

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 4 (21)

Декабрь 2018

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией

Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, НПЦ «Алмаз-Фазотрон», Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.П. РУБЦОВ	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, КТИ, Камышин
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.О. ЮДИНА	ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 4 (21)

December 2018

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией

Editor-in-Chief:

Assistant to the Editor-in-Chief:

Chief Executive Officer

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY

N.V. BEKRENEV

Yu.V. GULYAEV

V.B. DEMIDOVICH

L.S.ZIMIN

S.G. KALGANOVA

V.A. KOLOMEITSEV

V.N. LYASNIKOV

A.N. MAKAROV

G.A. MOROZOV

Yu. P. PERELIGIN

A.F. REZCHIKOV

I. V. RODIONOV

V.P. RUBTSOV

F.N. SARAPULOV

Yu. B. TOMASHEVSKY

S.V. TRIGORLY

G.G. UGAROV

V.N. KHMELEV

V.A. TSAREV

V.O. YUDINA

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St.Petersburg

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Dr.Sc., Professor, JSC Scientific-Production Center «Almaz-Phazotron», Saratov

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Dr.I.Sc., Professor, Penza State University, Penza

Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov

Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Dr.Sc., Professor, Kamishin

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А.** Высокочастотная колебательная система для распыления жидкостей 5
- Злобина И.В.** Низкотемпературная упрочняющая модификация отвержденных полимерных композиционных материалов в СВЧ электромагнитном поле 16
- Артюхов Д.И., Киселев Н.В., Горшков Н.В., Ковынева Н.Н., Бурмистров И.Н.** Исследование зависимости эффективности термоэлектрической ячейки от концентрации электролита 24

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Менщиков И.А.** Разработка методики выявления диагностического признака из спектра тока тягового РТ-51М электропривода электропоезда переменного тока серии ЭР-9^Т 30
- Николаев Е.В.** Модели одинарных схем испытаний тяговых двигателей локомотивов при различных типах возбуждения 36

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Васильев П.Ф., Кобылин В.П.** Протяженные электропередачи на северо-востоке России 47
- Шевченко Н.Ю., Угаров Г.Г., Кириллова С.Н., Лебедева Ю.В.** Обзор и анализ конструктивных особенностей проводов воздушных линий электропередачи с повышенной стойкостью к гололедно-ветровым нагрузкам 53
- Артюхов И.И., Земцов А.И., Куркин С.А., Борисенко А.И.** Система электропитания группы пакетированных магнетронов промышленного назначения 64
- Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н.** Емкостное заземление нейтрали силовых трансформаторов для защиты от воздействия возмущений космической погоды 73

ЭЛЕКТРОНИКА

- Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я.** Разработка новых технологий получения высокоэффективных полевых источников электронов на кремниевых кристаллах 79
- Яфаров Р.К., Нефедов Д.В.** Исследование влияния плотности планарноторцевого структурирования на автоэмиссионные характеристики катодных матриц 86
- Тищенко О.Д., Тищенко А.А., Белова И.В., Зоркин А.Я., Горбунова Е.Н.** Исследование влияния электротермических процессор на структуру лезвий автоэмиссионных танталовых шайб комбинированных катодов приборов М-типа 92
- Миргородская Е.Е., Колчев В.А., Митяшин Н.П., Фурсаев М.А., Карнаухов Е.Д.** Влияние погрешности реализации уровней напряжения в многоуровневых инверторах на нарушение симметрии выходной системы напряжений 97

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Злобина И.В.** Влияние ультразвука на процесс упрочнения отвержденных углепластиков в СВЧ электромагнитном поле 103
- Маркелова О.А., Лясникова А.В.** Исследование электротехнологических процессов формирования покрытий с прогнозируемой пористостью 109

ИЗМЕРЕНИЯ

- Безкорвайный В.С., Тарасенко О.В., Яковенко В.В., Креселюк Ю.В.** Оптимизация геометрических параметров магнитной системы ферромодуляционных датчиков неоднородных магнитных полей 115

ЛЕТОПИСЬ

- Архангельский Ю.С.** Научно-техническому журналу «Вопросы электротехнологии» – пять лет 123
- К сведению авторов 127

