D_{j(k)}=0$ ; для других ОК  $\varepsilon\delta p_{j\neq m(k)}=-d/(N-1), D_{j\neq m(k)}=-d/(N-1)$ .
- По методике 3: для «поврежденного» ОК в момент  $k$ :  $\varepsilon\delta p_{m(k)}=d, D_{j(k)}=0$ ; в следующий момент  $\varepsilon\delta p_{j\neq m(k+1)}=-d/(N-1), D_{j\neq m(k+1)}=-d/(N-1)$ ; для других ОК в момент  $k$ :  $\varepsilon\delta p_{j\neq m(k)}=-d/(N-1), D_{j\neq m(k)}=-d/(N-1)$ ; в следующий момент  $\varepsilon\delta p_{j\neq m(k+1)}=-d/(N-1)^2, D_{j\neq m(k+1)}=-d(N-2)/(N-1)^2$ .

Как видим, при использовании методик 2 и 3 отличия расчетных значений тангенса от действительных его значений ( $\varepsilon\delta p_{j(k)} \neq \varepsilon\delta_{j(k)}, D_{j(k)} \neq 0$ ) появляются для «здоровых» ОК. При использовании методики 3 расчетные тангенса отличны от действительных не только у «здоровых», но и у «поврежденного» ОК – не в момент изменения, а начиная со следующего измерения.

При реальном контроле множества трансформаторов тока возможны ситуации, когда в результате старения изоляции одновременно постепенно растут тангенса у нескольких объектов с разной скоростью. При достижении критических нормированных значений тангенса у одного из ОК принимается решение о дополнительной проверке или выводе его из эксплуатации [3]. В таких случаях влияние изменения тангенса одного ОК на другие при использовании методик 2 или 3, затрудняет оценку состояния изоляции.

Для примера рассмотрим модельную ситуацию контроля нескольких ОК ( $N=6$ , в [5] рекомендовано использовать не более 6 ОК в связи с трудоемкостью измерений). На рис. 1 показана идеализированная картина изменения действительных значений тангенса изоляции ОК (начальные значения от 0,001 до 0,0015) в процессе эксплуатации с постоянной скоростью – от измерения к измерению ( $k$  – момент времени, индекс измерения). У ОК №2 сильное изменение приводит к достижению на 20-м шаге контроля критически большого значения (0,005), у ОК №3,4 нарастания более слабые, у ОК №1 плохо различимое нарастание (в 20 раз меньше, чем у №2), у двух оставшихся изменения отсутствуют.

На рис. 2-4 приведены графики изменения расчетных тангенса, определенных соответственно по формулам (4), (9) и (11), отвечающим методикам 1, 2 и 3. При использовании методики 1 (рис. 2) в качестве эталонного принят ОК №1, с незначительным, но не с самым малым изменением, что встречается на практике.

Соответственно, расчетные значения тангенса у контролируемых объектов меньше действительных (рис. 1) на значение прироста тангенса эталонного ОК. У ОК с неизменными действительными тангенсами будет фиксироваться их незначительное уменьшение (на такое же значение). Состояние эталонного ОК по этой методике не оценивается.

На рис. 2 также приведены расчетные тангенса эталонного ОК №1, определенные по формуле (7)

(график обозначен 1a), которые показывают, что такая оценка в рассмотренной ситуации дает существенное занижение тангенса, такое же, как при использовании методики 2 (см. далее рис. 3).

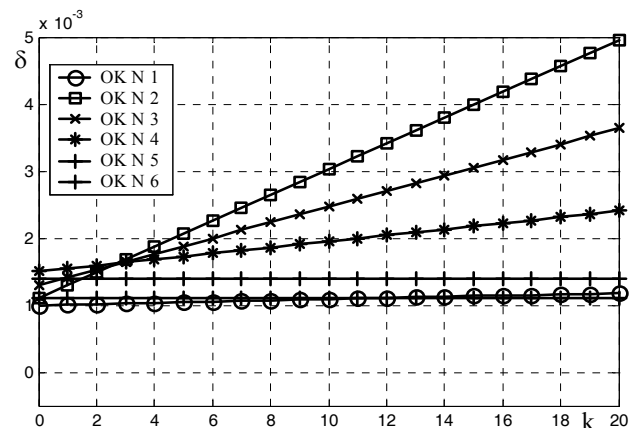


Рис. 1. Изменения действительных значений тангенса потерь изоляции ОК

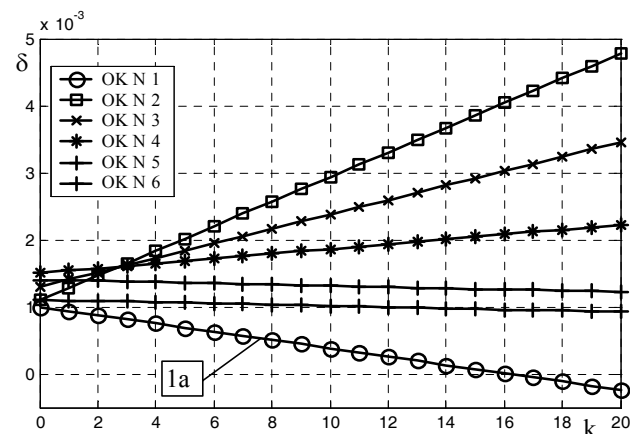


Рис. 2. Изменения расчетных значений тангенса потерь изоляции ОК, определенных по методике 1

Графики рис. 3 и 4, четко показывают ОК с сильным изменением тангенса, но расчетные значения тангенса существенно отличаются от действительных значений. Также легко определяется относительное состояние изоляции объектов контроля, но определить, насколько велики действительные значения тангенса (что необходимо для выявления значений превышающих нормированные) и как быстро они нарастают, сложно. Распознать при таких погрешностях объект с малым нарастанием тангенса (начальные стадии развития дефектов) трудно-выполнимая задача.

Следует отметить, что при использовании методики 3 отличие расчетных значений тангенса от действительных больше, чем для методики 2. Методика 1 обладает легче прогнозируемой погрешностью (определяется состоянием эталонного ОК). Учитывая, что в качестве эталонного выбирается объект в лучшем состоянии, погрешность методики 1 будет меньше чем у методик 2 и 3.

Сложности оценки действительных значений тангенса и тенденций их изменения по методикам 2 и 3 обусловлены зависимостью погрешности  $D_{j(k)}$  не только от количества контролируемых ОК, но и от

суммарного прироста изменившихся действительных тангенсов (см. выражения в табл. 1), значение которого неизвестно заранее. Реальные ситуации усложняются неравномерностью нарастания потерь, температурной зависимостью измеряемых параметров изоляции (разной даже для однотипных реальных ОК), невозможностью полностью отсеять внешние случайные и не случайные влияния.

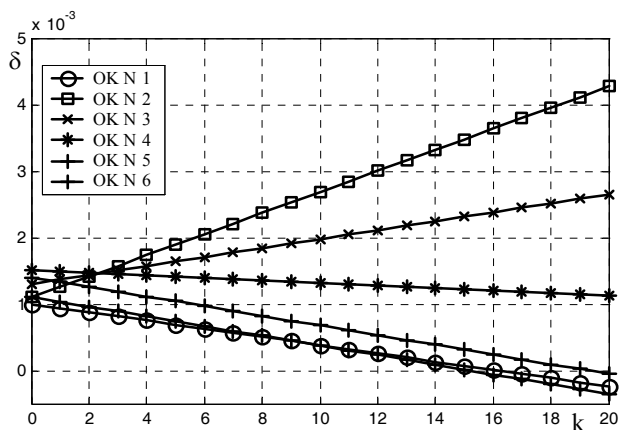


Рис. 3. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК, определенных по методике 2

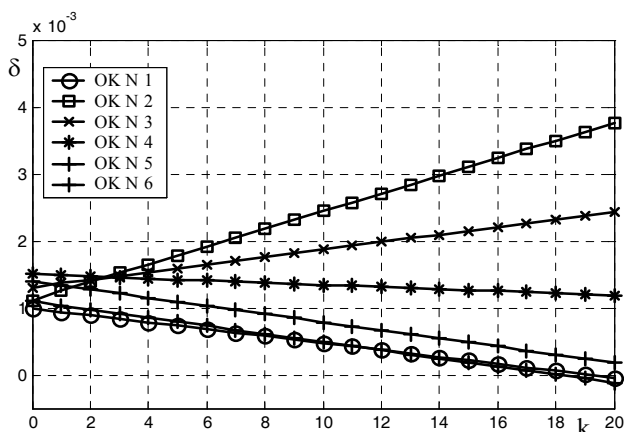


Рис. 4. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК, определенных по методике 3

Полученные выражения  $D_{j(k)}$  позволяют оценить погрешность (заниженное значение реальной методической погрешности) после получения результата о увеличении расчетных тангенсов у ОК ( $\delta p_{j(k)}$ ), предположив, что прирост действительных тангенсов соответствует приросту расчетных ( $\delta_{j(k)} - \delta_{j(0)} = \delta p_{j(k)} - \delta_{j(0)}$ ). Также выражения позволяют оценивать ожидаемую погрешность определения расчетных тангенсов в системах контроля, делая предположения об увеличении действительных тангенсов у нескольких ОК.

В итоге можно констатировать, что методики обработки без выделения отдельного эталона (методики 2 и 3) не дают преимуществ в точности определения результата, но требуют проведения существенно большего количества измерений ( $N^2$  против  $N$  у методики 1).

**Совершенствование методик.** Уменьшения погрешностей методик без выделения отдельного эталона можно достичь, изменив порядок расчета следующим образом. Усреднение результатов измерений,

проводимое в формулах (7), (9) или (11) при определении расчетного тангенса, должно осуществляться не по всем ОК, а по выделенной меньшей группе объектов объемом  $Nm$ . Состав этой «опорной» группы определяется на предыдущем ( $k-1$ ) временном шаге измерений, путем выбора ОК с наименьшими приростами расчетного тангенса относительно начальных значений:  $(\delta p_{j(k-1)} - \delta_{j(0)})$ . При таком подборе из усреднения исключаются объекты несущие потенциальную опасность большого искажения расчетных результатов, что уменьшает ожидаемую погрешность (суммарный прирост тангенсов «опорной» группы меньше общего прироста). Таким образом, например, формулы (7), (9) при измененной методике будут записаны:

$$\begin{aligned} \delta p_{i(k)} &= -\frac{1}{Nm-1} \sum_{j \neq i}^{Nm} \Delta \delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \\ &= \frac{1}{Nm-1} \sum_{j \neq i}^{Nm} (-\partial \delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}), \end{aligned} \quad (13)$$

если  $i$ -й ОК входит в выделенную группу, если нет – то в (13) вместо  $Nm-1$  следует писать  $Nm$ .

Учитывая малую вероятность одновременного значительного ухудшения состояния у многих ОК, «опорная» группа может содержать всего на несколько объектов меньше общего количества ОК. Чем больше ОК входит в группу, тем реже может изменяться ее состав.

Для существенного уменьшения количества проводимых измерений на каждом временном шаге (от  $\approx N^2$  до  $\approx N$ ), можно определять тангенс дифференциального угла двух ОК в (7), (9), (11), (13) не прямым измерением, а расчетным путем, используя измерения тангенса с выделением отдельного эталонного объекта:

$$\partial \delta_{ij(k)} = \partial \delta_{lj(k)} - \partial \delta_{li(k)},$$

где  $l$  – индекс выделенного эталонного объекта.

При таком определении  $\partial \delta_{ij(k)}$  теряется возможность дополнительной проверки результата путем сравнения результатов «прямых» и «обратных» измерений ( $\partial \delta_{ij(k)} \approx -\partial \delta_{ji(k)}$ ), предлагаемой в [2, 7]. Отметим, что указанную проверку при необходимости можно, без потери эффективности отклонения неудачных результатов, заменить контролем отклонений при статистической обработке результатов повторяющихся измерений с выделенным эталоном.

На рис. 5 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных по формуле (13), усовершенствованной методики для модельной ситуации описанной ранее. При расчете выбиралась «опорная» группа из 4 ОК (66 % общего количества ОК) обладающих наименьшим приростом на текущем временном шаге, тем самым было исключено искажающее влияние 2 и 3 ОК на результаты оценки (изменения на ОК 1 и 4 продолжают влиять, обуславливая погрешность). Видно, что расчетные тангенсы лучше воспроизводят значения и тенденции изменения действительных тангенсов, чем в методиках 2 и 3. В отличие от методики 1 контролируются все ОК, включая эталон.

Погрешность методик без выделения эталона меньше при большем количестве контролируемых ОК и при меньшем суммарном изменении тангенсов (меньший рост значений действительных тангенсов, меньшее количество ОК с ухудшением состояния).

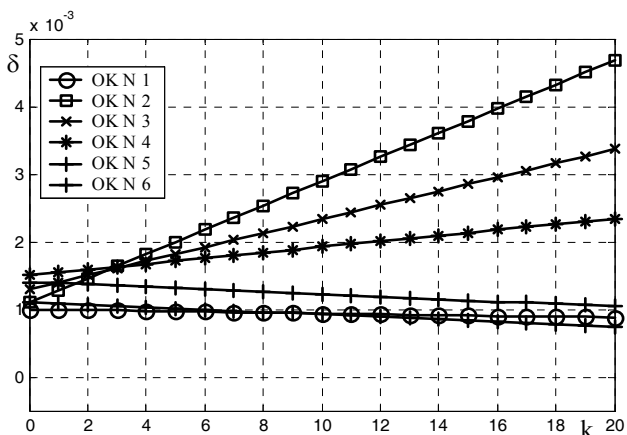


Рис. 5. Изменения расчетных значений тангенсов потерь ОК, определенных по усовершенствованной методике

**Выводы.** Отличительной особенностью методик без выделения эталона является влияние изменения тангенса потерь одного из ОК на результаты оценки тангенсов других ОК, что приводит к сложно прогнозируемым методическим погрешностям, которые затрудняют оценку действительного значения тангенса и могут вызывать ошибки при оценке состояния объектов контроля.

Появления хотя бы одного ОК с сильно ухудшающимися действительными параметрами приводит к снижению расчетных тангенсов потерь всех ОК, что маскирует появление других неблагоприятных ОК, с меньшими отклонениями, и делает затруднительным выявление таких отклонений для определения развивающегося дефекта изоляции на ранних стадиях.

Предложенное усовершенствование методик определения расчетных значений тангенса, с усреднением по выделенной «опорной» группе ОК, позволяет уменьшить негативное влияние объектов с ухудшающимися характеристиками на оценку тангенсов других ОК и снизить погрешность, сохраняя при этом возможность одновременного контроля всех ОК.

Использование расчетного способа определения тангенсов дифференциального угла двух ОК по результатам измерений с использованием выделенного эталона позволяет существенно снизить количество необходимых измерений (до значения необходимого при традиционной методике с выделением эталона).

В заключение отметим, что сделанные выводы справедливы как для ситуаций контроля основной изоляции трансформаторов тока, так и для случаев контроля изоляции высоковольтных вводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В.К., Боршев П.И., Ободовский В.Д., Канивецкий Ю.В., Бехтев Г.В., Богданов С.Г., Масенко Д.А., Двойных В.П. Приборное обеспечение и опыт контроля изоля-

ции конденсаторного типа под рабочим напряжением // Электрические сети и системы. – 2012. – №4. – С. 68-72.

2. Сахно А.А. Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330-750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением // Электротехніка і електромеханіка. – 2010. – №2. – С. 54-56. doi: 10.20998/2074-272X.2010.2.14.

3. СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301:2006. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330-750 кВ під напругою. Методичні вказівки. – К.: Мінпаливенерго, 2006.

4. Стогний Б.С., Пилипенко Ю.В., Сопель М.Ф., Тутик В.Л. Аппаратно-программный комплекс непрерывного диагностирования основной изоляции трансформаторов тока и высоковольтных вводов силовых трансформаторов // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 26. – С. 38-45.

5. Шинкаренко Г.В., Онищенко В.А., Орнатский О.А. Технологии измерения параметров изоляции маслонаполненных трансформаторов тока 330-750 кВ под рабочим напряжением. // Электрические сети и системы. – 2012. – №3. – С. 67-71.

6. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

7. Беляев В.К., Паненко Е.Н. Особенности методов определения параметров изоляции в системах контроля трансформаторов тока под рабочим напряжением // Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. – 2014. – №153. – С. 122-124

8. Беляев В.К., Ободовский В.Д., Паненко Е.Н. Анализ чувствительности диагностических моделей для контроля состояния обмоток трансформатора под нагрузкой // Технічна електродинаміка. – 2013. – №4. – С. 81-87.

#### REFERENCES

1. Beliaev V.K., Borshchev P.I., Obodovskii V.D., Kanivetskii Iu.V., Bekhtev G.V., Bogdanov S.G., Masenko D.A., Dvoynikh V.P. Instrumentation and experience of monitoring of capacitor type insulation under operating voltage. *Electrical networks and systems*, 2012, no.4, pp. 68-72. (Rus).

2. Sakhno A.A. Measurement algorithm of the dielectric loss tangent of basic insulation of current transformers and bushings 330-750 kV under monitoring under a working voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.2, pp. 54-56. (Rus.) doi: 10.20998/2074-272X.2010.2.14.

3. SOU-N MPE 40.1.46.301:2006. *Perevirka izoliatsii transformatoriv strumu 330-750 kV pid napruhoiu. Metodichni vказivky* [Standard of organization H MPE 40.1.46.301:2006. Check of insulation of current transformer 330-750 kV under voltage. Methodical instructions]. Kyiv, Minpalyvenерho Publ., 2006. (Ukr).

4. Stognii B.S., Pilipenko Iu.V., Sopol' M.F., Tutik V.L. Hardware-software monitoring complex of insulation of current transformers and high-voltage bushings of power transformers. *Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, is.26, pp. 38-45. (Rus).

5. Shinkarenko G.V., Onishchenko V.A., Ornatkii O.A. Technologies of measurement of insulation parameters of oil-filled transformers 330-750 kV under operating voltage. *Electrical networks and systems*, 2012, no.3, pp. 67-71. (Rus.)

6. Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniia vysokogo napriazheniia* [Methods and diagnostic tools of the equipment of a high voltage]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p. (Rus).

7. Beliaev V.K., Panenko H.N. Features of definition methods of insulation parameters in the monitoring systems of current transformers under working voltage. *Bulletin of Kharkiv Petro*

Vasylenko National Technical University of Agriculture. Series: Technical science, 2014, no.153, pp. 122-124 (Rus).

8. Beliaev V.K., Obodovskii V.D., Panenko H.N. The analysis of sensitivity of diagnostic models for the monitoring of a transformer windings condition under load. *Tekhnichna elektrody-namika*, 2013, no.4, pp. 81-87. (Rus).

Поступила (received) 11.06.2016

Беляев Виталий Константинович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Паненко Елена Николаевна<sup>2</sup>, ассистент,

<sup>1</sup> Научно-производственное предприятие «ОСТ»,  
01054, Киев, ул. Бульварно-Кудрявская, 33-Д,

<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»,  
03056, Киев, пр. Победы, 37,  
e-mail: bel\_vk@ua.fm

V.K. Beliaev<sup>1</sup>, H.N. Panenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific Industrial Enterprise «OST»,  
33-D, Bulvarno-Kudryavskaya Str., Kyiv, 01054, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic  
Institute»,  
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

**Determination of insulation parameters of current  
transformers at multiple measurements in monitoring  
systems under working voltage.**

*Features of the data processing procedures of multiple meas-  
urements of the dielectric loss tangent of the high-voltage insu-  
lation, which are based on the comparison method, were*

*considered. Three procedures were compared: the one proce-  
dure uses an assignment of a particular standard object for  
comparison, and two procedures don't use assignments of the  
special standard objects. Expressions of methodical errors of  
studied procedures were obtained. Analysis and calculations,  
which use the obtained expressions were made. Evaluations  
showed that an influence of a change of the tangent of dielectric  
loss of one from the monitoring objects on results of estimation  
of the tangents of other monitoring objects is the distinctive  
feature of the procedures without assignment of the standard  
object. Errors of these procedures more than errors of the tradi-  
tional procedure, with assignment of the standard object. The  
study demonstrated that procedures without assignment of stan-  
dard objects lead to difficultly predictable methodological er-  
rors, which hinder to estimate the actual value of the loss tan-  
gent and to estimate outcomes of the monitoring, by means com-  
paring with allowable values. Moreover, the decrease of estima-  
tions of loss tangents of all objects, as a result of occurrence of  
at least one the object with strongly bad parameters, hides oc-  
currence of other unsuccessful objects with smaller deviations  
and makes difficult recognition of such deviations at early  
stages. Improvements in processing techniques which reduce  
earlier specified errors and reduce the amount of measurements  
are proposed. The study results are useful in monitoring and  
diagnostic of basic insulation of current transformers or high-  
voltage bushings. References 8, tables 1, figures 5.*

**Key words: high voltage insulation, diagnostics, data process-  
ing procedure, processing procedure error, dielectric loss  
tangent, current transformer.**



О.В. Голик

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ОГРАНИЧЕНИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

*Розглянуті питання статистичного контролю у процесі виробництва масової кабельно-провідникової продукції на прикладі емальпроводів. Отримані результати безпосереднього контролю діаметра емальдроту з поліімідною ізоляцією у неперервному технологічному циклі. Представлена контрольна карта максимальної ймовірності виходу діаметру за межі визначеного діапазону. Бібл. 5, рис. 1.*

*Ключові слова:* емальдріт, подвійна поліімідна ізоляція, контрольна карта, максимальна ймовірність виходу параметра за нормативну межу.

*Рассмотрены вопросы статистического контроля в процессе производства массовой кабельно-проводниковой продукции на примере эмальпроводов. Получены результаты непосредственного контроля диаметра эмальпровода с полиимидной двухслойной изоляцией в непрерывном технологическом цикле. Представлена контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за пределы определенного диапазона. Библ. 5, рис. 1.*

*Ключевые слова:* эмальпровод, двойная полиимидная изоляция, контрольная карта, максимальная вероятность выхода параметра за нормативный предел.

**Введение.** В процессе контроля качества изоляции эмальпровода удобным является использование так называемой контрольной карты. Контрольная карта — это специальный бланк, на который выносят статистические показатели для измеряемого признака в хронологической последовательности изготовления [1]. На бланке нанесены контрольные границы, которые ограничивают область допустимых значений статистических показателей. Если в процессе контроля результаты выходят за нормативную границу, то это воспринимается, как информация об отклонении технологического процесса от нормы. Главным при использовании контрольных карт является то, какой способ используется для определения контрольных границ.

На производстве чаще всего применяют следующие виды карт: карту средних арифметических, карту среднеквадратичного отклонения, карту числа дефектов на единицу продукции. Наиболее эффективным является использование подобных контрольных карт в комплексе: от этапа входного контроля до выходного. При этом необходимо выбирать такой вид и параметры карты, которые были бы информативными на всех этапах контроля. Например, применение для построения карт математического аппарата интервальных статистических моделей.

**Анализ публикаций.** В [2] вопросы о теоретическом обосновании применения методов интервальных статистических моделей к нижним значениям интервального среднего решено, по сути, одной фразой: «все брать с минусом». Для решения прикладных математических задач технологического контроля этого недостаточно, так как при двухсторонних ограничениях нижние и верхние значения отклонения контролируемого параметра могут появиться в любой последовательности.

Для всех ограниченных признаков  $f$ , принадлежащих классу  $\mathfrak{T}_{00} : \mathfrak{T}_{00} = \{f : \sup|f(x)| < \infty\}$  существуют интервальные средние  $\underline{M}f ; \overline{M}f$ . Аксиомы интер-

вальных моделей средних, принятые в [2] как основные, однозначно связывают нижнее и верхнее среднее путем перемены знака контролируемого признака. Для всех ограниченных сверху признаков:

$$\mathfrak{T}_0 = \{f : \sup f(x) < \infty\}; \overline{M}f < \infty.$$

Согласно аксиоме обращения [2] для всех ограниченных снизу признаков:  $\underline{M}(-f) = -\overline{M}f$ , откуда  $\underline{M}(-f)$  определено на  $-\mathfrak{T}_0$ .

То есть перемена знака у признаков класса  $\mathfrak{T}_0$  приводит к классу  $\mathfrak{T}_0$ , на котором существуют нижние средние  $\underline{M}f$ , а на их пересечении существуют те и другие, то есть интервальные средние.

Такое однозначное связывание нижнего и верхнего среднего путем перемены знака может в принципе противоречить физическому смыслу некоторых параметров в реальных задачах контроля. Однако оно может быть удобным для математического описания и одновременно быть физически адекватным, если в конкретной задаче использовать *центрированный* набор признаков.

**Цель статьи** – исследование максимальной чувствительности контроля при двухстороннем ограничении контролируемого параметра в процессе производства силовых кабелей и проводов.

**Результаты исследований.** Использование центрированного набора признаков становится принципиальным для реальной задачи контроля, в которой измеряемая величина является только положительной, а технологическое ограничение двустороннее.

Функция  $g(x)$ , мажорирующая набор первичных признаков  $f(x)$ , принадлежит полулинейной оболочке с неотрицательными коэффициентами  $c_i^+$  и произвольным свободным членом  $c$ :  $g(x) = c + \sum c_i^+ g_i(x)$ ;  $g(x) \geq f(x)$ . Центрирование мажорирующей функции  $g(x)$  позволяет найти наилучшую аппроксимацию первичной функции  $f(x)$  [2]:

$$g_i^{\circ}(x) = g_i(x) - \bar{M}g_i; \bar{M}g_i^{\circ} = 0;$$

$$\bar{M} = \inf \left\{ c + c_i^+ g_i(x) : c + c_i^+ g_i(x) \geq f(x) - \sum c_i^+ g_i(x) \right\} = (1)$$

$$= \inf \sup \left[ f(x) - \sum c_i^+ g_i^{\circ}(x) \right].$$

Кроме того, центрирование мажорирующей функции  $g(x)$  позволяет использовать в реальном контроле отклонение измеряемого параметра от его первичного среднего, то есть вместо  $x$  использовать  $\Delta x$ , что позволяет снять указанное противоречие между рассматриваемой положительной случайной величиной измеряемой характеристики при контроле с двусторонним ограничением, с одной стороны, и аксиомой обращения [2] для всех ограниченных снизу признаков, с другой:  $\underline{M}(-f) = -\bar{M}(f)$  откуда  $\underline{M}(-f)$  определено только на  $-\bar{\mathfrak{T}}_0$ .

Например, для контроля первичного признака тангенса угла диэлектрических потерь в [3] в качестве контролируемого признака использовано отклонение измеряемого параметра  $Y$  от его первичного среднего  $M^*[Y]$  и использовать мажорирующую функцию в виде параболы с тремя параметрами:

$$g(Y - M[Y]) = C + C_{2(+)}((Y - M[Y]) - C_1)^2, \quad (2)$$

которая мажорирует индикаторный признак (относительное количество значений первичного признака, которые попали в заданный интервал)  $\alpha_1 \dots \alpha_2$ , и если верхнее ограничение  $\alpha_2$  не имеет технического смысла, как в задаче о контроле тангенса угла диэлектрических потерь, то:

$$A\{\alpha_1 \leq (Y - M[Y]) \leq \alpha_2\} \leq C + C_{2(+)} \quad (3)$$

$$\alpha_1 - C_1)^2 \geq 1.$$

То, что  $M(Y - M^*[Y]) = 0$ , для минимально мажорирующей функции  $\inf \left\{ C + C_{2(+)}^2 (\alpha_1 - C_1)^2 \right\} = 1$

определяет параметры параболы:

$$C = 0, C_1 = -M_{\max}((Y - M[Y])/ \alpha_1), \quad (4)$$

$$C_{2(+)} = (\alpha_1 - C_1)^{-2}.$$

Соотношения (3), (4) позволили использовать оценку относительного максимального количества значений первичного признака, которые превысили верхнюю допустимую границу  $\alpha_1$  для организации контроля при технологическом ограничении сверху [3]:

$$A_{\max}\{\Delta Y \geq \alpha_1\} = (1 + \alpha_1^2 / M_{\max}[(\Delta Y)^2])^{-1}, \quad (5)$$

где индикаторный признак  $A_{\max}$  – это относительное максимальное среднее количество значений первичного признака, превысивших  $\alpha_1$ , то есть максимальная вероятность выхода контролируемого параметра  $\Delta Y$  за верхнюю границу  $\alpha_1$ :  $P_{\max}\{\Delta Y \geq \alpha_1\}$ .

Для двустороннего ограничения в соответствии с аксиомой обращения [2] интервальных моделей средних, нижнее и верхнее среднее связывают путем перемены знака контролируемого признака. Например, при контроле диаметра эмалипровода  $D$  максимальная вероятность  $P_{\max}$  выхода контролируемого параметра

за границы диапазона  $\bar{E} \dots \underline{E}$  определена как сумма соответствующих вероятностей выхода параметра за односторонние границы. Причем, вероятность выхода контролируемого параметра  $\Delta D$  за нижнюю границу взята с минусом:

$$P_{\max i} = \overline{P_{\max i}} - \underline{P_{\max i}}; \quad (6)$$

$$\overline{P_{\max i}} = \frac{[\sup(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2}{[\sup(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2 + (\bar{E} - \frac{1}{2} \sum_{i=2-1}^{i,2} D)^2}; \quad (7)$$

$$\underline{P_{\max i}} = \frac{[\inf(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2}{[\inf(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2 + (\underline{E} - \frac{1}{2} \sum_{i=2-1}^{i,2} D)^2}. \quad (8)$$

где  $D$  – диаметр провода;  $\bar{E}$  – верхняя технологическая граница диаметра;  $\underline{E}$  – нижняя технологическая граница диаметра;  $\Delta D_{i,2}$  – разность между текущим диаметром в выборке №  $i$  и средним значением диаметра, определенном в течение технологического цикла:  $\Delta D_{i,2} = D_{i,2} - \frac{1}{i * 2} \sum_1^{i,2} D$ .

На рис. 1 приведены результаты непосредственного контроля диаметра эмалипровода с полиимидной изоляцией в непрерывном технологическом цикле и представлена контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за границы диапазона, определенная в соответствии с (6) – (8).

Сопоставление рис. 1,а и рис. 1,б свидетельствует об информативности технологического контроля максимальной вероятности  $P_{\max}$  выхода параметра за границы заданного двустороннего диапазона:

1) контрольная карта отражает период технологической стабильности, в течение которого  $P_{\max}$  не превышает по абсолютной величине уровень 0,25 (пунктир), который аналитически из (9) отражает возрастание чувствительности контроля при увеличении отклонения от среднего;

2) контрольная карта отражает стабильную тенденцию уменьшения значений контрольного параметра, которая позволила предупредить выход  $P_{\max}$  за уровень 0,25, что позволило определить причину тенденции уменьшения  $D$  – возрастание вытяжки проводника в течение технологического цикла

При этом использовано аналитическое исследование производных функции (4) для оценки границ регулирования на контрольной карте  $P_{\max}$  при одностороннем ограничении [3]. Контроль по  $P_{\max}$  при двустороннем ограничении поставил вопрос о необходимости исследования чувствительности контрольной карты  $P_{\max}$  в области отклонений централизованного параметра, близких к нулю. В этой области наличие стабильной тенденции в изменении контролируемого параметра может снижать чувствительность карты к нестабильности технологического процесса.

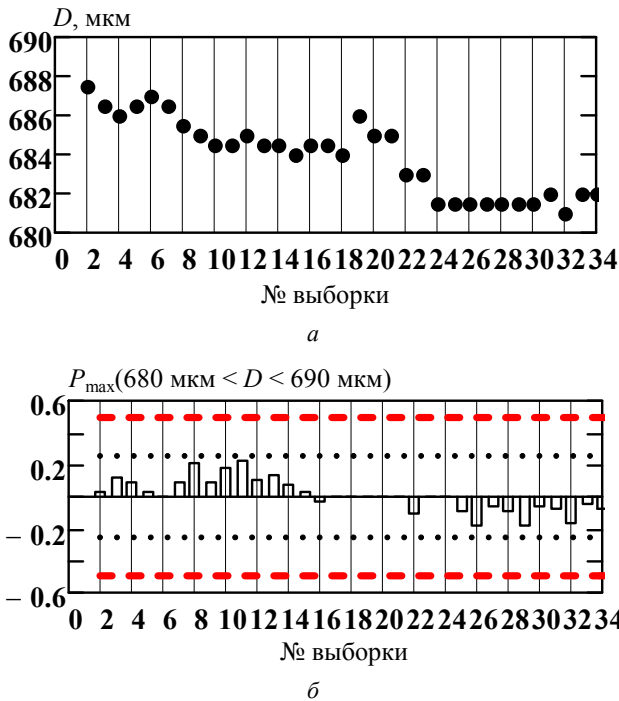


Рис. 1. Контроль диаметра  $D$  эмальпровода в непрерывном технологическом цикле по максимальной вероятности  $P_{\max}$  выхода параметра за границы заданного двустороннего диапазона: а – результаты измерений  $D$ ; б – контрольная карта вероятности выхода параметра за границы диапазона (680 ... 690) мкм

Поскольку значение  $[(AD_{i,2}AD_{i,2-1})]^2$  является квадратом наибольшего текущего изменения диаметра, эта величина в общем случае есть максимальная оценка дисперсии контролируемого параметра в текущей выборке  $\underline{S}^2$ . Соответственно, изменение знака на противоположный для вероятности выхода за нижнюю границу диапазона, значение  $\inf[(AD_{i,2}AD_{i,2-1})]$  является квадратом наибольшего текущего изменения диаметра в сторону нижней границы заданного диапазона. То есть эта величина является максимальной оценкой дисперсии контролируемого параметра в текущей выборке при его изменении в сторону нижней границы  $\underline{S}^2$ . Обозначим текущие отклонения среднего значения параметра в выборке от верхней и нижней границ как  $\underline{\alpha} \dots \bar{\alpha}$ .

Тогда можно представить (2) как функцию четырех переменных:

$$\bar{\alpha} = \bar{E} - \frac{1}{2} \sum_{i=2}^{i:2} D; \underline{\alpha} = \underline{E} - \sum_{i=2-1}^{i:2} D, \quad (9)$$

$$P_{\max} = \frac{\bar{S}^2}{\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2} - \frac{\underline{S}^2}{\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2}. \quad (10)$$

Чувствительность  $P_{\max}$  к изменению значений контролируемого параметра является полным дифференциалом (10). В случае взаимной независимости переменных, следующее выражение позволяет теоретически анализировать чувствительность  $P_{\max}$  для двустороннего ограничения:

$$dPM = \frac{\partial P_{\max}}{\partial \bar{S}} + \frac{\partial P_{\max}}{\partial \bar{\alpha}} - \frac{\partial P_{\max}}{\partial \underline{S}} - \frac{\partial P_{\max}}{\partial \underline{\alpha}} = \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha}^2 d\bar{S}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2} - \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha} d\bar{\alpha}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2} - \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha}^2 d\underline{S}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2} + \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha} d\underline{\alpha}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2}. \quad (11)$$

Отдельно для верхнего и нижнего ограничений:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{S}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{\alpha}} = \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha}^2 d\bar{S}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2} - \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha} d\bar{\alpha}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{S}} + \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\alpha}} = \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha}^2 d\underline{S}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2} + \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha} d\underline{\alpha}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2}. \quad (13)$$

### Выводы.

Максимальная чувствительность контрольной карты  $P_{\max}$  имеет место при вполне определенных соотношениях переменных в пределах установленных границ. За пределами этих границ контроль по  $P_{\max}$  не эффективен. Поэтому в конкретных задачах текущего контроля кабельно-проводниковой продукции использование технических допусков для контролируемого параметра нецелесообразно. Контроль по  $P_{\max}$  должен быть направлен на исключение изготовления продукции (например, эмальпроводов), параметры которой выходят за пределы технических допусков.

Следовательно, для достижения максимальной чувствительности контроля технологические границы, во-первых, должны быть выбраны исходя из достигнутого уровня среднего значения параметра и его статистического рассеяния.

Во-вторых, технологические границы необходимо изменять в соответствии с достигнутым уровнем среднего значения параметра и его статистического рассеяния. Такое изменение может служить количественным показателем тенденции повышения либо снижения надежности данной технологической системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щебенюк Л.А., Голик О.В. Математичні основи надійності ізоляції електрообладнання: Навч.-метод. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 102 с.
2. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Радио и связь. 1991. – 352 с.
3. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Контрольна карта – інструмент якості кабельної продукції // Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ, 2000. – С. 270-289.
4. Щебенюк Л.А., Голик О.В. Методика построения контрольной карты вероятности выхода признака за нормативный предел // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – №127. – С. 35-38.
5. Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двухслойной полиимидной изоляции эмальпровода в процессе производства: дисс. ... канд. техн. наук. – Харьков, 2009. – 168 с.

### REFERENCES

1. Shchebeniuk L.A., Golik O.V. *Matematychni osnovy nadiynosti izolyatsiyi elektroobladnannya* [Mathematical

- foundations of the reliability of electrical insulation]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2003. 102 p. (Ukr).
2. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1991. 352 p. (Rus).
  3. Karpushenko V.P., Shchebeniuk L.A., Antonets Y.O., Naumenko O.A. Control card – instrument of quality of cable products. *Power cables of low and medium voltage. Design, technology, quality*. Kharkiv, Region-Inform Publ., 2000. pp. 270-289. (Ukr).
  4. Shchebeniuk L.A., Golik O.V. A method of constructing control charts the probability of an exit sign beyond the regulatory limit. *Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University*, 2000, no.127, pp. 35-38. (Rus).
  5. Golik O.V. *Metod operativnogo kontroliia parametrov dvukhsloinoi poliimidnoi izoliatsii emal'provoda v protsesse proizvodstva*. Diss. cand. techn. nauk [Method of controlling parameters of a two-layer polyimide insulation enameled wire in the production process. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkov, 2009, 168 p. (Rus).

Поступила (received) 29.04.2016

Голік Оксана Вячеславовна, к.т.н., доц.,  
 Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»,  
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
 тел/phone +380 57 7076010, e-mail: unona928@gmail.com

*O.V. Golik*  
 National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Statistical procedures for two-sided limit of a controlled parameter in the process of production of cable and wire products.**

**Purpose.** To consider issues of statistical control in the process of mass production of cable and wire products on the example of

enameled wire. To analyze the results of direct control of the diameter of the wire in two-layer polyimide insulation in a continuous technological cycle. To submit to the control map of maximum probability of the exit diameter outside a specific range. To analyze the conditions under which maximum sensitivity of process control. **Methodology.** Study of the sensitivity of the control map of maximum probability of the exit option for regulatory of limit in the field deviations of the centered parameter close to zero. The existence of stable trends in the change of a controlled parameter can reduce the sensitivity of punishment to instability of the process. **Results.** To achieve maximum sensitivity of control of the technological frontier should be selected on the basis of the achieved level of the average value of the parameter and its statistical scattering. Process boundaries must be changed in accordance with the achieved level of the average value of the parameter and its statistical scattering. Such a change may serve as a quantitative indicator of trends in the increase or decrease in the reliability of the technological system. **Originality.** In particular the tasks of current control using engineering tolerances for controlled parameter are impractical. Control on  $P_{max}$  should be directed to the exception of manufacturing, the parameters of which extend beyond the technical tolerances. **Practical value.** The exception is the manufacture of bulk cable products, the parameters of which extend beyond the technical tolerances. References 5, figures 1.

**Key words:** enameled wire, double polyimide insulation, control card, maximum probability of the parameter exit for the regulatory limit.

В.В. Рудаков, А.А. Коробко

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СВЧ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В НЕПОЛЯРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ НА ОСНОВЕ СТУПЕНЧАТОГО НЕОДНОРОДНОГО КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

*Розглядається високочутливий вимірювач вмісту вологи в неполярних рідких діелектриках. Аргументовано шляхи підвищення чутливості класичного дієлькометричного методу. Приводиться опис розробленої конструкції вимірювача вологості на основі ступеневого неоднорідного коаксіального резонатора. Розглянуто результати аналізу резонансних характеристик вимірювального перетворювача, а також визначені величини об'ємного вмісту вологи сумішньої трансформаторне масло – вода в діапазоні вмісту вологи  $(10 - 10^4)$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Бібл. 6, табл. 1, рис. 8.*

*Ключові слова:* вимірювач вмісту вологи, рідкі неполярні діелектрики, вимірювальний перетворювач, ступінчастий коаксіальний неоднорідний резонатор, вимірювальний генератор, резонансні характеристики, об'ємний вологовміст, трансформаторна олія, вода.

*Рассматривается высокочувствительный измеритель влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках. Аргументированы пути повышения чувствительности классического диэлькометрического метода. Приводится описание разработанной конструкции измерителя влажности на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора. Рассмотрены результаты анализа резонансных характеристик измерительного преобразователя, а также определены величины объемного влагосодержания смесей трансформаторное масло – вода в диапазоне влагосодержания  $(10 - 10^4)$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Библ. 6, табл. 1, рис. 8.*

*Ключевые слова:* измеритель влагосодержания, жидкие неполярные диэлектрики, измерительный преобразователь ступенчатый коаксиальный неоднородный резонатор, измерительный генератор, резонансные характеристики, объемное влагосодержание, трансформаторное масло, вода.