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A.** High-frequency vibration system for liquid atomization.....5
- Zlobina I.V.** Low-temperature hardening modification of cured polymer composite materials in the microwave electromagnetic field.....16
- Artyukhov D.I., Kiselev N.V., Gorshkov N.V., Kovyneva N.N., Burmistrov I.N.** A research into dependence of thermoelectrochemicals efficiency on electrolyte concentration24

ELECTROMECHANICS

- Menshikov I.A.** A method for identifying a diagnostic property from a spectrum of the traction RT-51M ac electric motor of the ER-9T series30
- Nikolaev E.V.** Models of single test patterns for locomotive traction motors under various motor field types36

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Davydov G.I., Khoiutanov A.M., Vasilyev P.F., Kobylin V.P.** Long-distance power transmission lines in the north-east of Russia47
- Shevchenko N.Yu., Ugarov G.G., Kirilova S.N., Lebedeva Yu.V.** A review and design features analysis of overhead transmission lines with increased strength against ice and wind loading53
- Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Kurkin S.A., Borisenko A.I.** A power supply system of packaged industrial magnetrons group.....64
- Vakhnina V.V., Kuvshinov A.A., Chernenko A.N.** Capacitive neutral grounding of power transformers against space weather disturbances.....73

ELECTRONICS

- Yafarov R.K., Shanigin B.Ya.** Advanced technologies for highly efficient field resources of electrons in silicon crystals79
- Yafarov R.K., Nefedov D.V.** Density impact of planar-end structuring on self-emission characteristics of the matrix cathode.....86
- Tishchenko O.D., Tishchenko A.A., Belova I.V., Zorkin A.Ya., Gorbunova E.N.** Effect of electro-thermal processes on the blades structure of autoemission tantalum washers of combined cathodes in m-type devices92
- Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Fursaev M.A., Karnaukhov E.D.** The influence of voltage rate errors in multilevel inverters on the symmetry of the output voltage system97

MATERIALS SCIENCE

- Zlobina I.V.** Effect of ultrasound on hardening the cured carbon fiber-reinforced plastic in the microwave electromagnetic field103
- Markelova O.A., Lyasnikova A.V.** Research of electrotechnological processes of forming coatings with predicted porosity.....109

MEASUREMENTS

- Beskorovainy V.S., Tarasenko O.V., Yakovenko V.V., Kreselyuk Yu.V.** Mathematical modeling of soliton perturbations of the core of a charged dislocation in n-type semiconductor115

CHRONICLE

- Arkhangelsky Yu.S.** Scientific and technical journal «Electrotechnics» celebrating its 5th anniversary.....123
- Information for Authors127

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 534.134

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров

HIGH-FREQUENCY VIBRATION SYSTEM FOR LIQUID ATOMIZATION

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov

Приводится решение проблемы обеспечения высокопроизводительного, тонкодисперсного ультразвукового распыления за счет создания новой конструкции пьезоэлектрической колебательной системы ультразвукового распылителя, предназначенной для работы на частотах 120...250 кГц. Создана и реализована ультразвуковая колебательная система, обеспечивающая формирование высокодисперсных аэрозолей с размерами капель 10...17 мкм при производительности распыления 54 мл/мин на 120 кГц и 14 мл/мин на 250 кГц при потребляемой электрической мощности не более 10 Вт для 120 кГц и 3 Вт для 250 кГц. Существенное улучшение параметров распыления было достигнуто за счет увеличения площади распылительной поверхности (2 см² для 120 кГц и 0,5 см² для 250 кГц) и обеспечения амплитуд колебаний до 15 мкм на частоте 120 кГц и 10 мкм на 250 кГц.