**Введение.** Измерение влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках актуально для многих практических применений, в частности: в электротехнике, химической, пищевой промышленности, в военной и авиационной технике. Так, для электротехники важным является определение влагосодержания трансформаторного масла, для химической и пищевой промышленности – определение влагосодержания в различных минеральных маслах, для военной и авиационной техники – определение влагосодержания в дизельном, авиационном топливе. В большинстве указанных областей исследуемые жидкости (трансформаторное и подсолнечное масла, дизельное и авиационное топлива и т.д.) являются неполярными жидкими диэлектриками.

Следует отметить, что нижний предел измерения влагосодержания во всех этих применениях является очень малым: минимальная измеряемая величина объемного влагосодержания составляет не более  $10^{-3}$  %, что создает определенные трудности для проведения этих измерений традиционными известными методами. Традиционные методы, например, метод Карла-Фишера и жидкостно-хроматографический метод требуют специального оборудования, достаточно дорогих расходных материалов и довольно длительного времени.

**Целью работы** является создание измерителя влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках с нижним пределом объемного влагосодержания не более  $10^{-3}$  %, позволяющего оперативно проводить измерения с минимальными материальными и временными затратами.

**Обоснование путей решения поставленной задачи.** Для решения поставленной задачи был выбран диэлькометрический метод измерения влагосодержания, основанный на зависимости влагосодержания от диэлектрической проницаемости исследуемых обвод-

ненных неполярных жидких диэлектриков [1]. При этом измеряемая диэлектрическая проницаемость, которая пропорциональна влагосодержанию, характеризует саму величину влагосодержания.

В развитии этого метода в работе [2] была предложена упрощенная модель эмульсии типа «вода – неполярный диэлектрик», которая позволила достаточно просто определить величину объемного влагосодержания смеси  $W$  как функцию диэлектрических проницаемостей смеси  $\epsilon_2$  и обезвоженной неполярной жидкости  $\epsilon_1$  в следующем виде:

$$W = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{3 \cdot \epsilon_1} \quad (1)$$

В работе [3] было предложено использование резонансного способа определения диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , реализованного для измерительного преобразователя (ИП) емкостного типа, заполняемого поочередно обезвоженной жидкостью и исследуемой смесью (эмульсией). При этом ИП емкостного типа подключался к измерительному генератору (ИГ), содержащему усиленную схему с обратной связью и катушку индуктивности [3]. Известные значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  выражались через четыре значения частоты генерации ИГ (частота ИГ с отключенным ИП, частота ИГ с ИП, заполненным воздухом, частота ИГ с ИП, заполненным исследуемой обезвоженной жидкостью и частота ИГ с ИП, заполненным исследуемой смесью) и значения конструктивных параметров ИП. Данный подход позволил в диапазоне частот ИГ от 100 кГц до 2 МГц практически решить задачу определения влагосодержания неполярных диэлектриков в диапазоне  $0,1 \% \leq W \leq 10 \%$ . Однако использование при данном подходе систем ИГ и ИП в виде сосредоточенных элементов (катушки индуктивности для ИГ и измерительный конденсатор

для ИП), которые обладали паразитными параметрами, не позволили в полной мере реализовать возможности резонансной диэлькометрии для измерения предельно малых уровней влагосодержания [3].

Выполненный анализ показывает, что основными направлениями повышения чувствительности предложенного в [3] резонансного способа диэлькометрии являются: повышение рабочей частоты измерений, минимизация паразитных емкостей индуктивного элемента ИГ и ИП, повышение стабильности частоты генерирования ИГ во всех четырех режимах, максимальное сокращение числа измеряемых частот.

Для реализации указанных направлений авторами был предложен ИП с распределенными параметрами в виде ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора (СНКР) [4]. При этом были исследованы резонансные спектры СНКР в диапазоне частот до 1,8 ГГц. В результате проведенных в [4] исследований были выявлены существенные преимущества ИП, выполненного в виде СНКР как по сравнению с ИП с сосредоточенными параметрами, так и по сравнению с известными ИП СВЧ диапазона в виде однородных четвертьволновых резонаторов.

Дальнейшее развитие теории применения СНКР в резонансной диэлькометрии неполярных жидких сред получило развитие в работе [5], в которой был проведен как математический анализ электромагнитных процессов в СНКР, так и их имитационное моделирование в среде Micro Cap. Результатом этих исследований являлась оптимизация СНКР для целей диэлькометрии и определение его метрологических характеристик. Исходя из вышеизложенного, была принята следующая методология построения измерителя.

1. Влагосодержание смеси определяется по разнице диэлектрических проницаемостей обезвоженной жидкости и смеси.

2. Для определения диэлектрических проницаемостей ИП в виде СНКР подключается к ИГ и поочередно заполняется обезвоженной жидкостью и смесью.

3. Рабочая частота ИГ выбирается максимально возможной с учетом частотной дисперсии диэлектрической проницаемости воды.

4. СНКР и ИГ обладают минимальными значениями паразитных параметров, что позволяет сократить число измерений частоты с четырех до двух и сократить время эксперимента в 2 раза.

5. С целью повышения стабильности частоты, генерируемой ИГ, измерительный преобразователь выполняется в виде системы с распределенными параметрами: СНКР, который обладает существенно большей добротностью, чем система «ИП – ИГ» с сосредоточенными параметрами.

**Описание измерителя.** Блок-схема измерителя приведена на рис.1. Используемый преобразователь ИП, выполненный в виде СНКР, подключен к ИГ. Частота генерации ИГ измеряется частотомером F, а температура ИП – электронным термометром T.

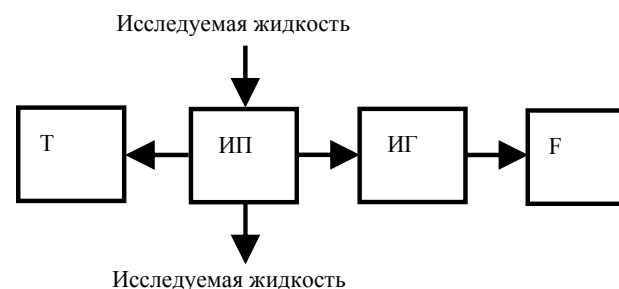


Рис. 1. Блок-схема измерителя

Принципиальная электрическая схема измерителя (ИП совместно с ИГ) приведена на рис. 2. На ней измерительный преобразователь ИП в виде СНКР образован двумя коаксиальными линиями Z1 и Z2 одинаковой длины с различными волновыми сопротивлениями  $Z_1 = 77,61 \text{ Ом}$ ,  $Z_2 = 4,09 \text{ Ом}$ . С помощью индуктивной петли связи A измерительный преобразователь подключен к ИГ на транзисторах Q1, Q2, которые собраны по схеме: «общая база» (по выходу ИГ) – «общий коллектор» (по входу ИГ).

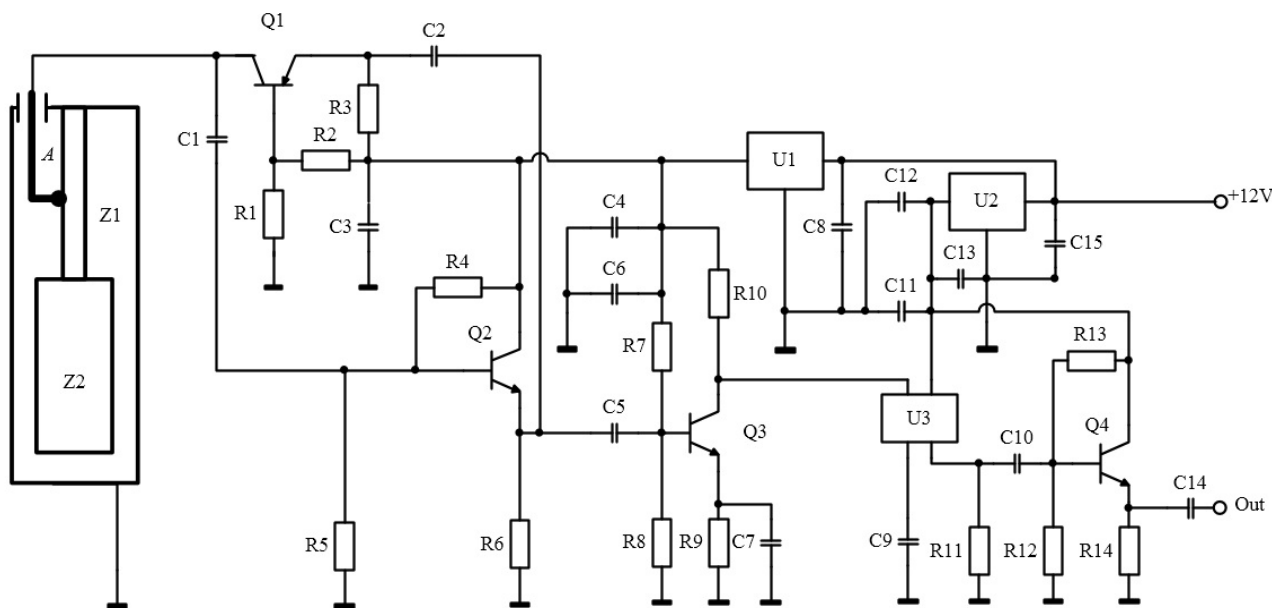


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема измерителя (ИП совместно с ИГ)



Данное схемотехническое решение ИГ выбрано для минимизации влияния паразитных параметров ИГ на параметры ИП (каскад с «общей базой» обладает максимальным выходным сопротивлением, а каскад с «общим коллектором» обладает максимальным входным сопротивлением). Сигнал с эмиттерного повторителя на транзисторе Q2 подается на вход (эмиттер) усилительного каскада на транзисторе Q1, выход которого подключен к ИП через индуктивную петлю связи A. Сигнал с выхода ИГ через «развязывающий» усилитель на транзисторе Q3 подается на вход цифрового делителя частоты U3, который включен по схеме делителя на 80. С выхода делителя частоты через «развязывающий» эмиттерный повторитель на транзисторе Q4 сигнал подается на частотомер. Для максимального обеспечения стабильности частоты ИГ его генерирующие каскады (Q1 – Q3) и цифровые каскады (U3, Q4) питаются от различных линейных стабилизаторов напряжения U1 (9 В) и U2 (5 В) соответственно.

Конструктивно ИП совместно с ИГ представляет собой разборную систему, в нижней части которой расположен ИП, а в верхней части – ИГ. В нижнюю часть ИП подводится исследуемая жидкость, которая после заполнения всего его объема попадает на слив. Общий вид и вид со снятой крышкой измерителя влагосодержания приведен на рис. 3. Таким конструктивным выполнением ИП и ИГ обеспечивается возможность работы ИП как в стационарном режиме, так и в режиме протока исследуемой жидкости. Кроме того, данное конструктивное исполнение обеспечивает минимизацию влияния паразитных параметров ИГ на частоту резонанса ИП (которая определяется геометрическими размерами линий Z1 и Z2 и величиной диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости) за счет следующих факторов:

1. Величины коэффициента связи эквивалентного колебательного контура, образованного линиями Z1 (индуктивный элемент) и Z2 (емкостной элемент) с ИГ, не превышающей значения 0,08. Поэтому, паразитные параметры ИГ, которые «привносятся» ИГ в этот контур, по величине не превосходят  $(0,08)^2 = 0,0064$ . В сочетании с высокими величинами импедансов входной (на Q2) и выходной (на Q1) части ИГ это обеспечивает высокую добротность колебательной системы и малое влияние ИГ на частоту генерации измерителя.

2. Место подключения индуктивной петли связи A, максимально приближено к точке колебательной системы, которая имеет нулевой потенциал. Данный факт обеспечивает минимальные искажения продольного электрического поля в СНКР.

3. Механическая фиксация центрального электрода линии Z1, обеспечивающей величину паразитной емкости ИП практически равную нулю, что также способствует повышению точности предложенного измерителя влагосодержания.

Описанный измеритель имеет следующие основные технические характеристики:

1. Частота генерации ИГ с ИП, заполненным воздухом, около 158 МГц.
2. Частота генерации ИГ с ИП, заполненным трансформаторным маслом, около 104 МГц.
3. Чувствительность измерителя – не хуже  $1 \text{ см}^3/\text{м}^3$ .

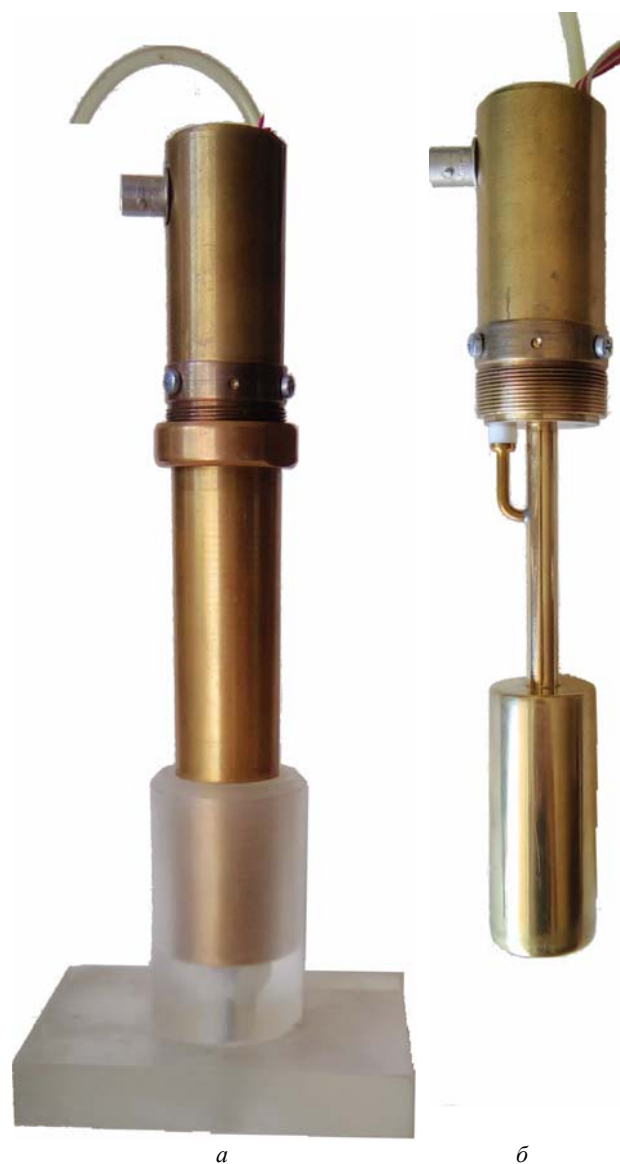


Рис. 3. Общий вид собранного измерителя влагосодержания (а) и вид со снятым наружным коаксиальным электродом (б)

**Результаты экспериментальных исследований.** Для подтверждения правильности выбранных конструктивных и технических решений ИГ и ИП были проведены экспериментальные исследования в два этапа.

На первом этапе с помощью измерителя амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) типа Х1 – 42 исследовались резонансные характеристики ИП, заполненного воздухом, и ИП заполненного обезвоженным трансформаторным маслом.

Блок-схема, по которой данный измеритель влажности исследовался для определения АЧХ, приведена на рис. 4.

На рис. 4. изображено: 1 – измеритель АЧХ Х1 – 42 (вверху – измерительная часть; внизу – генераторная часть); 2 – ИП; 3 – индуктивная петля связи; 4 – исследуемая среда; 5 – высокоомный (выносной) вход Х1 – 42; 6 – выход Х1 – 42 (50 Ом).

При этом для устранения реакции измерителя Х1 – 42 на АЧХ ИП выход Х1 – 42 был согласован резистором 50 Ом, а для повышения входного

импеданса последовательно со входом была включена цепочка  $100 \text{ кОм} - 0,5 \text{ пФ}$ .

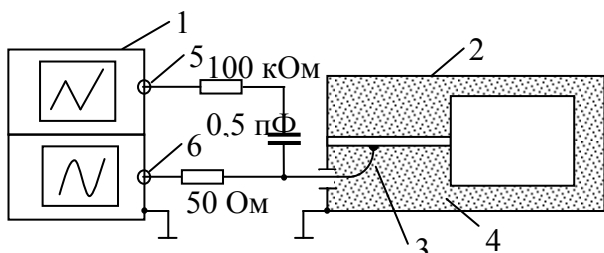


Рис. 4. Блок – схема измерений АЧХ ИП

Результаты исследований ИП в виде АЧХ ИП приведены на рис. 5-8. Полученные АЧХ были расшифрованы с целью определения величины нагруженной добротности  $Q$  измерительного преобразова-

теля. Нагруженная добротность (ИП нагружен на  $50 \text{ Ом}$ )  $Q$  определялась с помощью величины  $2\Delta F$  (ширина АЧХ на уровне  $-3 \text{ дБ}$ ) и  $F$  (центральная частота резонанса).

Как показывают результаты обработки с точностью до  $5\%$  нагруженные величины добротности ИП с воздухом ( $Q_1, F_1$ ) и с трансформаторным маслом ( $Q_2, F_2$ ) практически совпадают, что свидетельствует о слабом влиянии масла на добротность ИП:

$$Q_1 = \frac{F_1}{2\Delta F_1} = \frac{160 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = 80;$$

$$Q_2 = \frac{F_2}{2\Delta F_2} = \frac{108 \cdot 10^6}{1,3 \cdot 10^6} = 83;$$

$$Q_1 \cong Q_2.$$

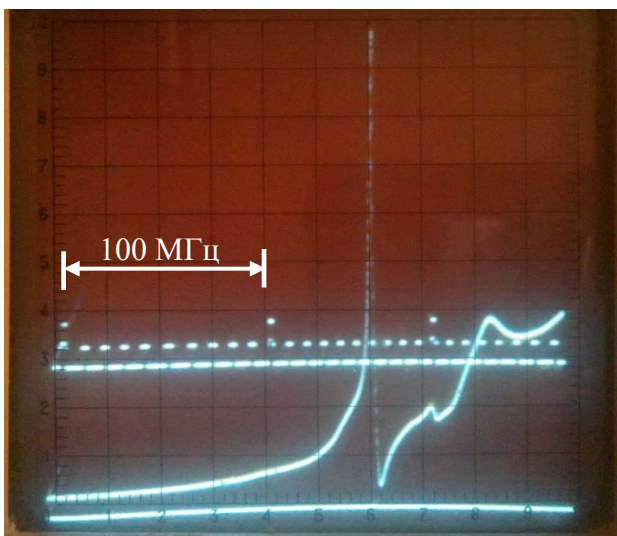


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного воздухом

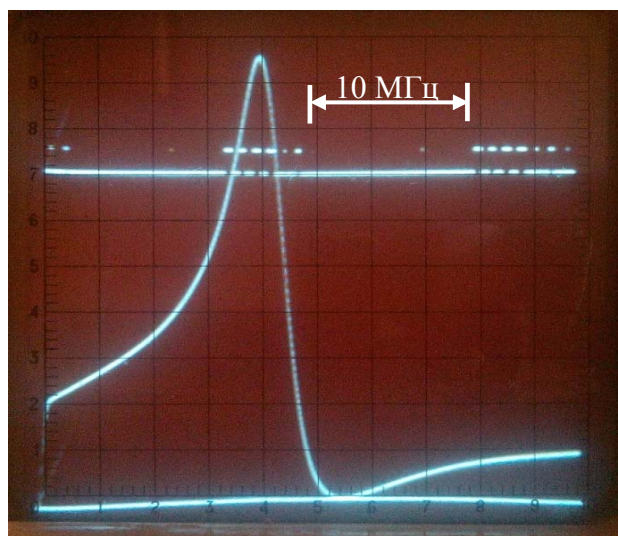


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного воздухом

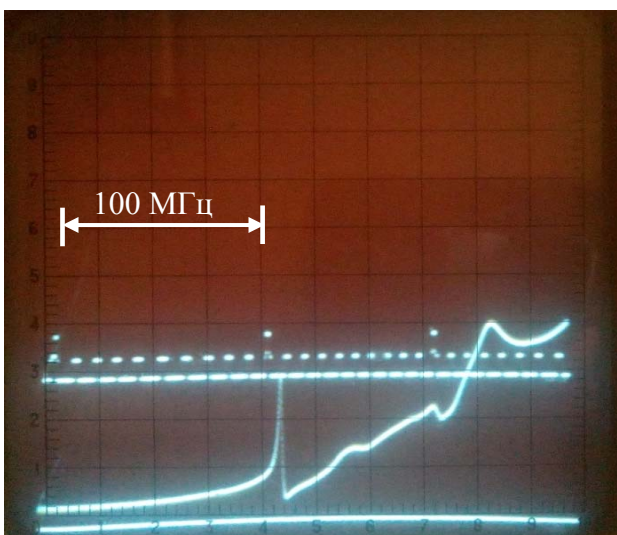


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного маслом

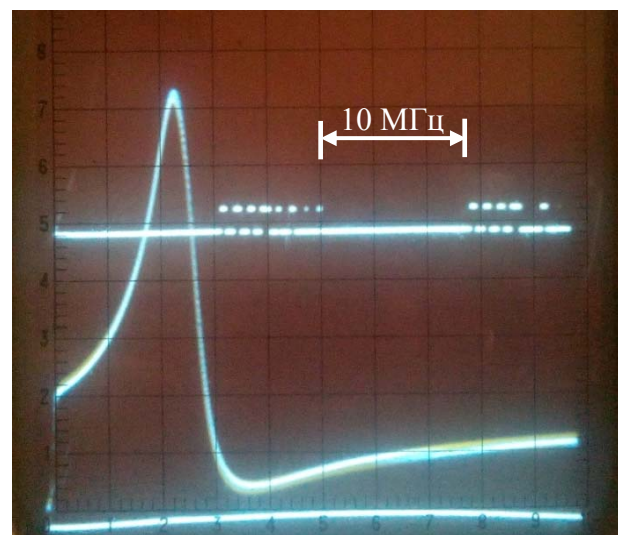


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного маслом

На втором этапе экспериментальных исследований были определены величины объемного влагосодержания приготовленных смесей «трансформаторное масло – вода» в диапазоне влагосодержания ( $10 -$

$10^4$ )  $\text{см}^3/\text{м}^3$ . В процессе проведения экспериментов с помощью микрошприцов марки «Hamilton» в предварительно обезвоженное масло объемом ( $500 \pm 0,6$ )  $\text{см}^3$  вводилось требуемое количество воды. После этого

приготавливалась однородная эмульсия с требуемым влагосодержанием. Затем для удаления газа из неводненного трансформаторного масла и приготовленной эмульсии сосуда с ними помещались в вакуумную камеру. После этого через измерительный преобразователь проливалась исследуемая жидкость с одновременным контролем температуры ИП и частоты генерации ИГ. В процессе проведения исследований температура ИП и ИГ поддерживалась постоянной с точностью  $\pm 0,03$  °С. При этом проводилось по 12 измерений частоты генерации ИГ, деленной на 80 для обезвоженного масла ( $F_3$ ) и исследуемой смеси ( $F_4$ ), и обрабатывались по стандартной методике для прямых измерений [6].