Ключевые слова: ультразвук, преобразователь, рабочий инструмент, распыление, диспергирование, колебательная система

Ультразвуковое распыление жидкостей благодаря ряду достоинств (возможность обеспечения без распылительных агентов необходимой производительности и дисперсности при высокой степени однородности) получило очень широкое применение:

The article is devoted to the problem of providing highly productive and finely dispersed ultrasonic atomization due to construction of an advanced piezoelectric vibrating system for the ultrasonic atomizer intended to operate at the frequencies of 120...250 kHz. The result of the study is the development and practical realization of the ultrasonic vibration system generating highly dispersed aerosols with the size of the drops about 10...17 microns under atomization productivity at 54 ml/min for 120 kHz and 14 ml/min for 250 kHz, and consumption capacity of no more than 10 W for 120 kHz and 3 W for 250 kHz. An essential improvement of the atomization parameters was achieved due to the increase of the area of the atomizing surface (2 cm² for 120 kHz and 0.5 cm² for 250 kHz), and by providing the vibration amplitudes up to 15 microns at the frequency of 120 kHz and 10 micron at 250 kHz.

Keywords: ultrasound, transducer, working tool, atomization, dispersion, vibrating system

ание: аэрозольные ингаляции, распыление дезинфицирующих составов, получение высокодисперсных порошков, ускорение химических реакций между жидким и газообразным реагентами, нанесение покрытий, микроинкапсуляция и т. д. При этом

наиболее востребованным на сегодняшний день является формирование высокодисперсных аэрозолей с размерами капель порядка 10...20 мкм [1-10].

Известно, что диаметр формируемых капель определяется частотой колебаний и может быть определен при помощи выражения (1), полученного Р. Дж. Лангом [11]:

$$d_p = 0.34 \cdot \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, н/м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; f – частота УЗ колебаний, Гц.

Из выражения (1) следует, что для формирования аэрозолей со средним диаметром капель около 20 мкм частота ультразвуковых колебаний должна составлять более 100 кГц, а для 10 мкм и менее частота ультразвуковых колебаний должна быть более 250 кГц (все расчеты проведены для воды) [12]. Создание пьезоэлектрических преобразователей на такие частоты технических трудностей не представляет. Однако для распыления жидкостей с излучающей поверхностью таких преобразователей необходимы амплитуды колебаний не менее 10 мкм. Обеспечить такие амплитуды удастся только за счет механических концентраторов, выполняемых в виде металлических стержней переменного диаметра и, соответственно, существенного уменьшения диаметра излучающей поверхности ультразвукового распылительного устройства (до 1-2 мм, то есть площадь не более 0,03 см²) [12-13].

К сожалению, производительность распыления с единицы колеблющейся поверхности обратно пропорциональна частоте ультразвуковых колебаний, то есть увеличение частоты до 100 – 250 кГц приводит к существенному снижению производительности (менее 0,5-1,0 мл/мин) в сравнении с распылением на частотах 22-44 кГц (более 60 мл/мин) [12, 13]. Однако современные высокотехнологичные производства требуют высокой дисперсности (формирования частиц с размером менее 20 мкм) при повышенной не менее чем в 10 раз производительности распыления [1-10, 14-16].

Известные распылительные системы [Sono-Tek, Sonics, Sonaer (USA), Misonix] не способны обеспечить указанные требования к дисперсности и производительности формирования аэрозолей, что обуславливает необходимость разработки высокочастотных ультразвуковых колебательных систем с увеличенной поверхностью распыления.

Существующие конструкции колебательных систем ультразвуковых распылителей. Основой большинства используемых конструкций ультразвуковых колебательных систем для распыления жидкостей является преобразователь Ланжевена [17, 18]. Такой преобразователь компактен, обладает высоким КПД, а при использовании концентрирующей рабочей накладки обеспечивает увеличение амплитуды колебаний до 10 раз [19, 20]. Эскиз пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена представлен на рисунке 1а.

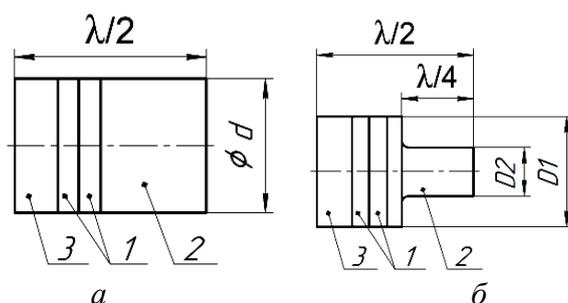


Рис. 1. Эскиз пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена: а – эскиз пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена; б – пьезоэлектрический преобразователь с излучающей накладкой в виде ступенчатого концентратора (1 – пьезоэлектрические элементы; 2 –излучающая накладка; 3 – отражающая накладка)