Для определения функциональной зависимости влагосодержания  $W$  от частоты воспользуемся формулой определения влагосодержания для измерителя влажности, описанного в [3]:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_4^2} - \frac{1}{F_3^2}}{\frac{1}{F_3^2} - \frac{1}{F_1^2}}, \quad (2)$$

где  $F_1$  – частота резонанса при отключенном измерительном преобразователе;  $F_3$  – частота резонанса для измерительного преобразователя, заполненного обезвоженным маслом;  $F_4$  – частота резонанса при заполненном измерительном преобразователе исследуемой смесью.

Конструкция предложенного измерителя влажности на основе СНКР такова, что она не содержит конструкционного диэлектрического материала, поддерживающего внутренний потенциальный электрод. Конструктивно внутренний потенциальный электрод наглухо соединен с наружным электродом, а исследуемая жидкость находится в пространстве между этими электродами. В этом случае конструкция измерительного преобразователя может быть представлена в виде короткозамкнутой четвертьволновой линии. Тогда измеритель влажности на основе СНКР имеет частоту  $F_1 = \infty$ , а  $1/F_1 = 0$  и выражение (2) преобразуется к виду:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_4^2} - \frac{1}{F_3^2}}{\frac{1}{F_3^2}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_3^2 - F_4^2}{F_4^2}. \quad (3)$$

Для малых величин влагосодержания  $W$ , когда выполняется неравенство вида:

$$\frac{F_3^2 - F_4^2}{F_4^2} < 0,1, \quad (4)$$

формула (3) для влагосодержания  $W$  упрощается:

$$W \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{F_3 - F_4}{F_4}. \quad (5)$$

Результаты обработанных экспериментальных значений влагосодержаний  $W$ ,  $W_0$  и частот  $F_3$ ,  $F_4$  представлены в табл. 1.

Таким образом, при концентрации влаги в приготовленной эмульсии  $W_0 = 10$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> величина измеренного влагосодержания составляет  $W = 9,51$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

а величина  $\Delta W = \pm 0,5$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, что позволяет производить измерения влагосодержания в диапазоне  $10^{-3} \% < W < 0,1 \%$  с относительной погрешностью (определяемой как разница влагосодержания приготовленной и измеряемой эмульсии деленной на влагосодержание приготовленной) не более 5,2 %.

Таблица 1

Обработанные результаты измерений				
$W_0$ , см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Частоты, Гц		$W$ , см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Относительная погрешность, %
	$F_3$	$F_4$		
10±1	1335497,4±0,6	1335478,3±0,8	9,51±0,5	5,2
50±1	1335558,1±0,6	1335459,8±0,6	49±0,4	1,9
100±5,1	1304712,0±0,7	1304519,7±0,8	98,3±0,6	1,8
499±5,6	1335558,1±0,6	1334602,2±1,3	477,7±0,7	4,6
999±11,2	1304658,8±0,7	1302569,9±1,2	1069,9±0,7	6,7
9901±111,8	1304658,8±0,7	1286722,6±34,4	9357,7±18,4	5,8

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что созданный измеритель характеризуется относительной погрешностью определения влагосодержания не более 6,7 % в диапазоне  $10$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  $\leq W \leq 10^5$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

#### Выводы.

1. В развитие диэлектрического метода определения влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках разработан СВЧ измеритель влагосодержания с измерительным преобразователем в виде ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора работающего в резонансном режиме.

2. Экспериментально подтверждена корректность предложенной для реализации измерителя влагосодержания упрощенной физической модели эмульсии типа «вода в масле».

3. Разработан измеритель влагосодержания на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора, который обладает большей стабильностью частоты, меньшими паразитными параметрами и большей рабочей частотой по сравнению с измерителем на основе емкостного измерительного преобразователя и измерительного генератора с сосредоточенными параметрами.

4. Предложена конструкция измерителя позволяет определять влагосодержание для исследуемых жидкостей как в покое, так и в потоке.

5. Разработанный измеритель влагосодержания позволяет при минимуме материально-временных затрат оперативно определить влагосодержание в диапазоне  $10^{-3} \% < W < 0,1 \%$  с помощью измерения двух резонансных частот измерительного преобразователя (с заполненным ИП обезвоженным маслом и с ИП заполненным исследуемой эмульсией) и расчета влагосодержания по формуле [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелкумян В.Е. Измерение и контроль влажности материалов. – М.: Изд-во Комитета стандартов мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1970. – 138 с.



2. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А. Электрофизическая модель поведения эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – №39. – С. 158-161.
3. Рудаков В.В., Коробко А.А. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлектрическим методом в резонансном режиме // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №50(1092). – С. 143-149.
4. Рудаков В.В., Коробко А.А. Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне // Вісник НТУ «ХПІ». – №20(1129). – С. 129-137.
5. Рудаков В.В., Коробко А.А. Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлектрики жидких сред в СВЧ диапазоне // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – №51(1160). – С. 91-95.
6. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

#### REFERENCES

1. Melkumyan V.E. *Izmerenie i kontrol vlazhnosti materialov*. [Measurement and control of humidity of materials.]. Moscow, Komitet standartov mer i izmeritelnykh priborov pri Sovete Ministrov SSSR Publ., 1970. 138 p. (Rus).
2. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. Electrophysical model of behavior emulsion mineral oil – water engineering type. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2009, no.39, pp. 158-161. (Rus).
3. Rudakov V.V. Korobko A.A. Increasing the sensitivity of the moisture content measurements in transformer oil dielectric method in resonant mode. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp. 143-149. (Rus).
4. Rudakov V.V., Korobko A.A. The resonance spectra of inhomogeneous coaxial resonators to determine the dielectric constant of liquid media in the microwave band. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.20(1129), pp. 129-137. (Rus).
5. Rudakov V.V., Korobko A.A. Research of metrological characteristics of transmitters in the form of a step coaxial resonator for dielectric inhomogeneous liquid media in the microwave range. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.51(1160), pp. 91-95. (Rus).
6. Dvoryashin B.V. *Osnovy metrologii i radioizmereniya* [Fundamentals of metrology and radio measurements]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 320 p. (Rus).

Поступила (received) 19.09.2016

Рудаков Валерий Васильевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Коробко Александр Анатольевич<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
тел/phone +380 93 6508088, e-mail: andarleks@gmail.com

V.V. Rudakov<sup>1</sup>, A.A. Korobko<sup>1</sup>

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

#### A high sensitive microwave measuring device of the moisture content in the non-polar dielectric liquids based on an inhomogeneous step coaxial resonator.

**Purpose.** Objective is to create a moisture meter for non-polar liquid dielectrics with low volumetric moisture content of more than  $10^{-3}$  %. **Methodology.** Moisture measuring is based on dielectric method. It is implemented as a resonant method of determining a capacitance measuring transducer. Measuring transducer capacitive type has a working and parasitic capacitance. It was suggested the definition of moisture on four of resonance frequencies: when the measuring transducer is turned off, one by one filled with air, «dry» and investigated liquid, to determine the parasitic capacitance of the measuring generator, and the parasitic capacitance of the measuring transducer and humidity. Measurement frequency was increased up to microwave range to increase the sensitivity. Measuring transducer with distributed parameters representing a step heterogeneous coaxial resonator is used by. This measuring transducer has a zero stray capacitance, because the potential electrode has a galvanic connection with an external coaxial electrode. Inductive ties loop is used to neglect parasitic capacitance of the measuring generator, and to increase the quality factor of the system. Measuring moisture is reduced to measuring the two frequencies of resonance frequency and «dry» and investigated liquid. Resonant characteristics transducer in a step inhomogeneous coaxial resonator have been investigated to determine the quality factor of filled with air and transformer oil, and experiments to measure the moisture content in transformer oil have been conducted. **Results.** Measuring transducer of distributed type is developed and researched – it is step inhomogeneous coaxial resonator. It has a smaller geometric length and larger scatter of the first and second resonant frequencies. Expression is obtained for determination of moisture on the basis of two resonant frequencies. The formula of the two frequencies to determine the moisture is correct. Resonant characteristics are obtained for measuring transducer. Its quality factor has been determined – it does not depend on what it is filled with air or oil. The moisture content in transformer oil for the amount of water to  $10^{-3}$  % with an error of no more than 6.7 % has been determined. **Originality.** It has been proposed to use of an inhomogeneous step coaxial resonator as a measuring transducer. Original high sensitive moisture meter for the fluid at rest and flowing fluid with low values of parasitic capacitances has been developed and researched. An original method of determining the moisture by measuring the two frequencies of resonance has been proposed and implemented. **Practical value.** This meter may be used to determine moisture in any of the non-polar liquid with high speed and accuracy. Moisture meter can be used in electrical engineering, aeronautical engineering, in the chemical and food industries. References 6, tables 1, figures 8.

**Key words:** moisture meter, non-polar liquid dielectrics, measuring transducer, step inhomogeneous coaxial resonator, measuring generator, resonance characteristics, volumetric water content, transformer oil, water.



9 сентября 2016 г. после тяжелой болезни на 68 году жизни скончался известный ученый в области техники высоких напряжений, доктор технических наук, профессор, академик АН высшей школы, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заведующий кафедрой инженерной электрофизики Валерий Васильевич Рудаков.

Многолетняя плодотворная научная работа, конечной целью которой всегда являлось создание уникальных электрофизических установок, привела В.В. Рудакова к написанию докторской диссертации, которую он успешно защитил в 1999 г.

Под его научным руководством были успешно защищены одна докторская и несколько кандидатских диссертаций. Профессор В.В. Рудаков – автор более 120 научных трудов и изобретений, в том числе нескольких учебных пособий.

Валерий Васильевич был великим тружеником, прекрасным организатором, добрым и отзывчивым человеком. Он не оставлял ни одной, даже внезапно возникшей в конце дня, проблемы на завтра и часто уходил с работы последним, закрывая кафедру и подъезд математического корпуса. В его кабинете всегда было многолюдно: сотрудники, преподаватели, дипломники, студенты младших курсов свободно обращались к нему и получали необходимую поддержку. Он был жизнерадостным оптимистом. Таким Валерий Васильевич останется в нашей памяти.

Мы скорбим и выражаем глубокое соболезнование родным и близким покойного.

С.П. Шаламов

## ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Представлено результати реалізації високочутливого датчика струмів наносекундного діапазону індукційного типу для детектування імпульсів струму, що протікають на стержневоому блискавкоприймачі. Аналіз останніх досягнень в галузі вимірювань слабких імпульсних струмів наведено. Представлено результати розрахунку датчика, показано вплив паразитних параметрів на вигляд перехідної характеристики датчика. Зроблено опис основних особливостей конструкції. Наведено параметри створеного датчика та результати калібрування. Бібл. 6, рис. 9.*

*Ключові слова:* напруженість магнітного поля, струм корони, перехідна характеристика, електромагнітна індукція, біекспоненціальний імпульс, калібрування індукційного перетворювача, лінія з розподіленими параметрами.

*Представлены результаты реализации высокочувствительного датчика токов наносекундного диапазона индукционного типа для измерения импульсов тока, протекающих на стержневом молниеприемнике. Проведен анализ современных достижений в области измерений слабких импульсных токов. Представлены результаты расчета датчика, показано влияние паразитных параметров на вид переходной характеристики датчика. Описаны основные особенности конструкции. Приведены параметры созданного датчика и результаты калибровки. Библ. 6, рис. 9.*

*Ключевые слова:* напряженность магнитного поля, ток короны, переходная характеристика, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровки индукционного преобразователя, линия с распределенными параметрами.

**Введение.** Знання из области газового разряда применяются в различных областях современной науки. Коронный разряд возникает в резко неоднородных электрических полях, характерных для электродных систем «игла - плоскость». Эффект возникает при подаче потенциала определенной величины, необходимого для реализации самостоятельной формы разряда. Существует интервал напряжения, при котором разрядный ток представляет собой стабильную последовательность импульсов. Увеличение напряжения на разрядном промежутке, при не изменяющихся внешних условиях, приводит к увеличению частоты следования импульсов. Сегодня в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» ведутся работы по исследованию коронного разряда с молниеприемников в предгрозовой обстановке. Результаты работы позволят создать систему предупреждения о грозовой опасности. Для регистрации разрядного тока, протекающего на игольчатом электроде, применяется индукционный преобразователь. Поскольку на стационарные стержневые молниеприемники невозможно произвести установку шунта, индукционный преобразователь в этом случае является незаменимым инструментом, которому не нужен электрический контакт с молниеприемником.

**Цель работы** – создание измерительного комплекса, который будет основой для системы предупреждения грозовой опасности.

**Постановка задачи.** Моделирование процесса коронирования стержневых молниеприемников осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Стержневой молниеприемник размещался между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 × 6,56 м, верхняя – 3,63 × 5,22 м. Нижняя плоскость заземлена, верхняя плоскость потенциальна. Стержень устанавливался на нижней плоскости и имел соединение с заземленной плоскостью через сопротивление шунта 75 Ом. Индукционный преобразователь позволил гальванически

отделить систему измерения от элементов установки, находящихся под высоким потенциалом.

Типовые осциллограммы измеряемого тока представлены на рис. 1.

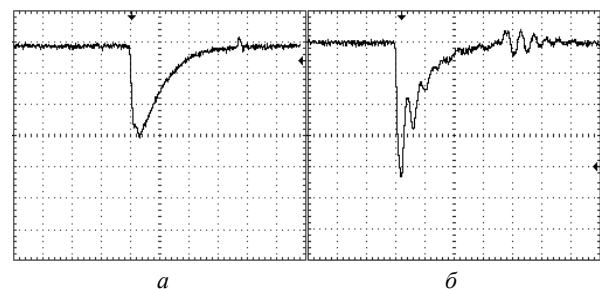


Рис. 1. Типовые осциллограммы тока единичного стримера (масштаб по вертикали – 100 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 100 нс/клетка)

При различных значениях напряженности электрического поля в пространстве и в зависимости от геометрии конструкции, возможны изменения амплитудно-временных параметров тока стримера, но все они находятся в определенном диапазоне: время фронта импульса тока – от 14,8 нс до 20,5 нс, амплитуда – от 4 мА до 20,5 мА.

Формулы для расчета времени нарастания переходной характеристики, постоянной интегрирования измерителя при использовании  $RL$  – интегратора и чувствительности преобразователя имеют вид [2, 3]:

$$T_{riseTime} = 3,35\sqrt{L_d C_d}; \quad (1)$$

$$T = \frac{L_d}{R_I}; \quad (2)$$

$$K_n = \frac{\mu_0 \mu_r S_w \cdot \cos \varphi}{T}, \quad (3)$$

где  $T_{riseTime}$  – время нарастания переходной характеристики;  $L_d$  – индуктивность индукционного преобразо-

вателя;  $C_d$  – суммарная паразитная емкость;  $T$  – постоянная интегрирования самоинтегрирующего индукционного преобразователя;  $R_I$  – сумма собственного и интегрирующего сопротивления;  $K_n$  – коэффициент преобразования;  $\mu_0$  – постоянная магнитной проницаемости;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость материала сердечника;  $S$  – площадь витков;  $w$  – количество витков;  $\varphi$  – угол между направлением вектора напряженности магнитного поля и нормалью к рамке.

Для обеспечения надежной регистрации тока стримера, чувствительность измерителя принимается не менее 2,5 мВ на 1 мА.

**1. Анализ современных достижений в области измерения импульсных токов.** В [2] представлено описание измерителя сильных импульсных токов для измерения в цепях с высоким рабочим напряжением и отсутствием возможности использования шунта. Принципиальная схема измерителя представлена на рис. 2. Конструктивное выполнение показано на рис. 3.

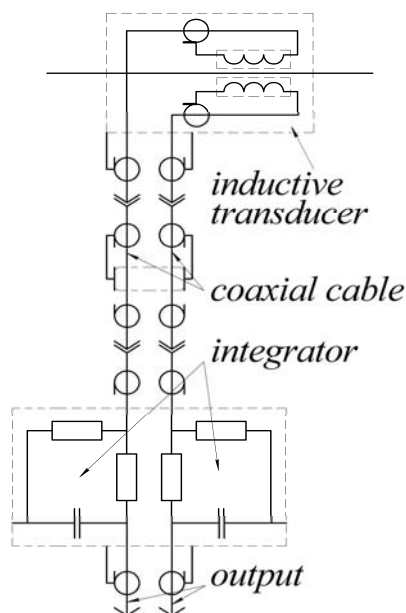


Рис. 2. Принципиальная схема измерителя

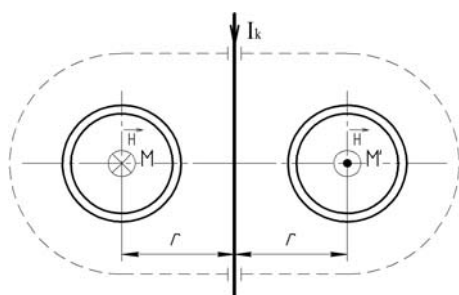


Рис. 3. Конструкция измерителя

Сигнал интегрируется на  $RC$ -интеграторе. Изменяемый ток  $I_k$  пропускают по прямолинейному проводнику. Вокруг проводника при этом возникает магнитное поле, совпадающее по форме с импульсом тока. В симметричных относительно проводника точках  $M$  и  $M'$  компланарно и противофазно установлены два индукционных измерительных преобразователя.

Вся конструкция заключена в электромагнитный экран цилиндрической формы. Под действием элек-

тромагнитного поля в обоих преобразователях возникают равные по величине, но противоположные по фазе э.д.с., которые в последующих устройствах интегрируются, а затем вычитаются в дифференциальном усилителе осциллографа. Разработанная конструкция позволяет эффективно избавиться от помех.