Преобразователь состоит из пьезоэлектрических элементов 1, излучающей накладки 2 и отражающей накладки 3. Суммарная волновая длина (учитывающая различия в скоростях распространения ультразвуковых колебаний в материалах накладок и пьезоматериала) отражающей накладки, двух пьезоэлектрических элементов и излучающей накладки соответствует половине длины волны формируемых колебаний. Присоединение к пьезоэлементам 1 дополнительных накладок увеличивает общую длину полуволнового преобразователя и снижает его частоту. Излучающая накладка 2 в преобразователе изготавливается, как правило, из титанового сплава ВТ5, а отражающая 3 – из стали. Такой выбор материала обеспечивает повышение КПД преобразователя (увеличение коэффициента трансформации) в отношении волновых сопротивлений отражающей и излучающей накладок [20, 21]. Для увеличения амплитуды колебаний излучающая накладка может выполняться в виде ступенчатого (или с плавным переходом) концентратора (рис. 1 б). Такая полуволновая конструктивная схема позволяет объединить четвертьволновый пьезоэлектрический преобразователь и концентратор механических ультразвуковых колебаний. Повышение амплитуды колебаний до необходимой для распыления приводит к уменьшению распыляющей поверхности и снижению производительности распыления [19]. Сложность разработки классического преобразователя Ланжевена на рабочую частоту колебаний выше 100 кГц заключается в его слишком малом продольном размере при необходимости обеспечения диаметра преобразователя менее половины длины волны. При несоблюдении этого условия возникают диаметральные и изгибные моды колебаний, снижающие эффективность работы пьезоэлектрического преобразователя [17, 20-23]. На практике это означает, что длина преобразователя с частотой 120 кГц будет составлять примерно 18 мм (на 250 кГц не более 9 мм), при этом его диаметр не должен превосходить

15 мм (7 мм соответственно), а пьезоэлектрические элементы будут иметь размеры не более $15 \times 6 \times 1$ ($7 \times 3 \times 0,5$). Эскиз преобразователя Ланжевена с частотой колебаний 120 кГц представлен на рис. 2 (в скобках указаны размеры для преобразователя с частотой 250 кГц).

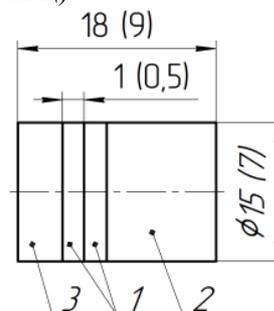


Рис. 2. Эскиз пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена: 1 – пьезоэлектрические элементы; 2 – излучающая накладка; 3 – отражающая накладка

Анализ конструкций пьезоэлектрических преобразователей, построенных по схеме Ланжевена, позволил выявить основные недостатки, ограничивающие их применение в ультразвуковых колебательных системах с частотами выше 100 кГц.

1. Применение цилиндрических преобразователей Ланжевена ограничено вследствие низкой амплитуды колебаний торца излучающей накладки пьезоэлектрического преобразователя, которая недостаточна для распыления жидкостей.

2. Механическое разрушение пьезоэлектрических элементов или снижение эффективности работы пьезоэлектрического преобразователя по причине неравномерного прижима пьезокерамических элементов между излучающей и отражающей накладками из-за малой толщины накладок.

3. Низкая производительность распыления, обусловленная недостаточной энергией формируемых на распылительной поверхности колебаний из-за малой толщины пьезоэлектрических элементов [20, 21].

Таким образом, изготовление подобных устройств представляет значительную техническую трудность, что обуславливает практически полное отсутствие высокока-

стотных (100-250 кГц) излучателей в практике ультразвукового распыления.

Разработанные конструкции колебательных систем ультразвуковых распылителей. Для устранения недостатков классического преобразователя Ланжевена и увеличения энергии высокочастотных колебаний, формируемых на распылительной поверхности, была предложена конструкция пьезоэлектрического преобразователя, показанная на рис. 3. Преобразователь выполнен из четного количества ($2M$) пьезоэлектрических элементов 1, где $M = 1, 2, 3$ и двух прижимных полуволновых накладок 2 и 3. В разработанной конструкции пьезоэлектрического преобразователя толщина каждого пьезоэлектрического элемента 1 выбрана равной четверти длины волны формируемых колебаний в пьезоматериале, то есть суммарная длина всех пьезоэлектрических элементов 1 соответствует M половинам длин волн.