В [4] приведены результаты разработки средств измерения импульсных магнитных полей электроразрядных установок, используемых для испытаний технических средств на молниестойкость. Описана теория работы измерителей импульсных магнитных полей индукционного типа. Представлены требования к параметрам измерителя для достоверного измерения биэкспоненциальных полей. Параметры измерителя должны быть следующими:

$$T_{inc} \geq (3 \div 5)T_{riseTime}; \quad (4)$$

$$T_{dec} \geq (10 \div 50)T_{fallTime}, \quad (5)$$

где  $T_{fallTime}$  – длительность спада переходной характеристики;  $T_{inc,dec}$  – длительность фронта и спада измеряемых импульсов магнитного поля

Для измерения широкополосных импульсных магнитных полей описана схема измерителя, состоящего из двух независимых каналов: измерения фронта импульса и канал измерения длительности импульса. Электрическая схема приведена на рис. 4.

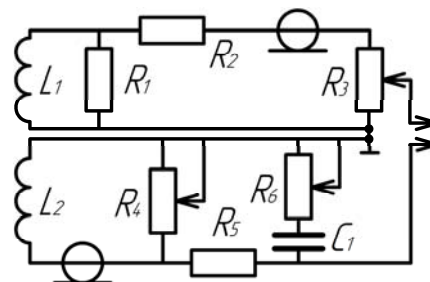


Рис. 4. Схема широкополосного измерителя напряженности магнитного поля

Канал измерения фронта импульса достоверно измеряет форму импульса в диапазоне времен от единиц наносекунд до 10 мкс, а канал измерения спада – в диапазоне времен от 10 мкс до нескольких десятков миллисекунд. Для интегрирования сигнала используют  $RL$  (элементы  $L_1, R_1$ ) и  $RC$  (элементы  $R_5, C_1$ ) интеграторы. Элементы  $L_1$  и  $L_2$  являются индуктивностью каналов измерения фронта и спада. Для правильной работы измерителя необходимо достичь совпадения формы сигналов на спаде импульса канала измерения фронта и фронта импульса канала измерения спада. Это достигается регулированием  $R_4$ . Регулирование амплитуды сигнала с канала измерения фронта осуществляется резистором  $R_3$ . При сложении сигналов возникает провал в месте стыка сигналов, который устраняется регулировкой  $R_6$ . Резистор  $R_2$  позволяет согласовать кабель. В [5] реализован широкополосный измеритель напряженности магнитного поля.

В [6] рассматривается принцип работы, производительность, ограничения и развитие технологии измерений токов с помощью пояса Роговского и излагаются меры по совершенствованию конструкции интегратора, который позволяет достичь ширины полосы частот до 10 МГц. Проведен анализ поведения



пояса Роговского при измерениях токов высокой частоты. Упрощенная схема замещения катушки Роговского показана на рис. 5

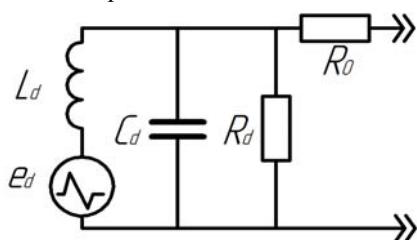


Рис. 5. Электрическая эквивалентная схема катушки с нагрузочным сопротивлением  $R_d$  и последовательном резистором  $R_0$  ( $R_0 \gg R_d$ )

Элементы  $L_d$  и  $C_d$  представляют индуктивность и емкость катушки,  $R_0$  является интегрирующим сопротивлением. Для обеспечения необходимого затухания выбор  $R_d$  проводится в согласии с выражением:

$$R_d = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{L_d}{C_d}} \quad (6)$$

Значение  $R_d$  выше, чем волновое сопротивление катушки  $\rho = (L/C)^{0,5}$ , хотя и есть основания предполагать, что катушка должна быть нагружена на  $\rho$ . Но было обнаружено, что (6) дает лучшую переходную характеристику. Кроме того, емкость измерительного кабеля будет увеличивать эквивалентную емкость катушки и тем самым существенно уменьшит пропускную способность. Чтобы избежать этого эффекта, последовательное сопротивление  $R_0$  установлено на конце катушки, как показано на рис. 5. Этот резистор образует часть  $RC$  интегратора [6].

**2. Описание конструкции датчика.** Измеритель состоит из последовательно соединенных индукционных преобразователей, как показано на рис. 6. Выходной сигнал увеличивается пропорционально количеству соединенных измерителей в том случае, если система обладает свойством длинной линии. Это имеет место, когда длина волны измеряемого поля соизмерима с электрической длиной проводника катушки. Выбор сопротивления  $R_d$  можно проводить в согласии с (6), но при этом датчик работает в колебательном режиме. На рис. 7 приведены результаты расчета переходной характеристики при значении  $\rho$  катушки, равном 160 Ом.

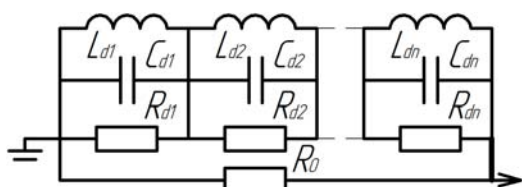


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема измерителя ( $R_d$  – демпфирующее сопротивление)

Для достижения минимального времени нарастания переходной характеристики  $T_{riseTime}$  нужно выбирать  $R_d$  равным  $(\pi/2)\rho$ . В случае необходимости получения аperiodической переходной характеристики, рекомендуется принять  $R_d \leq \rho$ .

Созданный измеритель представляет собой катушку, намотанную на ферромагнитный сердечник

прямоугольного сечения. Параметры измерителя следующие: сопротивление катушки 2 Ом, паразитная емкость 100 пФ, индуктивность 5 мкГн.

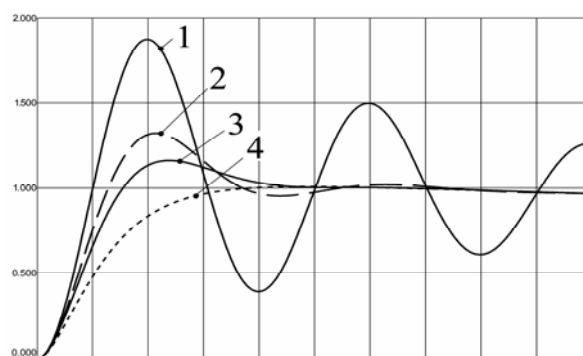


Рис. 7. Результаты расчета переходной характеристики измерителя (1 –  $R_d$  отсутствует; 2 –  $R_d = (\pi/2)\rho$ ; 3 –  $R_d = \rho$ ; 4 –  $R_d = \rho/2$ ; масштаб по вертикали – относительные единицы; масштаб по горизонтали – 5 нс/клетка)

На рис. 8 показан сигнал с измерителя (2), полученный при измерении тока прямоугольной формы (1) с фронтом 5 нс. Нагрузочное сопротивление  $R_d$  принимается равным  $(\pi/2)\rho$ .

На рис. 9 приведены осциллограммы сигналов датчика и шунта с сопротивлением 75 Ом, установленных на стержневом молниеприемнике. Измеряется ток короны.

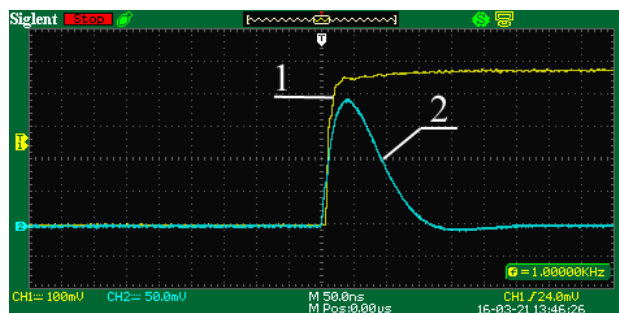


Рис. 8. Осциллограммы выходного напряжения с измерителя (1 – сигнал с генератора; 2 – выходной сигнал с измерителя)

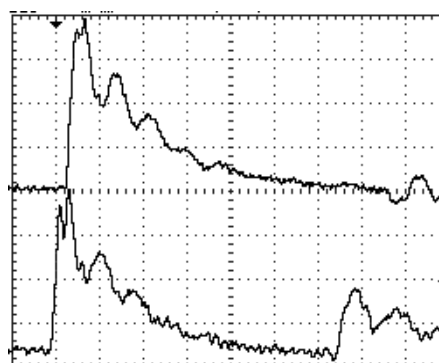


Рис. 9. Осциллограммы выходных сигналов напряжения с шунта и измерителя (канал 1: масштаб по вертикали – 100 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 нс/клетка; канал 2: масштаб по вертикали – 20 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 50 нс/клетка)

Из рис. 8: чувствительность измерителя – 8 мВ/мА, время фронта выходного сигнала – 25 нс.

**3. Особенности конструкции датчика.** Для повышения чувствительности и помехозащищенности

измерителя можно использовать два идентичных преобразователя, включенных встречно. Если индукционный преобразователь нагружен на малое активное сопротивление, по сути, режим короткого замыкания, то возникает противополе, по величине близкое к величине измеряемого поля и вытесняющее из объема индукционного преобразователя измеряемое магнитное поле. Если использовать два преобразователя и при измерениях их располагать близко друг к другу, то выходной сигнал с преобразователей будет существенно меньше, чем если бы они располагались друг относительно друга на значительном расстоянии. Для решения этой проблемы существует несколько путей: использование провода малого сечения для увеличения собственного сопротивления и, как следствие, снижения величины тока в катушке, либо разделение преобразователей и удаление их друг от друга до того момента, пока взаимдуктивность измерителей не станет исчезающе малой.

Автор выражает благодарность Ю.С. Немченко за помощь при проведении исследований.

Работа выполнена в рамках проекта 0115U000611, финансируемого МОН Украины.

#### Выводы.

1. Создан измерительный комплекс для системы предупреждения грозовой опасности, в состав которого входит индукционный преобразователь. Для повышения чувствительности датчиков индукционного типа применяется схема их последовательного соединения. Такое соединение датчиков обладает свойством длинной линии в том случае, если длина волны измеряемого поля соизмерима с электрической длиной проводника катушки.

2. Выполнены расчеты переходных характеристик при различных значениях электрических параметров элементов созданного датчика.

3. Изготовлен образец датчика индукционного типа для измерения токов наносекундного диапазона. Время нарастания его переходной характеристики составляет 25 нс, а чувствительность – 8 мВ/мА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernuhin A. Yu., Kniaziev V.V. Стримерная корона со стержневых молниеприемников // East European Scientific Journal. – 2016. – №6. – Ч.2. – С. 39-46.
2. Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н., Князев В.В. Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – №35. – С. 29-54.
3. Шаламов С.П. Измерение импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – №50. – С. 161-168.
4. Немченко Ю.С. Широкополосные средства измерения импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – №20. – С. 132-146.
5. Немченко Ю.С., Шаламов С.П. Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015. – №20(1129). – С. 99-108.
6. Power Electronic Measurements Ltd (PEM). – Режим доступа: <http://www.pemuk.com/publications.aspx>.

#### REFERENCES

1. Chernuhin A. Yu., Kniaziev V.V. The streamer corona from the rod lightning arresters. *East European Scientific Journal*, 2016, no.6, iss.2, pp. 39-46. (Rus).
2. Nemchenko Yu.S., Lesnoy I.P., Lantushko B.N., Knyazev V.V. Metrological maintenance operation of high-voltage pulse electric discharge equipment. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2004, no.35, pp. 29-54. (Rus).
3. Shalamov S.P. Measurement of pulsed magnetic fields. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50, pp. 161-168. (Rus).
4. Nemchenko Yu.S. Wideband means of measuring pulse magnetic fields. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2007, no.20, pp. 132-146. (Rus).
5. Nemchenko Yu.S., Shalamov S.P. Induction converter pulsed magnetic field of lightning. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.20, pp. 99-108. (Rus).
6. Power Electronic Measurements Ltd (PEM). Available at: <http://www.pemuk.com/publications.aspx> (Accessed 08 April 2013).

Поступила (received) 10.09.2016

Шаламов Станислав Павлович, аспирант,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
тел/phone +38 057 7076010, e-mail: shalamov.stas@i.ua

S.P. Shalamov

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

#### An induction sensor for measuring currents of nanosecond range.

**Purpose.** A current meter based on the principle of electromagnetic induction is designed to register the current flowing in the rod lightning. The aim of the article is to describe the way of increasing the sensitivity of the converter by means of their serial communication. **Methodology.** The recorded current is in the nanosecond range. If compared with other methods, meters based on the principle of electromagnetic induction have several advantages, such as simplicity of construction, reliability, low cost, no need in a power source, relatively high sensitivity. Creation of such a meter is necessary, because in some cases there is no possibility to use a shunt. Transient properties of a meter are determined by the number of turns and the constant of integration. Sensitivity is determined by measuring the number of turns, the coil sectional area, the core material and the integration constant. For measuring the magnetic field pulses with a rise time of 5 ns to 50 ns a meter has turns from 5 to 15. The sensitivity of such a meter is low. When the number of turns is increased, the output signal and the front increase. Earlier described dependencies were used to select the main parameters of the converter. It was based on generally accepted and widely known equivalent circuit. The experience of created earlier pulse magnetic field meters was considered both for measuring the magnetic fields, and large pulse current. **Originality.** Series connection of converters has the property of a long line. The level of the transient response of the meter is calculated. The influence of parasitic parameters on the type of meter transient response is examined. The shown construction was not previously described. **Practical value.** The results of meter implementation are given. The design peculiarities of the given measuring instruments are shown. References 6, figures 9.

**Key words:** magnetic field strength, corona current, surge characteristic, electromagnetic induction, bi-exponential pulse, induction transformer's calibration, distributed parameter line.

А.В. Волошко, Я.С. Бедерак

## МЕТОД АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ОДНОЧАСНО ПРАЦЮЮЧИХ В ГРУПІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

*Метою досліджень є розробка методу автоматичного визначення кількості працюючих електродвигунів високої напруги в групі однотипних на основі визначення та аналізу облікових даних електроспоживання, які отримані з приладів обліку електроенергії, встановлених на приєднаннях електродвигунів. Розроблений алгоритм програми автоматичного визначення кількості працюючих електродвигунів в групі однотипних. Одержані результати можуть бути використані для впровадження автоматизованого ведення обліку пробігу кожного електродвигуна, розрахунку параметрів еквівалентного асинхронного (АД) або синхронного двигуна (СД), які в свою чергу в подальшому можуть застосовуватися для оцінки ефективності роботи групи однакових електродвигунів, проведення розрахунків статичної та динамічної стійкості електропостачальної системи промислового підприємства, що містить АД або СД. Бібл. 7, рис. 2.*

*Ключові слова:* асинхронний та синхронний електродвигуни, група однотипних електродвигунів, пробіг.

*Целью исследований является разработка метода автоматического определения количества работающих электродвигателей высокого напряжения в группе однотипных на основе определения и анализа учетных данных электропотребления, полученных с приборов учета электроэнергии, установленных на присоединениях электродвигателей. Разработан алгоритм программы автоматического определения количества работающих электродвигателей в группе однотипных. Полученные результаты могут быть использованы для внедрения автоматизированного ведения учета пробега каждого электродвигателя, расчета параметров эквивалентного асинхронного (АД) или синхронного двигателя (СД), которые в свою очередь в дальнейшем могут применяться для оценки эффективности работы группы одинаковых электродвигателей, проведение расчетов статической и динамической устойчивости системы электропитания промышленного предприятия, содержащей АД или СД. Библ. 7, рис. 2.*

*Ключевые слова:* асинхронный и синхронный электродвигатели, группа однотипных электродвигателей, пробег.

**Вступ.** В практичній діяльності визначити кількість підключених до мережі асинхронних (АД) або синхронних (СД) електродвигунів в групі електродвигунів одного типу неможливо без візуального контролю.

Часто в електроустановках до шин 6-10 кВ підключено декілька АД, в загальному випадку різних за типом і потужністю. При оцінці результуючого впливу всіх двигунів на струм короткого замикання в місці пошкодження доцільно всі двигуни або окремі групи їх замінити одним еквівалентним АД. Вихідними для еквівалентування асинхронного двигуна є наступні параметри: номінальні значення номінальної потужності  $P_{nom}$ ; відносне значення пускового струму  $I_n$ ; кратності пускового  $m_n$  і максимального  $m_{max}$  моментів. В формулах для розрахунку еквівалентного АД застосовується кількість однотипних  $n$  їх в групі АД [1]. Наприклад, номінальне значення активної потужності еквівалентного АД  $P_{nom.ekv}$  групи, що складається з  $n$  електродвигунів номінальною потужністю  $P_{nom}$  кожен визначається за формулою [1]:

$$P_{nom.ekv} = \sum_{j=1}^n P_{nom}$$

Тому для отримання точного значення параметрів еквівалентного АД необхідно точно визначити кількість їх. Аналогічна задача стоїть і для групи СД.

**Метою роботи** є розробка методу автоматичного визначення кількості працюючих електродвигунів напругою 6 кВ в групі однотипних на основі визначення та аналізу облікових даних електроспоживання, які отримані з приладів обліку електроенергії, встановлених на приєднаннях електродвигунів. Особливістю роботи електродвигунів є те, що навантаження на валу їх коливається в широких межах. Тому коли працює декілька АД або СД одночасно, просте визначення

споживання електроенергії групою електродвигунів не дає можливості визначити кількість працюючих електродвигунів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Параметри еквівалентного АД або СД (коефіцієнт потужності, коефіцієнт завантаження, максимальний та пусковий моменти, параметри схеми заміщення тощо) використовуються для оцінки ефективності роботи групи однакових АД або СД, проведення розрахунків статичної та динамічної стійкості електропостачальної системи промислового підприємства, що містить АД або СД, періодичної складової пускового струму, визначення залишкової напруги на шинах джерела живлення під час самозапуску АД та СД та інших задач [1]. Теоретичні засади режимів роботи АД і СД розроблені Сиромятніковим І.А. в роботі [2]. Проблеми забезпечення стійкості роботи як одного СД або АД, так і їх групи розглянуті в роботах Гуревича Ю.Є. [1]. Питання підвищення стійкості АД та СД при короткочасній втраті живлення розглянуті в роботах Фішмана В. [3], Тіджієва М.О. [4], Міхалева С.В. [5].

### Матеріал і результати досліджень.

АД або СД можуть працювати в широкому діапазоні потужності від потужності неробочого ходу до номінальної. Тому необхідно обрати мінімальне значення в відсотках від номінальної потужності, яке б свідчило про ввімкнений стан кожного двигуна. Згідно [2] струм неробочого ходу АД  $I_{is}$  розраховується за формулою:

$$I_{is} = I_{nom} \cdot \left( \sin \varphi_{nom} - \frac{\cos \varphi_{nom}}{b_{nom} + \sqrt{b_{nom}^2 - 1}} \right),$$

де  $I_{nom}$  – номінальний струм електродвигуна;  $\cos \varphi_{nom}$  – номінальний коефіцієнт потужності;  $b_{nom}$  – відношення максимального обертаючого моменту до номіналь-

ного на валу АД. Розрахунки, виконані за каталожними даними АД ( $\cos \varphi_{nom} = 0,8 \dots 0,92$ ;  $b_{nom} = 2 \dots 2,7$ ), свідчать, що мінімальне значення  $I_{fs}$  знаходиться в інтервалі від 25 % до 40 % від номінального струму електродвигуна. Мінімальне значення навантаження на валу СД знаходиться в межах від 35 % до 50 % від номінального струму електродвигуна [2]. Ці співвідношення використані для визначення працюючого стану АД або СД.

Для визначення кількості АД або СД пропонується встановити в релейному відсіку на кожному приєднанні високовольтних електродвигунів (рис. 1) електронні багатофункціональні лічильники електроенергії, що вимірюють в режимі реального часу струм, напругу, потужність, частоту та інші параметри режиму електроспоживання, та забезпечити збір, обробку та передачу даних в автоматизовану систему контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ) в режимі реального часу.

До шин 6 кВ підстанції (рис. 1) підключено три однакових АД високої напруги. На кожному приєднанні АД встановлений електронний лічильник електроенергії. Усі лічильники підключені до АСКОЕ підприємства. Значення активної потужності кожного електродвигуна одержуються в режимі реального часу.

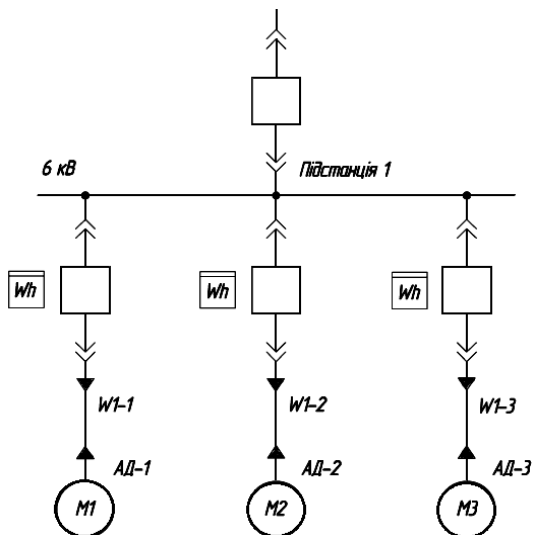


Рис. 1

Виміряні значення після перевірки на промахи використовуються в спеціально розробленій програмі контролю включеного стану АД або СД. Коли навантаження на кожному АД або СД перевищує 25 % від номінальної потужності  $P_{nom}$  електродвигуна, то він вважається включеним.

Алгоритм програми, що контролює включений стан АД або СД, наведений на рис. 2.

Програма працює таким чином.

Вихідними даними є кількість встановлених  $m$  та працюючих  $n$  електродвигунів, виміряне лічильником значення потужності  $i$ -го електродвигуна, номінальна потужність його. Лічильник програми розпочинає підрахунок з 0. Коли навантаження на першому електродвигуні перевищує  $0,25P_{nom}$  електродвигуна, то він вважається включеним. Аналогічна процедура відбу-

вається з кожним наступним електродвигуном. Коли  $i = m$ , то процедура закінчує свою роботу і на виході одержується розрахована кількість працюючих електродвигунів в групі однотипних.

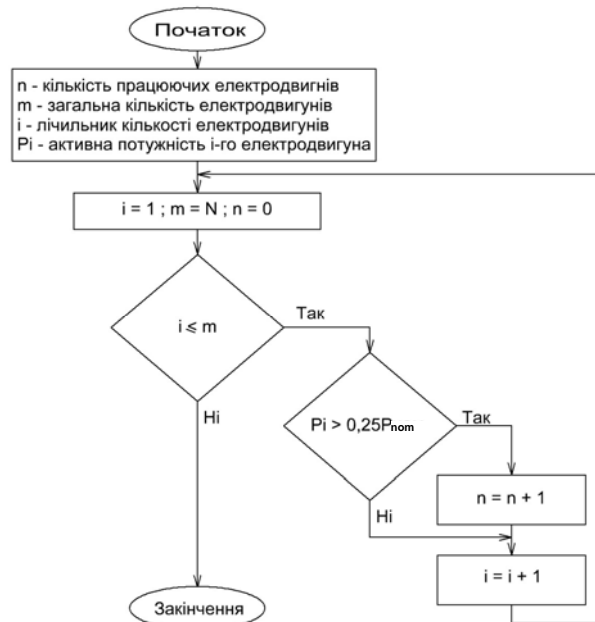


Рис. 2. Алгоритм програми, що контролює включений стан АД або СД

Аналіз показав, що знання кількості включених АД або СД може бути використано ще для однієї задачі – організації технічного обслуговування та ремонту електродвигунів (обчислення пробігу кожного електродвигуна, розрахунку міжремонтного періоду його).

Журнал пробігу АД або СД дозволяє одержати точний час роботи його, що забезпечує дотримання міжремонтного періоду. Для своєчасної організації ремонту основного електроустаткування необхідно вести журнал пробігу електродвигунів на виробництві. В [6] запропоновано вести журнал пробігу в електронному вигляді, але не визначено шляхів вирішення цього завдання. Обчислення кількості включених електродвигунів в режимі реального часу дає можливість вирішити цю задачу з мінімальними затратами праці обслуговуючого персоналу.

Для розрахунку пробігу кожного електродвигуна необхідно знати, працює він в поточний момент часу або ні. Тому коли в режимі реального часу є інформація про включений стан кожного АД або СД можливо визначити кількість напрацьованих їм годин за будь-який інтервал часу (місяць, рік). Завдяки цим даним розраховується міжремонтний період. Міжремонтним періодом називається інтервал напрацювання устаткування між черговими поточними ремонтами, який вимірюється кількістю відпрацьованих годин [7].

### Висновки.

1. Розроблений метод визначення кількості працюючих АД або СД в групі однотипних електродвигунів шляхом контролю навантаження на кожному приєднанні електродвигуна приладами обліку електроенергії, який враховує широкий діапазон змінювання навантаження на валу електродвигуна.

2. Одержане значення кількості працюючих АД або СД може бути використане для автоматизованого ведення обліку пробігу кожного електродвигуна, визначення параметрів еквівалентного АД та СД, які використовуються для розрахунків статичної або динамічної стійкості в електропостачальних системах промислових підприємств, оцінки ефективності роботи групи однакових електродвигунів, періодичної складової пускового струму, визначення залишкової напруги на шинах джерела живлення під час самозапуску тощо.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
3. Фишман В.С. Провалы напряжения в сетях промпредприятий. Минимизация последствий // Новости электротехники. – 2004. – № 6. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/30/05.php>.
4. Тиджиев М.О. Повышение устойчивости технологических процессов непрерывных производств при кратковременных нарушениях электроснабжения // Всероссийская научно-техническая конференция «Электропотребление, энергосбережение, электрооборудование». Тез. докл. – Оренбург, 2003. – С. 28-29.
5. Поляхов Н.Д., Михалев С.В. Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере питания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – №10. – С. 62-68.
6. Волошко А. В., Бедерак Я.С. Система моніторингу режимів електроспоживання промислового підприємства // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 4. – С. 50-59.
7. Система технического обслуживания и ремонта технологического и теплоэнергетического оборудования химических предприятий Министерства промышленной политики Украины. Утверждена Первым заместителем Министра промышленности Украины А. Г. Голубовым 25 апреля 1996 г. – К., 1998. – 432 с.

#### REFERENCES

1. Gurevich I.E., Libova L.E., Khachatryan E.A. *Ustoichivost' nagruzki elektricheskikh system* [Resistance load of electrical systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 208 p. (Rus).
2. Syromiatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (Rus).
3. Fishman V.S. Voltage dips in the grids of industrial enterprises. Minimizing the consequences. *Electrical Engineering News*, 2004, no.6. Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/30/05.php>. (accessed 18.05.2016). (Rus).
4. Tidzhiev M.O. Improving of the sustainability of continuous production processes during short power failure. *Tez. dokl. Vserossiisk. nauk.-tekhn. konf. «Elektropotreblenie, energosberezhenie, elektrooborudovanie»* [Abstracts of All-Russia Sci.-Techn. Conf. «Power consumption, energy saving, electrical equipment»]. Russia, Orenburg, 2003. pp. 28-29. (Rus).

5. Poliakhov N.D., Mikhalev S.V. Enhancing of the stability of synchronous motors with a short-term power loss. *Proceedings of ETU «LETI»*, 2012. no.10, pp. 62-68. (Rus).
6. Voloshko A.V., Bederak Ya.S. The monitoring system of mode power consumption of the industrial enterprise. *Energy: economics, technology, ecology*, 2014, no.4, pp. 50-59. (Rus).
7. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta tekhnologicheskogo i teploenergeticheskogo oborudovaniia khimicheskikh predpriatii Ministerstva promyshlennoi politiki Ukrainy. Utverzhdena Pervym zamestitelem Ministra promyshlennosti Ukrainy A. G. Golubovym 25 apreliia 1996 g.* [System of maintenance and repair of heat and power technology equipment on chemical enterprises in the Ministry of Industrial Policy of Ukraine. Approved by the First Deputy of Minister of Industry of Ukraine A.G. Golubov on 25 April 1996]. Kyiv, 1998. 432 p. (Rus).

Надійшла (received) 25.05.2016

Волошко Анатолій Васильович<sup>1</sup>, д.т. н., проф.,  
Бедерак Ярослав Семенович<sup>2</sup>, інженер,  
<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний університет»,  
03056, Київ, пр. Перемоги, 37.  
<sup>2</sup> Публічне акціонерне товариство «АЗОТ»,  
18014, Черкаси, вул. Першотравнева, 72,  
тел/phone +380 47 2392979, e-mail: ei@uch.net

A.V. Voloshko<sup>1</sup>, Ya.S. Bederak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

<sup>2</sup> PJSC «AZOT»,

72, Pervomayskaya Str., Cherkassy, 18014, Ukraine.

#### **A method of automatic determination of the number of the electrical motors simultaneously working in group.**

**Purpose.** Propose a method of automatic determination of the number of operating high voltage electric motors in the group of the same type based on the determination and analysis of the account data of power consumption, obtained from of electric power meters installed at the connection of motors. **Results.** The algorithm of the automatic determination program for the number of working in the same group of electric motors, which is based on the determination of the motor power minimum value at which it is considered on, was developed. **Originality.** For the first time a method of automatic determination of the number of working of the same type high-voltage motors group was proposed. **Practical value.** Obtained results may be used for the introduction of an automated accounting run of each motor, calculating the parameters of the equivalent induction motor or a synchronous motor. References 7, figures 2.

**Key words:** induction and synchronous motors, group of the same type of electric motors, running.

## КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ МЕТОДАМИ ДВУХ И ТРЕХ ОТСЧЕТОВ ВОЛЬТМЕТРА

*Представлено застосування методів контролю ізоляції мереж низької напруги постійного і подвійного роду струму за допомогою вольтметра і резистора. Наведено формули для обчислення опору ізоляції методами двох і трьох відліків вольтметра. Запропоновано новий спосіб двох відліків вольтметра для мереж подвійного роду струму. Представлена модифікація розглянутих методів, що обмежує їх основний недолік – тривалість перехідного процесу. Бібл. 8, рис. 7.*

*Ключові слова:* мережі низької напруги постійного і подвійного роду струму, опір ізоляції, метод двох і трьох відліків вольтметра.

*Представлено применение методов контроля изоляции сетей низкого напряжения постоянного и двойного рода тока с помощью вольтметра и резистора. Приведены формулы для вычисления сопротивления изоляции методами двух и трех отсчетов вольтметра. Предложен новый способ двух отсчетов вольтметра для сетей двойного рода тока. Представлена модификация рассматриваемых методов, ограничивающая их основной недостаток – длительность переходного процесса. Библ. 8, рис. 7.*

*Ключевые слова:* сети низкого напряжения постоянного и двойного рода тока, сопротивление изоляции, метод двух и трех отсчетов вольтметра.

**Введение.** Для безопасной и надежной эксплуатации электрических сетей первостепенной задачей является контроль изоляции. В сетях низкого напряжения постоянного и двойного рода тока довольно широкое применение получили способы периодического измерения сопротивления изоляции относительно земли с помощью вольтметра и резистора (называемые также методами отсчета вольтметра). Наиболее известной процедурой этого рода является метод трех отсчетов вольтметра [1]. Однако заслуживает внимания тоже более простой способ, использующий лишь два отсчета вольтметра. По сравнению с методом трех отсчетов вольтметра он вызывает меньшие колебания (отклонения) напряжений проводов сети от исходных значений, но зато не позволяет определить сопротивлений изоляции отдельных полюсов сети. На практике метод трех отсчетов вольтметра получил широкое применение в автоматизированных системах контроля и поиска мест повреждений изоляции.

**Цель работы.** В доступной литературе нет изложения теории измерений методами отсчета вольтметра. До сих пор не был предложен тоже способ ограничения их основного недостатка – чрезмерной длительности измерительного цикла. Поэтому в статье поставлена задача дать обзор способов определения сопротивления изоляции сетей постоянного и двойного рода тока с помощью резистора и вольтметра, а также представить проверенный на практике вычислительный алгоритм для сокращения продолжительности измерения. Дополнительно автором предложена новая измерительная процедура для расширения возможностей метода двух отсчетов вольтметра.

**Метод двух отсчетов вольтметра Сети постоянного тока.** Самый простой способ определения эквивалентного сопротивления изоляции  $R_i$  сетей постоянного тока использует добавочный резистор  $R_0$ . Измеряются установленные напряжения избранного, например отрицательного полюса до и после включения этого резистора (рис. 1).

Искомое эквивалентное сопротивление изоляции вычисляется по формуле

$$R_i = R_0 \cdot \frac{(U_{21} - U_{22}) \cdot R_V}{U_{22} \cdot (R_0 + R_V) - U_{21} \cdot R_0}, \quad (1)$$

где  $U_{21}$  является напряжением отрицательного полюса до включения добавочного резистора,  $U_{22}$  – после включения этого резистора.

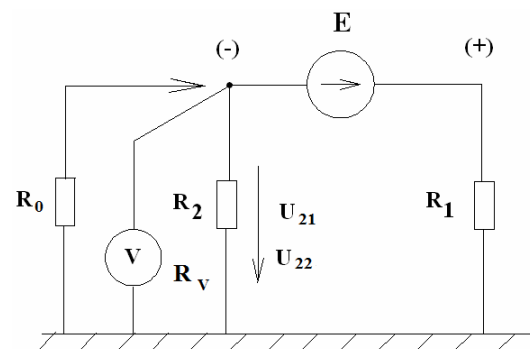


Рис. 1. Способ определения сопротивления изоляции сети постоянного тока с применением добавочного резистора:  $E$  – напряжение источника,  $R_1, R_2$  – сопротивление изоляции полюса (+) и (-),  $R_0$  – сопротивление добавочного резистора,  $R_V$  – сопротивление вольтметра,  $U_{21}, U_{22}$  – напряжение отрицательного полюса до и после включения добавочного резистора

Если внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V$  значительно больше значения добавочного резистора т.е.  $R_V \gg R_0$ , то справедлива упрощенная формула

$$R_i = R_0 \cdot \frac{U_{21} - U_{22}}{U_{22}}, \quad (2)$$

которая вытекает непосредственно из теоремы Тевенена.

Сопротивления изоляции отдельных полюсов сети относительно земли вычисляются по формулам

$$R_1 = R_i \cdot \frac{E}{U_{21}} \quad \text{и} \quad R_2 = R_i \cdot \frac{E}{E - U_{21}},$$

но для этого надо знать значение напряжения сети  $E$ .

Необходимым условием для реализации этого метода является постоянное значение напряжения  $E$ . Это требование остается в силе также при применении всех других методов отсчета вольтметра.

**Сети двойного рода тока.** Метод двух отсчетов вольтметра можно использовать тоже в сетях двойного рода тока (AC/DC IT). В данной статье под термином «сеть двойного рода тока» понимается система, объединяющая цепи переменного и постоянного тока, имеющие между собой гальваническую связь. Пример такой системы показан на рис. 2, где трехфазная трехпроводная сеть переменного тока питает нагрузку



постоянного тока на выходе диодного выпрямителя. В зависимости от места проведения измерений доступны две реализации этого метода.

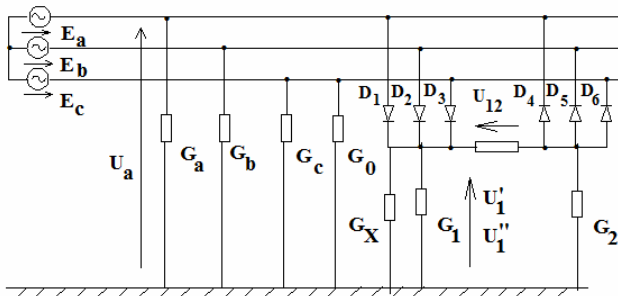


Рис. 2. Схема для двух способов определения эквивалентного сопротивления изоляции сети двойного рода тока с применением добавочных проводимостей:  $E_a, E_b, E_c$  – фазные напряжения источника,  $G_a, G_b, G_c$  – проводимости изоляции фаз сети,  $G_0, G_x$  – добавочные проводимости,  $U_1', U_1''$  – напряжение положительного полюса до и после включения добавочного резистора,  $U_a$  – напряжение фазы  $a$

В первом методе использованы измерения напряжений избранного полюса диодного выпрямителя относительно земли. В этом случае (см. рис. 2 без проводимости  $G_0$ ) измеряются **средние** значения напряжения этого полюса, например положительного в нормальном рабочем режиме  $U_1'$  (без добавочной проводимости  $G_x$ ) и при проводимости  $G_x$  подключенной между этим полюсом и землей  $U_1''$ . Согласно [3] эти напряжения равны

$$U_1' = \frac{G_a + G_b + G_c + 2 \cdot G_2}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2} \cdot \frac{U_{12}}{2}, \quad (3)$$

$$U_1'' = \frac{G_a + G_b + G_c + 2 \cdot G_2}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2 + G_x} \cdot \frac{U_{12}}{2},$$

откуда получается искомый параметр

$$R_i = \frac{1}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2} \quad (\text{эквивалентное сопротивление изоляции целой сети})$$

$$R_i = R_x \cdot \frac{U_1' - U_1''}{U_1}. \quad (4)$$

Во втором методе (предложенном автором) [2] использовано характерное свойство сетей двойного рода токов, т.е. появление отличного от нуля среднего значения фазных напряжений равного

$$U_{a-mean} = \frac{G_1 - G_2}{G_a + G_b + G_c + G_1 + G_2} \cdot \frac{U_{12}}{2}. \quad (5)$$

Предлагаемая процедура состоит из двух этапов. Сначала надо проверить, отличается ли от нуля среднее значение напряжения фазы сети  $U_{a-mean}$ . Если оно равно нулю, значит проводимости изоляции обоих полюсов выпрямителя относительно земли равны (т.е.  $G_1 = G_2$ ) или эквивалентное сопротивление изоляции целой сети двойного рода токов равно нулю. В первом случае на выходе выпрямителя надо подключить к одному из полюсов резистор  $R_x$  так, чтобы получить среднее значение напряжения фазы сети отличное от нуля. После этого среднее значение напряжения фазы измеряется в нормальном рабочем режиме ( $U_{a1-mean}$ ) и при добавочном резисторе  $R_0$  подключенном между любой фазой (например,  $a$ ) и землей ( $U_{a2-mean}$ ). Искомый параметр  $R_i$  вычисляется по формуле

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_0} \cdot \frac{U_{a1-mean} - U_{a2-mean}}{U_{a2-mean}} - \frac{1}{R_x}}, \quad (6)$$

которая вытекает из (5).

Если в нормальном рабочем режиме среднее значение напряжения фазы сети отлично от нуля, добавочного резистора  $R_x$  не надо подключать и формула (6) принимает вид

$$R_i = R_0 \cdot \frac{U_{a1-mean} - U_{a2-mean}}{U_{a2-mean}}. \quad (7)$$

Надо заметить, что благодаря измерению **среднего** значения напряжений, емкости сети относительно земли не влияют на результат вычисления и поэтому они не показаны на схеме замещения сети на рис. 2.

Следует подчеркнуть, что формулы (2), (4) и (7) для метода двух отсчетов вольтметра во всех рассматриваемых сетях идентичны.

### Метод трех отсчетов вольтметра.

**Сети постоянного тока.** Метод трех отсчетов вольтметра требует поочередного измерения вольтметром с известным внутренним сопротивлением  $R_V$  (или с параллельно подключенным добавочным резистором  $R_0$ ) трех напряжений:  $U_{12}$  – между полюсами сети;  $U_1$  – между положительным полюсом и землей;  $U_2$  – между отрицательным полюсом и землей (рис. 3).

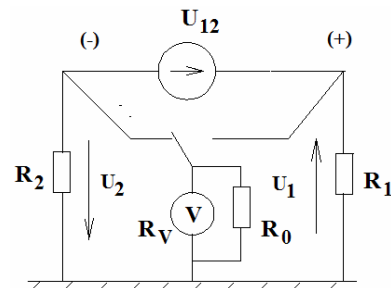


Рис. 3. Способ определения сопротивления изоляции сети постоянного тока методом трех отсчетов вольтметра:  $U_{12}$  – напряжение источника,  $R_1, R_2$  – сопротивление изоляции полюса (+) и (-),  $R_0$  – сопротивление добавочного резистора,  $R_V$  – сопротивление вольтметра,  $U_1$  – напряжение полюса (+) после подключения вольтметра,  $U_2$  – напряжение полюса (-) после подключения вольтметра

Расчет искомой величины эквивалентного сопротивления изоляции сети  $R_i$  проводится по общеизвестной формуле:

$$R_i = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \cdot \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_1 + U_2}. \quad (8)$$

Сопротивления изоляции отдельных полюсов сети выпрямленного тока  $R_1$  и  $R_2$  равны соответственно:

$$R_1 = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \cdot \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_2}, \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{R_0 \cdot R_V}{R_0 + R_V} \cdot \frac{U_{12} - U_1 - U_2}{U_1}. \quad (10)$$

Можно показать, что формулы (8) – (10) верны, если полюсы сети заменить любыми двумя точками находящимися по противоположных сторонах так называемой нулевой точки батареи (т.е. точки с нулевым потенциалом относительно земли).