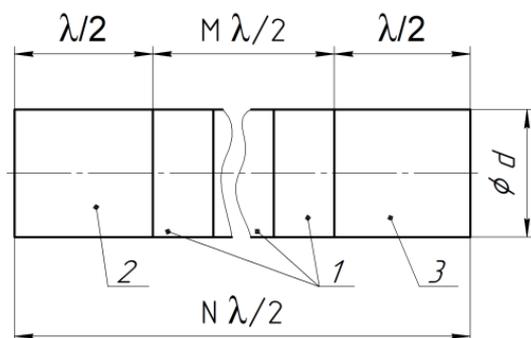


Рис. 3. Конструкция разработанного пьезоэлектрического преобразователя: 1 – пьезоэлектрические элементы; 2, 3 – прижимная полуволновая накладка

Таким образом, пьезоэлектрические элементы представляют собой самостоятельный ультразвуковой электроакустический преобразователь, формирующий ультразвуковые колебания с необходимой частотой.

Чтобы обеспечить сжатие пьезоэлектрических элементов (выполненных в виде дисков с центральным отверстием)

используется металлическая шпилька, стягивающая прижимные полуволновые накладки, собственная частота которых также должна соответствовать частоте пьезоэлектрических элементов. Так, например, для обеспечения работы на частоте 120 кГц (при скорости распространения ультразвуковых колебаний в пьезоматериале, 3600 м/с) толщина каждого из двух пьезоэлектрических элементов должна быть 15 мм (с учетом толщины медных контактных электродов необходимы два пьезоэлектрических элемента, толщиной 7 мм каждый). Для формирования ультразвуковых колебаний с частотой в 250 кГц суммарная толщина двух пьезоэлектрических элементов должна быть 7,2 мм (два пьезоэлектрических элемента толщиной по 3,5 мм каждый). Таким образом, в разработанном преобразователе (в состав которого входит 2 четвертьволновых пьезоэлектрических элемента) объем пьезокерамики в примерно 7 раз больше, чем в классической конструкции преобразователя Ланжевена и, соответственно, энергия формируемых преобразователем колебаний значительно выше. Для исследования функциональных возможностей предложенной конструкции были изготовлены опытные образцы пьезоэлектрических преобразователей на частоты 120 кГц и 250 кГц. На рис. 4 представлены эскиз и фотопреобразователей (в скобках указаны размеры для преобразователя с частотой 250 кГц).

Для проведения сравнительных экспериментальных исследований также были изготовлены пьезоэлектрические преобразователи (120 и 250 кГц), у которых в качестве полуволновой накладки 3 установлен ступенчатый концентратор с коэффициентом трансформации равным 4. Расчет концентраторов проведен по методикам инженерного расчета [21-23]. На рис. 5 показан эскиз ступенчатого концентратора.