### Сети двойного рода тока.

В сетях двойного рода тока определение эквивалентного сопротивления изоляции **целой сети** методом

трех отсчетов вольтметра [4] идентично вышеописанной процедуре для сетей постоянного тока (рис. 3). Итак, вольтметром с известным внутренним сопротивлением  $R_V$  (или с параллельно подключенным добавочным резистором  $R_0$ ) измеряются следующие напряжения:  $U_{12}$  – между полюсами выпрямителя;  $U_1$  – между положительным полюсом и землей;  $U_2$  – между отрицательным полюсом и землей. Искомое значение вычисляется по той же самой формуле (8).

#### Примеры практического применения метода трех отсчетов вольтметра.

Устройство периодического контроля изоляции типа MD-04 (изготовитель C&T Elmech, Польша) [5] (рис. 4) предназначено для определения сопротивления изоляции сетей постоянного тока номинальным напряжением 24, 48, 60, 110 или 220 В. Прибор питается напряжением контролируемой сети. Измерение напряжений проводится автоматически после включения добавочного резистора между землей и каждым полюсом. После измерения установившихся значений напряжений микропроцессорная система вычисляет сопротивление изоляции отдельных полюсов. Оба результата выведены на дисплей. Устройство проводит измерение автоматически после подключения к сети, циклично с периодом избираемым в диапазоне 1 до 120 минут или вручную после двукратного нажатия кнопки. При падении сопротивления изоляции одного или обоих полюсов ниже установленного порога выдается оптический сигнал (диод LED), а затем измерение повторяется еще дважды. При подтверждении результата замыкается выходной контакт. Сигнал выдается тоже по RS485. Погрешность определения сопротивлений изоляции не превышает  $\pm 10\%$ . Время измерения устанавливается в пределе 4 с – 2 мин. Уставку надо выбрать в зависимости от максимальной емкости проводов сети относительно земли.



Рис. 4

Цикл работы устройства показан на приведенных осциллограммах (рис. 5, а, б). На осциллограмме на рис. 5, б следует обратить внимание на переходный процесс нарастания напряжения вызванный емкостью сети (в этом случае его длительность около 2 с).

Именно длительность переходного процесса (при высоких значениях сопротивления и емкости изоляции может достигать даже нескольких десятков секунд) является основным недостатком всех методов отсчета вольтметра. Для его сокращения в системе контроля изоляции типа KDZ-3 (изготовитель ZPrAE, Польша) [6, 7] внедрено дополнительный алгоритм, позволяющий уже на ранней стадии определить установившееся (конечное) значение напряжения данного полюса. Для этого измеряются значения напряжения в начальный момент  $y_0(t_0=0)$  и в следующих интервалах  $y_1(t_1)$  и  $y_2(t_2)$  (рис. 6).

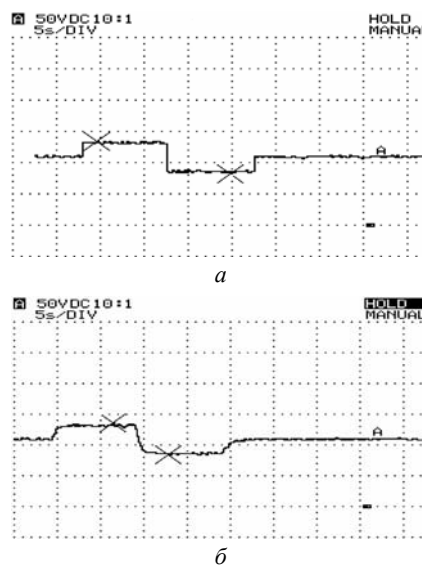


Рис. 5. Осциллограммы колебаний напряжения отрицательного полюса сети (от 85 до 130 В) во время работы устройства MD04: а –  $R_i=45\text{ k}\Omega$ ,  $C_i=0\text{ }\mu\text{F}$ , б –  $R_i=45\text{ k}\Omega$ ,  $C_i=20\text{ }\mu\text{F}$

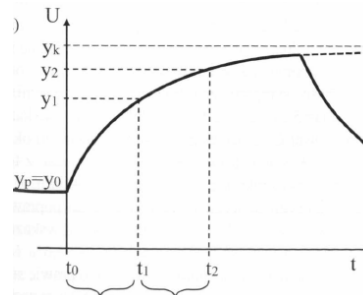


Рис. 6. Начальный участок функции напряжения данного полюса сети при подключении резистора ко второму полюсу

Принимается следующая формула функции этого напряжения  $y(t)$

$$y(t) = y_k - (y_k - y_0)e^{-\frac{t}{T}}, \quad (11)$$

где  $y_k$ ,  $T$  – неизвестные параметры.

Из системы уравнений для  $t_2=2t_1$

$$y_1 = y_k - (y_k - y_0)e^{-\frac{t_1}{T}}; \quad (12)$$

$$y_2 = y_k - (y_k - y_0)e^{-\frac{t_2}{T}},$$

вычисляется искомый параметр – установившееся напряжение данного полюса  $y_k$

$$y_k = \frac{y_0 \cdot y_2 - y_1^2}{y_2 - 2 \cdot y_1 + y_0}. \quad (13)$$

Этим способом можно сократить длительность цикла работы устройства на базе метода трех отсчетов вольтметра даже на 90 %.

**Реле контроля цепей постоянного тока типа РКИ1.** Устройство РКИ1 (изготовитель Чебоксарский электроаппаратный завод) [8] (рис. 7) предназначено для контроля цепей оперативного постоянного тока напряжением 110 и 220 В. Функции устройства включают измерение напряжения сети постоянного тока, сопротивления изоляции цепей постоянного тока (эквивалентного или для каждого полюса) и уровня пульсаций напряжения данной сети. Реле обеспечивает сигнализацию выхода измеренных электрических параметров за установленные пороговые значения.

Внутреннее сопротивление равно 100 кОм. Относительная погрешность определения сопротивления изоляции не превышает 1 %. Устройство может измерять сопротивление изоляции двумя методами: а) методом трех отсчетов вольтметра, б) методом двух вольтметров – вычисление сопротивления по измеренным напряжениям между полюсами сети и землей, которые пропорциональны соответствующим сопротивлениям изоляции. Разумеется, в сети может быть установлено только одно устройство контроля изоляции использующее данный метод. Это требование относится тоже к модулю MD04.



Рис. 7

#### Выводы.

1. В силу своей простоты методы периодического определения сопротивления изоляции относительно земли с помощью вольтметра и резистора получили довольно широкое применение в сетях постоянного и двойного рода тока. Альтернативой для них являются измерительные устройства, основанные на принципе наложения тестового сигнала постороннего источника.

2. Работа устройств на базе метода трех (или двух) отсчетов вольтметра вводит колебания напряжений проводов сети относительно земли. Однако такой же эффект вызывают также устройства с наложением тестового сигнала.

3. Представлен способ значительного сокращения длительности цикла работы устройств, использующих метод двух и трех отсчетов вольтметра.

4. Автором предложена процедура на базе двух отсчетов вольтметра для сетей двойного рода тока. Новизной является измерение среднего значения фазного напряжения в сети переменного тока, питающей диодный выпрямитель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок // Новости электротехники. – 2002. – №1(13). Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/13/22.php>.
2. 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.
3. 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.
4. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок // Новости электротехники. – 2002. – №2(14). Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/14/26.php>.
5. <http://www.elmech.pl/spis-produktow-2>.
6. KDZ-3. System kontroli i lokalizacji doziemien. Режим доступа: [www.zprae.pl/download.php?file=pub/File/KDZ-3.pdf](http://www.zprae.pl/download.php?file=pub/File/KDZ-3.pdf).
7. Opara A. Zastosowanie ekstrapolacji nieliniowej w systemie pomiaru i lokalizacji doziemienia // Wiadomości

Elektrotechniczne. – 2016. – vol.1. – no.2. – pp. 24-27. doi: 10.15199/74.2016.2.5.

8. Реле контроля цепей постоянного тока РКИ-1. Техническое руководство по эксплуатации (Редакция 02 от 01.04.2015). Режим доступа: [http://srza.ru/uploads/catalog/srz\\_rki.pdf](http://srza.ru/uploads/catalog/srz_rki.pdf).

#### REFERENCES

1. Ivanov E., Diachkov A. How to measure correctly insulation resistance of electric systems? *Electrical engineering news*, 2002, no.1(13). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/13/22.php> (Accessed 12 September 2015). (Rus).
2. 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.
3. Olszowiec P. O wyznaczaniu napięć trójfazowych prostowników diodowych. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2015, vol.1, no.10, pp. 33-34. (Pol). doi: 10.15199/74.2015.10.8.
4. Ivanov E., Diachkov A. How to measure correctly insulation resistance of electric systems? *Electrical engineering news*, 2002, no.2(14). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/14/26.php> (Accessed 12 September 2015). (Rus).
5. Available at: <http://www.elmech.pl/spis-produktow-2> (Accessed 25 May 2016). (Pol).
6. KDZ-3. System kontroli i lokalizacji doziemien. Available at: [www.zprae.pl/download.php?file=pub/File/KDZ-3.pdf](http://www.zprae.pl/download.php?file=pub/File/KDZ-3.pdf) (Accessed 10 July 2015). (Pol).
7. Opara A. Zastosowanie ekstrapolacji nieliniowej w systemie pomiaru i lokalizacji doziemienia. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2016, vol.1, no.2, pp. 24-27. (Pol). doi: 10.15199/74.2016.2.5.
8. *Реле контроля цепей постоянного тока РКИ-1. Техническое руководство по эксплуатации* [The relay DC control circuits РКИ-1. Technical Manual]. Available at: [http://srza.ru/uploads/catalog/srz\\_rki.pdf](http://srza.ru/uploads/catalog/srz_rki.pdf) (Accessed 22 September 2015). (Rus).

Поступила (received) 13.08.2016

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](mailto:olpio@o2.pl)

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

#### Low voltage networks insulation monitoring with two and three voltmeter readouts methods.

**Purpose.** In the paper there are described methods of two and three voltmeter readouts for insulation resistance periodic measurement in live DC and AC/DC IT networks. A new measuring method for AC/DC networks is proposed. Application of a novel algorithm for shortening of measurement cycle is explained. **Methodology.** All methods of two and three voltmeter readouts consist in connection of a resistor and measurement of mean value of network's fixed point-to-ground voltages. **Results.** A new algorithm implemented in KDZ-3 device enables determination of steady-state voltage of a DC network's pole much faster than in other exploited systems. **Originality.** In author's modification of two voltmeter readouts method, line-to-ground voltage mean value is measured at AC side of AC/DC network. This innovation has not been applied for implementation of periodic insulation monitoring in AC/DC IT networks yet. **Practical value.** The use of author's innovation will allow to execute measurements at AC side of AC/DC IT networks which might be necessary if rectifier's output circuits are unavailable. Shortening of measurement cycle duration of two or three voltmeter readouts method's is of great importance in networks with high capacitance. References 8, figures 7.

**Key words:** low voltage DC, AC/DC IT networks, insulation resistance, methods of two and three voltmeter readouts.

С.С. Руденко

## ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРАМ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

*На основі аналізу статистичної бази даних з зондування ґрунту та діагностики стану заземлювального пристрою сформульовано вимоги та створено рекомендації щодо вибору приладів для проведення вертикального електричного зондування в залежності від класу напруги енергооб'єкту та довірчої ймовірності. Доведена ефективність вибору приладів на основі оптимальних вимог. Бібл. 7, табл. 6, рис. 5.*

**Ключові слова:** вертикальне електричне зондування, заземлювальний пристрій, ґрунт, енергооб'єкт, технічні вимоги до приладів.

*На основе анализа статистической базы данных по зондированию грунта и диагностики состояния заземляющего устройства сформулированы требования и созданы рекомендации относительно выбора приборов для проведения вертикального электрического зондирования в зависимости от класса напряжения энергообъекта и доверительной вероятности. Доказана эффективность выбора приборов на основе оптимальных требований. Библ. 7, табл. 6, рис. 5.*

**Ключевые слова:** вертикальное электрическое зондирование, заземляющее устройство, грунт, энергообъект, технические требования к приборам.

**Постановка проблемы.** Целью проведения вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) является определение параметров геоэлектрической структуры – электрофизических характеристик (ЭФХ) грунта: количества слоев, их удельного электрического сопротивления (УЭС) и мощности, путем инжектирования переменного тока генератором и измерения падения напряжения на определенном участке поверхности грунта [1-3]. При этом величина разности токовых и потенциальных электродов обуславливается типом установки и требуемой глубиной зондирования. Аппаратура, методика проведения ВЭЗ и средства интерпретации являются хорошо развитыми как теоретически, так и практически в рамках проведения геологических изысканий [4]. Указанные ЭФХ являются исходными данными для определения нормируемых электрических параметров заземляющего устройства (ЗУ), как на этапе проектирования, так и в процессе его эксплуатации [5]. Поэтому определение их с максимальной достоверностью является одной из важнейших задач.

Приборы для проведения ВЭЗ характеризуются электрическими, массогабаритными и технологическими (автономное или сетевое питание, возможность подключения к ПК, влагостойкость) параметрами. В рамках электромагнитной диагностики состояния заземляющего устройства (ЭМД ЗУ) при проведении ВЭЗ основными параметрами средств измерений являются: класс точности, предел измерения, чувствительность, допустимая величина сопротивления токовой и потенциальной цепи, рабочая частота. Также важным требованием к ним является портативность и возможность работы от аккумулятора, так как ВЭЗ выполняется, как правило, на большом удалении от питающей сети. Рабочая частота выбирается близкой к промышленной, но отличающейся от нее для минимизации влияния электромагнитного поля рабочих токов электроустановки. При проведении ВЭЗ в процессе выполнения ЭМД ЗУ, требования к параметрам приборов (пределу измерения, чувствительности и допустимой величине сопротивления измерительной

цепи) и вообще возможность применения конкретной установки ВЭЗ определяются величиной УЭС и геометрическими размерами ЗУ [1, 5], однако в литературе четкие требования к приборам отсутствуют. Поэтому разработка технических требований к приборам для проведения ВЭЗ в зависимости от величины УЭС грунта и требуемой глубины зондирования является актуальной задачей. Разработку указанных требований предлагается осуществить на основании анализа базы данных проведения ВЭЗ в различных регионах Украины вблизи места расположения энергетических объектов классом напряжения 35 – 750 кВ [5]. Наличие статистических данных об УЭС грунта и размеров ЗУ позволяют сделать вероятностную оценку применимости приборов по их техническим параметрам, при этом следует учесть, что класс напряжения является определяющим для геометрических размеров электроустановки.

**Целью работы** является разработка научно обоснованных требований к техническим характеристикам приборов для проведения ВЭЗ в рамках выполнения ЭМД ЗУ на основании ЭФХ грунтов для энергообъектов Украины различных классов напряжения.

При формировании требований к приборам для проведения ВЭЗ при ЭМД ЗУ необходимо решить ряд задач в следующей последовательности:

- выполнить статистический анализ УЭС слоев грунта с целью определения вероятности попадания значения УЭС в один из доверительных интервалов;
- оценить требуемую глубину зондирования;
- провести статистический анализ размеров ЗУ для различных классов напряжения;
- определить допустимые величины нижнего и верхнего пределов измерений прибора;
- определить допустимую величину сопротивления измерительной цепи;
- сформулировать обобщенные технические требования к приборам.

**1. Статистический анализ УЭС слоев грунта.** Для проведения статистического анализа УЭС

© С.С. Руденко



использовалась база данных результатов ВЭЗ, составленная за 7 лет работы с 2007 по 2014 гг. [6]. Указанные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Соотношение УЭС			УЭС слоя $\rho_i$ , Ом·м			Мощность УЭС	
	$\rho_1/\rho_2$	$\rho_2/\rho_3$	$\rho_1/\rho_3$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$h_1$ , м	$h_2$ , м
Среднее	5,12	6,03	12,11	183,9	136,93	67,63	0,79	5,46
Медиана	2,75	2,29	4,31	75	29	18	0,45	4
Мода	5	0,5	2	200	15	30	0,2	10
Минимум	0,017	0,004	0,018	3,0	1,2	0,3	0,02	0,01
Максимум	83,3	416,7	625	8700	7000	9000	10	35
Выборка	612	592	592	612	612	592	612	592

Анализ данных, приведенных в табл. 1 [6] минимальных и максимальных значений УЭС различных слоев показал, что приборы для проведения ВЭЗ при диагностике состояния ЗУ, должны обеспечивать измерение УЭС от 0,3 до 9000 Ом·м.

Такой широкий диапазон измерений, с учетом большого разброса требуемой глубины зондирования (она варьируется от нескольких десятков до нескольких сотен метров в зависимости от размеров ЗУ объекта), приводит к увеличению стоимости прибора и большим массогабаритным показателям, а также к необходимости наличия вблизи места проведения ВЭЗ сети или мобильного источника питания (например, дизельного генератора). Однако, следует отметить, что данные значения являются предельными и охватывают все 100 % грунтов и подстанций Украины всех классов напряжения. Для того, чтобы оценить оптимальные требования, воспользуемся гистограммами распределения значений ЭФХ, приведенных в табл. 1 из [6]. Их анализ показывает, что при рассмотрении значений УЭС, как единой совокупности данных и расчете относительной частоты, находящиеся в пределах  $\rho \in [3; 9000]$  Ом·м охватывает 99 % случаев,  $\rho \in [3; 2000]$  Ом·м – 98 % случаев, а  $\rho \in [5,5; 2000]$  Ом·м – 97 %, что может позволить значительно уменьшить требуемый интервал измеряемых значений. Наиболее часто встречающиеся мощности (99 % случаев) лежат в пределах для  $h_1 \in [0,1; 7,5]$  м и для  $h_2 \in [0,5; 30]$  м.

**2. Оценка требуемой глубины зондирования.** В [1, 7] показано, что размер ЗУ фактически определяет требуемую глубину зондирования. Однако, как показывает анализ литературы, проведенный в [6], четкая зависимость между размером ЗУ и требуемой глубиной зондирования отсутствует, а зависимость разнеса токовых электродов была получена С.И. Кострубой лишь для установки Бургдорфа еще в 1983 г.:

$$L_C = K_{VES} \sqrt{S}, \quad (1)$$

где  $L_C$  – расстояние между токовыми электродами, м;  $K_{VES}$  – коэффициент между геометрическим размером подстанции и разнесом электродов, изменяющийся от 1 до 3 в зависимости от площади ЗУ ( $S$ ), м<sup>2</sup>.

Однако в литературе не приведена подобная или какая-либо иная зависимость для остальных установок ВЭЗ (в частности для наиболее распространенной установки Веннера).

В [1, 7] приведены некоторые данные по исследованию требуемой глубины зондирования, полученные при изучении зависимости величины сопротивления ЗУ от его площади. Из анализа указанных работ следует вывод о необходимости определения строения грунта, как минимум, на глубине порядка  $\sqrt{S}$  при уменьшении УЭС с ростом глубины, а при увеличении УЭС нижележащих слоев – необходима информация о строении грунта на глубине нескольких  $\sqrt{S}$ .

Кроме того, важным практическим вопросом является глубинность установки, т.е. зависимость глубины зондирования конкретной установки от величины разнеса токовых (или потенциальных) электродов. Глубинность зондирования различными установками ВЭЗ изучается более восьмидесяти лет начиная с 30-х гг. прошлого века и данный вопрос претерпел 3 основных этапа своего развития: в 30-е гг. им занимался К. Шлюмберже, в 1970 г. – Рой и Аппаро и последний этап исследований, начавшийся в конце 80-х гг. с работы Баркера и длящийся до сих пор [3]. Основными способами оценки глубинности на данный момент являются: зависимость плотности тока от глубины, производной плотности тока от глубины, функция Меррика, а также использование формул Дар-Заррук. При этом для плотности тока берется убывание его значения до 50-80 %, а для зависимости производной плотности тока от глубины и функции Меррика берутся их экстремумы. В соответствии с приведенными данными в работах по геофизическим изысканиям глубинность для установки Шлюмберже (установка Веннера является фактически ее частным случаем) в долях от разнеса токовых электродов меняется от  $1/10 L_C$  до  $1/2,5 L_C$ , при этом в литературе [3] известны случаи, когда глубинность уменьшается до  $1/200 L_C$  под влиянием макроанизотропии и соотношения УЭС слоев.

Таким образом, в работах, посвященных проведению ВЭЗ в целях проектирования или диагностики ЗУ, существует неоднозначная информация о требуемой глубине зондирования, которая должна определяться размерами ЗУ и УЭС грунта. В рамках данной работы примем допущение, традиционное для практики проведения ВЭЗ в целях проектирования и диагностики ЗУ: глубинность зондирования установкой Веннера равна одной трети величины разнеса токовых электродов (т.е. межэлектродному расстоянию между двумя ближайшими электродами  $L_e$ ). Учитывая, что вопрос требуемой глубины зондирования все еще не имеет однозначного решения, а в практике ЭМД ЗУ для проведения измерения сопротивления ЗУ и напряжения прикосновения используется расстояние  $(1,5 - 3)D$ , где  $D$  – наибольшая диагональ ЗУ, то в работе рассмотрим требуемую глубину зондирования в пределах от одной до трех  $D$ . Поэтому для установки Веннера будет справедливым выражение:

$$L_e = K_{VES} D, \quad (2)$$

где  $K_{VES}$  лежит в пределах от 1 до 3.

При этом выражение (1) для определения расстояния между токовыми электродами соответственно примет вид:

$$L_C = 3K_{VES} D. \quad (3)$$

**3. Статистический анализ размеров ЗУ для различных классов напряжения.** Размер ЗУ, как указывалось ранее, определяет требуемую глубину зондирования при проведении ЭМД ЗУ. На рис. 1 приведена гистограмма процентного распределения  $f$  наибольшей диагонали  $D$  для 963 электрических подстанций, диагностика состояния ЗУ которых была проведена в период с 1999 по 2015 гг.

Из анализа рис. 1 следует, что для 58 % ЗУ значение наибольшей диагонали лежит в пределах 10-100 м, т.е. величина разности токовых электродов при применении установки Веннера, согласно (3), составляет 90 – 900 м (при коэффициенте разноса  $K_{VES} = 3$ ) и может быть реализована на практике.

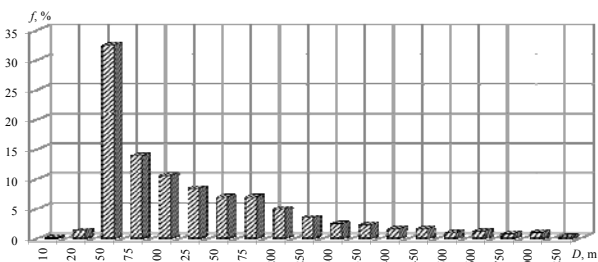


Рис. 1. Плотность вероятности значений наибольшей диагонали  $D$  ЗУ энергообъектов Украины

На рис. 2 – 5 приведены гистограммы процентного распределения  $f$  длины наибольшей диагонали по различным классам напряжения.

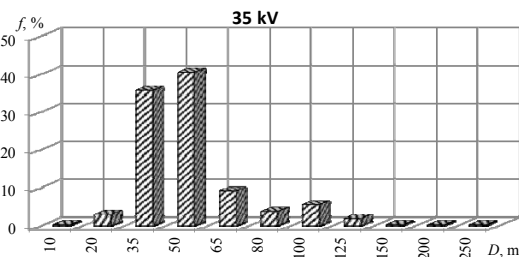


Рис. 2. Плотность вероятности максимального размера  $D$  ЗУ подстанции 35 кВ

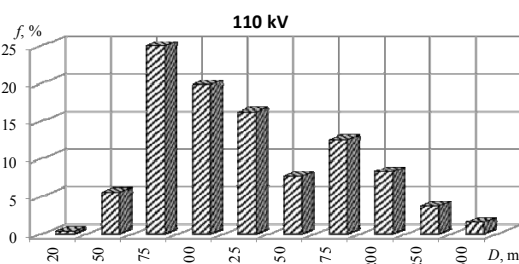


Рис. 3. Плотность вероятности максимального размера  $D$  ЗУ подстанции 110 кВ

Исходя из гистограмм, представленных на рис. 2 – 4, в табл. 2 приведены данные по максимальным размерам диагоналей ЗУ для доверительного интервала с уровнем доверия  $\gamma$  равным 50 %, 80 %, 90 % и 99 % обследованных энергообъектов соответствующих классов напряжения. Например, это значит, что 80 % подстанций классом напряжения  $U = 110$  кВ имеют максимальную длину диагонали ЗУ  $D \leq 160$  м, а  $D \leq 250$  м у 99 % подстанций указанного класса напряжения.

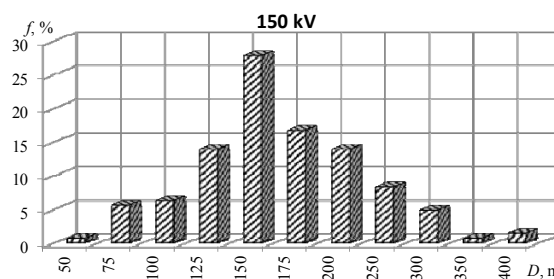


Рис. 4. Плотность вероятности максимального размера  $D$  ЗУ подстанции 150 кВ

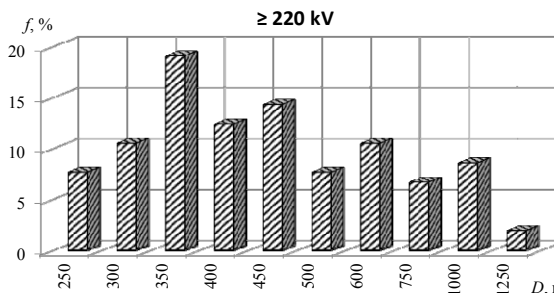


Рис. 5. Плотность вероятности максимального размера  $D$  ЗУ подстанции 220 кВ и выше

Таблица 2

Класс напряжения $U$ , кВ	Значение максимального размера ЗУ $D$ , м			
	$\gamma = 50 \%$	$\gamma = 80 \%$	$\gamma = 90 \%$	$\gamma = 99 \%$
35	40	50	80	125
110	100	160	185	250
150	140	180	220	350
$\geq 220$	400	600	800	1250

Таким образом, полученные значения указывают на значительный разброс максимальной диагонали ЗУ для энергообъектов различного класса напряжения, но при этом позволяют оценить допустимую величину нижнего предела измерения при задании уровня доверия для соответствующего класса напряжения.

**4. Определение допустимых величин нижнего и верхнего пределов измерения прибора.** Значение кажущегося УЭС всегда будет находиться в интервале между минимальным и максимальным значением УЭС слоев геоэлектрической структуры, поэтому для определения технических требований к приборам для проведения ВЭС с помощью установки Веннера и их вероятностной оценки воспользуемся определенными ранее [6] статистическими данными ЭФХ. Исходя из выражения для кажущегося УЭС установки Веннера и расстояния между электродами, измеряемое предельное значение сопротивления  $R_{lim}$  можно записать в виде:

$$R_{lim} = \frac{\rho}{2\pi L_e}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – кажущееся значение УЭС.

Для определения нижнего предела измерения используем минимальное значение УЭС первого слоя, взятое из табл. 1, а межэлектродное расстояние  $L_e$  вычислим по формуле (2), где длина наибольшей диагонали ЗУ  $D$  из табл. 2 при соответствующем уровне доверия.

В табл. 3 приведены значения нижнего предела измерения прибора  $R_{lim}$ , при  $K_{VES} = 1-3$ . Полученные значения показывают, что, например, при проведении



ВЭЗ на глубину зондирования равную одной диагонали энергообъекта ( $K_{VES} = 1$ ) для 90 % энергообъектов классом напряжения 110 кВ прибор должен иметь нижний предел измерения не более 2,6 мОм.

Таким образом, полученные данные позволяют оценить применимость прибора для проведения ВЭЗ по его нижнему пределу измерения для энергообъектов различного класса напряжения с учетом трех принятых величин межэлектродного расстояния.

Таблица 3

Уровень доверия $\gamma, \%$	Межэлектродное расстояние $L_e$	Нижний предел измерения прибора $R_{l,lim}$ , мОм, для классов напряжения:			
		$U = 35$ кВ	$U = 110$ кВ	$U = 150$ кВ	$U \geq 220$ кВ
50 %	3D	4	1,6	1,1	0,4
	2D	6	2,4	1,7	0,6
	D	11,9	4,8	3,4	1,2
80 %	3D	3,2	1	0,9	0,3
	2D	4,8	1,5	1,3	0,4
	D	9,5	3	2,7	0,8
90 %	3D	2	0,9	0,7	0,2
	2D	3	1,3	1,1	0,3
	D	6	2,6	2,2	0,6
99 %	3D	1,3	0,6	0,5	0,1
	2D	1,9	1	0,7	0,2
	D	3,8	1,9	1,4	0,4

Для определения верхнего предела измерения и сопротивления измерительных электродов зададимся несколькими уровнями доверия (95 %, 99,9 % и 100 %) и рассмотрим соответствующие им значения УЭС первого слоя:

- 600 Ом·м (доверительный интервал охватывает до 95 % значений  $\rho_1$ );
- 2000 Ом·м (доверительный интервал охватывает до 99,9 % значений  $\rho_1$ );
- 9000 Ом·м (доверительный интервал охватывает 100 % значений  $\rho_1$ ).

Для определения верхнего предела измерения следует рассмотреть наименьшую величину межэлектродного расстояния  $L_e$ , которая определяется из условия  $L_e \geq 3t$  и  $L_e \geq 6r_0$ , где  $t$  и  $r_0$  – глубина погружения и радиус электрода соответственно. Как правило, в практике ЭМД ЗУ  $L_{min}$  составляет 0,2 м. Результаты расчета с использованием (2), с учетом величины УЭС и заданными уровнями доверия, приведены в табл. 4.

Таблица 4

УЭС грунта $\rho_{max}$ , Ом·м	Уровень доверия $\gamma, \%$	Верхний предел измерения прибора $R_{up,lim}$ , Ом
600	95,0	480
2000	99,9	1600
9000	100,0	7170

Полученные результаты устанавливают вероятностную зависимость для верхнего и нижнего пределов измерения приборов для проведения ВЭЗ при ЭМД ЗУ энергетических объектов Украины, и существенное увеличение указанных в табл. 3 и 4 пределов

(что, как правило, сопряжено со значительным увеличением мощности и стоимости прибора) в большинстве случаев может быть неоправданно.

**5. Определение допустимой величины сопротивления измерительной цепи прибора.** При нахождении допустимого сопротивления токовой и потенциальной цепей рассмотрим электрод радиусом  $r_0$ , погруженный вертикально в грунт на глубину  $t$ . Так как ограничиваемой величиной является максимально возможное сопротивление электрода, то оценку следует выполнить для максимального значения УЭС однородного грунта, в котором указаный электрод, как известно [7], имеет сопротивление:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{2t}{r_0}, \quad (5)$$

При проведении ВЭЗ в рамках ЭМД ЗУ автором совместно с сотрудниками НИПКИ «Молния» используются электроды радиусом от 4 мм до 10 мм, которые забиваются в процессе измерения на глубину от 50 до 500 мм.

Результаты расчета сопротивления измерительного электрода для УЭС и доверительных интервалов из табл. 4 приведены в табл. 5.

Таблица 5

УЭС грунта $\rho$ , Ом·м	Уровень доверия $\gamma, \%$	Глубина погружения электрода $t$ , м	Сопротивление измерительного электрода $R_e$ , Ом:	
			при $r_0 = 4$ мм	при $r_0 = 10$ мм
600	95,0	0,05	6150	4400
		0,1	3740	2870
		0,2	2200	1770
		0,3	1600	1310
		0,5	1060	880
2000	99,9	0,05	20500	14660
		0,1	12460	9540
		0,2	7330	5880
		0,3	5320	4350
		0,5	3520	2940
9000	100,0	0,05	92220	65970
		0,1	56040	42920
		0,2	32990	26420
		0,3	23930	19550
		0,5	15820	13200

Полученные данные позволяют сформулировать требования к допустимому сопротивлению измерительной цепи приборов для проведения ВЭЗ, а также учесть диаметр измерительных электродов и глубину их погружения.

**7. Формулировка обобщенных технических требований к приборам.** Оценивая характеристики прибора, можно сделать вывод о применимости его с определенной вероятностью с учетом наибольшей длины диагонали ЗУ и класса напряжения энергообъекта. Для этого перейдем от доверительного уровня  $\gamma$  к доверительной вероятности  $P$  (вероятности охватываемости).  $P$  получена, исходя из свойства вероятности о наступлении трех независимых событий, и определяется согласно выражению (6):

$$P = P_{l,lim} \cdot P_{up,lim} \cdot P_C, \quad (6)$$

где  $P_{l,lim}$  – доверительная вероятность на основании табл. 3;  $P_{up,lim}$  – доверительная вероятность на основании табл. 4;  $P_C$  – доверительная вероятность на основании табл. 5.

В табл. 6 приведены обобщенные вероятностные требования к характеристикам прибора для проведения ВЭЗ. При этом учтено, что на практике при проведении ВЭЗ глубина погружения измерительных электродов  $t$  в среднем составляет 0,2 м, а сопротивление самой измерительной цепи  $R_c$  будет равно удвоенному сопротивлению электрода  $R_e$  из табл. 5.

Таблица 6

Класс напряжения $U$ , кВ	$R_c$ , кОм	$R_{up,lim}$ , кОм	$R_{l,lim}$ , мОм		
			$L_e = D$	$L_e = 2D$	$L_e = 3D$
При доверительной вероятности $P = 0,791$					
35	15	1,6	9,5	4,8	3,2
110			3,0	1,5	1,0
150			2,7	1,3	0,9
$\geq 220$			0,8	0,4	0,3
При доверительной вероятности $P = 0,899$					
35	66	6,4	6,0	3,0	1,3
110			2,6	1,3	0,6
150			2,2	1,1	0,5
$\geq 220$			0,6	0,3	0,1
При доверительной вероятности $P = 0,99$					
35	66	7,2	3,8	1,9	1,3
110			1,9	1,0	0,6
150			1,4	0,7	0,5
$\geq 220$			0,4	0,2	0,1

Рассмотрим на примере применение табл. 6 при выборе прибора для проведения ВЭЗ для подстанций классом напряжения:

1)  $U = 35$  кВ. В качестве исходных данных задан:

- величиной межэлектродного расстояния равно трем диагоналям ЗУ ( $L_e = 3D$ );
- доверительной вероятностью  $P = 0,99$ .

Следовательно, для подстанций классом напряжения 35 кВ при заданных параметрах прибор должен иметь диапазон измерений от 1,3 мОм до 7,2 кОм и допускать сопротивление токовой и потенциальной цепей до 66 кОм.

2)  $U = 150$  кВ. В качестве исходных данных задан:

- величиной межэлектродного расстояния, равного двум диагоналям ЗУ ( $L_e = 2D$ );
- доверительной вероятностью  $P = 0,899$ .

Следовательно, для подстанций классом напряжения 150 кВ при заданных параметрах прибор должен иметь диапазон измерений от 1,1 мОм до 6,4 кОм и допускать сопротивление токовой и потенциальной цепей до 66 кОм.

#### Выводы.

В работе впервые применен статистический подход для оценки оптимальных технических требований к приборам для проведения ВЭЗ в целях ЭМД ЗУ энергетических объектов Украины. Полученные ранее статистические данные по УЭС грунта позволили

разбить значительный диапазон значений УЭС на ряд доверительных интервалов, характеризующихся доверительной вероятностью охватывания.

Для оценки требуемой глубины зондирования в работе проанализированы статистическое распределение длины наибольшей диагонали ЗУ по классам напряжения. Зависимости значения нижнего предела приборов от класса напряжения и заданной величины уровня доверия определены исходя из требуемой глубины зондирования и статистических данных о наибольшей диагонали ЗУ действующих энергетических объектов Украины, а значения верхнего предела – исходя из статистического распределения УЭС для соответствующего уровня доверия.

Результаты, полученные в работе, устанавливают вероятностную взаимосвязь между техническими характеристиками прибора, фактической глубиной зондирования установкой Веннера (межэлектродным расстоянием) и классом напряжения объекта. Это позволяет оптимально выбрать прибор в зависимости от конкретных параметров объекта, так как некорректный выбор прибора приводит или к невозможности проведения полноценных измерений, или к значительному увеличению стоимости и массогабаритных характеристик прибора. Установлено, что прибор для проведения ВЭЗ в рамках ЭМД состояния ЗУ энергообъектов Украины для охватывания всех классов напряжения и возможных значений УЭС грунта должен иметь предел измерения от 0,1 мОм до 7,2 кОм и допускать сопротивление измерительной цепи до 66 кОм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух М.А., Забусов В.В., Пантелеев В.И. Системный подход к оценке заземляющих сетей электроустановок серверных промышленных комплексов. – Красноярск: СФУ, 2009. – 164 с.
2. Hördt A. Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik. – Braunschweig: Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, 2006. – 11 s.
3. Шевнин В.А., Колесников В.П. Оценка глубинности ВЭЗ для однородной и слоистой среды // Георазрез. – 2011. – №1(8). – С. 1-9. – Электронный ресурс / Режим доступа: [http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otsenka\\_glubinnosti\\_VEZ.pdf](http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otsenka_glubinnosti_VEZ.pdf).
4. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Научный мир, 2007. – 248 с.
5. Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
6. Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
7. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение): справочник / [Борисов Р.К., Горшков А.В., Жарков Ю.В. и др.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.

#### REFERENCES

1. Averbukh M.A. Zabusov V.V., Pantelev V.I. *Sistemnyi podkhod k otsenke zazemliaushchikh setei elektroustanovok*

severnykh promyshlennykh kompleksov [The systematic approach to the evaluation of grounding grids electrical installations of northern industrial complexes]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2009. 164 p. (Rus).

2. Hördt A. *Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik*. Technische Universität Braunschweig Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, 2006. 11 p. (Ger).

3. Shevnin V.A., Kolesnikov W.P. Rating depth VES for the uniform and layered medium. *Electronic Journal «GEORazrez»*, 2011, no.1(8), pp. 1-9. Available at: [http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otcenka\\_glubinnosti\\_VEZ.pdf](http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otcenka_glubinnosti_VEZ.pdf) (Accessed 10 November 2013). (Rus).

4. Kolesnikov V.P. *Osnovy interpretatsii elektricheskikh zondirovaniy* [Fundamentals of electrical sounding interpretation]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2007. 248 p. (Rus).

5. Koliushko G.M., Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 65-70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.

6. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.

7. Borisov R.K., Gorshkov A.V., Zharkov Y.V. *Zazemliayushchie ustroystva elektroustanovok (trebovaniia normativnykh dokumentov, raschet, proektirovanie, konstruktzii, sooruzhenie): spravochnik* [The grounding system of electrical installations (regulatory requirements, calculation, design, construction: Handbook)]. Moscow, Publishing House MEI, 2013. 360 p. (Rus).

Поступила (received) 02.09.2016

Руденко Сергей Сергеевич, аспирант, м.н.с.,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
e-mail: nio5\_molnaya@ukr.net

S.S. Rudenko

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

#### Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices.

**Purpose.** Creation the scientific requirements for technical characteristics of equipment for vertical electrical sounding based on the electrophysical characteristics of the soil of energy objects with the different voltage classes. **Methodology.** In work used statistical methods for the analysis database of results the soil sounding and for receiving distribution of largest size of the grounding system. To determine the required range of measurement and permissible value of circuit resistance applied the mathematical description of the electromagnetic field to calculate the apparent resistivity of the soil and the Wenner method of calculating the resistance of a vertical electrode. Also, in work used elements of probability theory to creation the stochastic correlation between device parameters and characteristics object of the research. **Results.** In the paper found that in the most severe cases (when the depth of sounding is the three maximal diagonal of grounding) at 99% energy objects in Ukraine the lower limit of resistance measurement for the respective classes of voltage must be no more than 1.3 milliohms to 35 kV, 0.6 mOhm to 110 kV, 0.5 milliohms to 150 kV, 0.1 mOhm for  $\geq 220$  kV. Also it proved that the measurement equipment for vertical electrical sounding when performing electromagnetic diagnostics of grounding system the power facilities Ukraine with 35-750 kV voltage class for all possible values of soil resistivity should be with limit of measurement from 0.1 mOhm to 7.2 kOhm and resistance measuring circuit to 66 kOhm. **Originality.** For the first time used a statistical approach to evaluate the optimal technical requirements for equipment the soils resistivity when performing diagnostics of grounding systems energy objects of Ukraine. The results obtained in this work, establish the probabilistic dependence of the technical characteristics of measuring equipment from the actual depth of sounding in Wenner's configuration (the distance between electrodes) and from the voltage class of object. **Practical value.** The obtained results allow depending on the specific parameters of the object optimally select the equipment. This technique allows you to create a range of equipments with optimal cost and overall dimensions depending on the region (considering to a significant spread of values of soil resistivity) and on the voltage class of investigated object. References 7, tables 6, figures 5.

**Key words:** vertical electrical sounding, grounding device, soil, energy object, technical requirements for equipment.