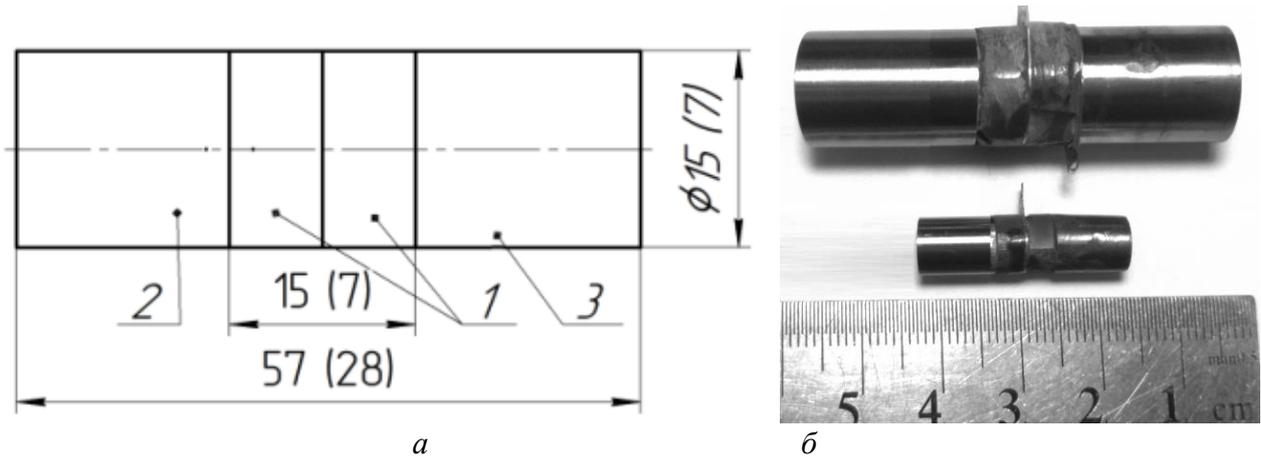


Рис. 4. Разработанные пьезоэлектрические преобразователи: *а* – эскиз пьезоэлектрических преобразователей; *б* – фотопьезоэлектрических преобразователей (1 – пьезоэлектрические элементы; 2, 3 – прижимная полуволновая накладка)

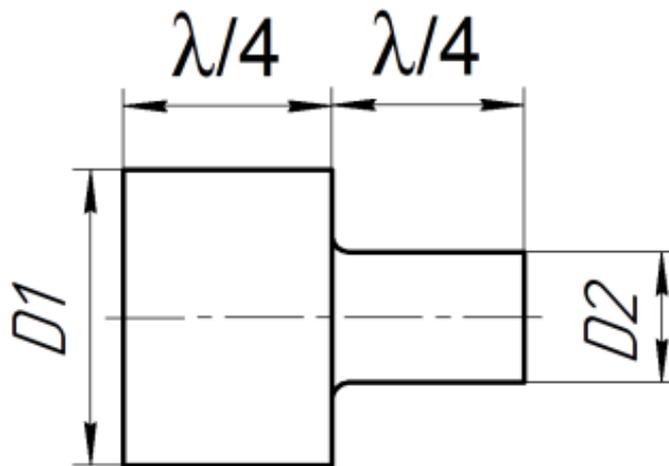


Рис. 5 Эскиз ступенчатого концентратора

Соотношение между входным (D_1) и выходным (D_2) диаметрами определяется выражением

$$\sqrt{K} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (2)$$

где K – коэффициент трансформации концентратора; D_1 и D_2 – входной и выходной диаметры концентратора соответственно, м.

Длина полуволнового концентратора определяется из выражения

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}, \quad (3)$$

где c – скорость звука в материале концентратора, м/с; f – собственная частота колебаний, Гц; λ – длина волны, м.

На рис. 6 представлены эскиз и фото разработанных преобразователей (в скобках указаны размеры для преобразователя с частотой 250 кГц).

Измерения амплитуды механических колебаний торцевой поверхности прижимной полуволновой накладки 3, проведены с помощью стробоскопического метода [24, 25], а также измерения потребляемой при этом электрической мощности представлены в табл. 1.

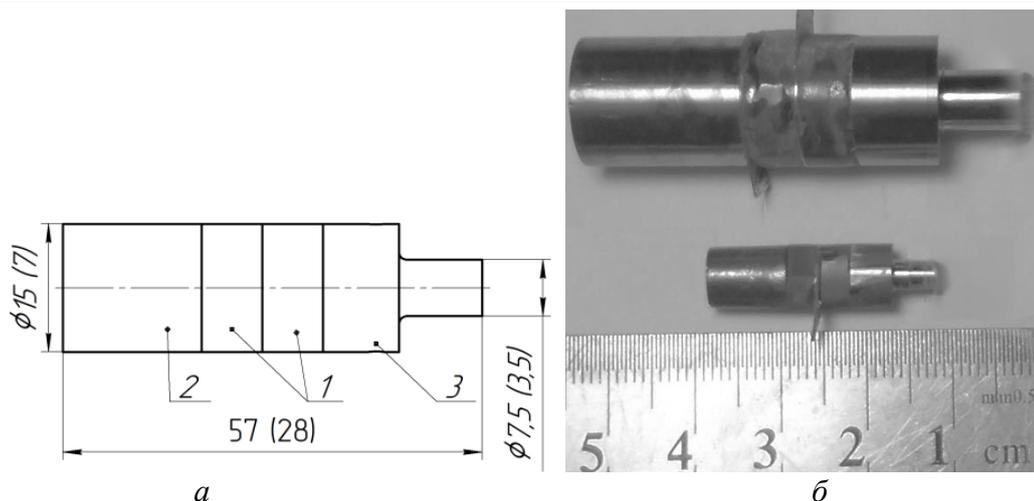


Рис. 6. Разработанные пьезоэлектрические преобразователи: а – эскиз пьезоэлектрических преобразователей; б – фото пьезоэлектрических преобразователей (1 – пьезоэлектрические элементы; 2 – прижимная полуволновая накладка; 3 – прижимная полуволновая накладка – концентратор механических колебаний)

Таблица 1

Характеристики разработанных пьезоэлектрических преобразователей

Характеристика	Значение	
	Цилиндр/ Ступенчатый концентратор	Цилиндр/ Ступенчатый концентратор
Форма прижимной полуволновой накладки 3		
Собственная частота колебаний, кГц	120	250
Амплитуда (размах) колебаний, мкм	1 / 4	0,6 / 2,5
Потребляемая мощность, Вт	3	1,4

Анализ полученных данных свидетельствует о работоспособности предложенной конструкции и возможности существенно увеличения амплитуды колебаний (примерно в 4 раза) за счет применения ступенчатого концентратора. Однако полученная амплитуда колебаний недостаточна для реализации процесса распыления на высоких частотах.

Разработка конструкции многоступенчатого концентратора. Для повышения амплитуды колебаний до значений, при которых начинается распыление жидкости (около 7-10 мкм при частоте 120 кГц и 5-7 мкм при частоте 250 кГц [26-28]) предложено использовать несколько последовательно соединенных концентраторов [29]. При этом суммарный коэффициент трансформации для ультразвуковой колебательной системы рассчитывается по выражению

$$K = \frac{A_{out}}{A_{in}}, \quad (4)$$

где A_{out} – требуемая амплитуда колебаний распылительной поверхности концентратора, мкм; A_{in} – амплитуда колебаний торцевой поверхности пьезоэлектрического преобразователя, мкм.

Суммарный коэффициент трансформации применяемых в ультразвуковых колебательных системах концентраторов определяется произведением коэффициентов трансформации каждого концентратора:

$$K = K_1 \cdot K_2 \dots K_N, \quad (5)$$

где $K_1 \dots K_N$ – коэффициент трансформации концентраторов, N – количество концентраторов.

Для упрощения расчетов значения коэффициентов трансформации $K_1 \dots K_N$ могут быть равными между собой:

$$K_1 = K_2 = \dots K_N \quad (6)$$

С учетом выражения (6) и подстановки (4) в (5) получаем

$$N \cdot K_N = \frac{A_{out}}{A_{in}}, \quad (7)$$

откуда количество концентраторов N будет равно

$$N = \frac{A_{out}}{A_{in} \cdot K_N}. \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) позволяет рассчитать количество концентраторов и коэффициент трансформации каждого из них при условии, что K_N задаются в диапазоне от 3 до 5. Выполнение концентратора с коэффициентом трансформации ниже указанного диапазона приведет к нерациональному увеличению количества концентраторов и соответственно длины конструкции распылителя. В свою очередь, повышение коэффициента трансформации выше 5 приведет к увеличению механиче-

ских напряжений в области ступенчатого перехода, а в некоторых случаях к его механическому разрушению. Геометрические размеры каждого концентратора (рис. 5) определяются при помощи выражений (2) и (3).

Практические конструкции ультразвуковых распылителей. На основе предложенной конструкции были разработаны ультразвуковые колебательные системы для распыления жидкостей (рис. 7), содержащие в своем составе 2 концентратора 3 и 4 и резонансное распылительное звено 5. Для обеих колебательных систем (120 кГц и 250 кГц) суммарный коэффициент трансформации концентраторов равен 16 (коэффициент трансформации каждого концентратора равен 4).

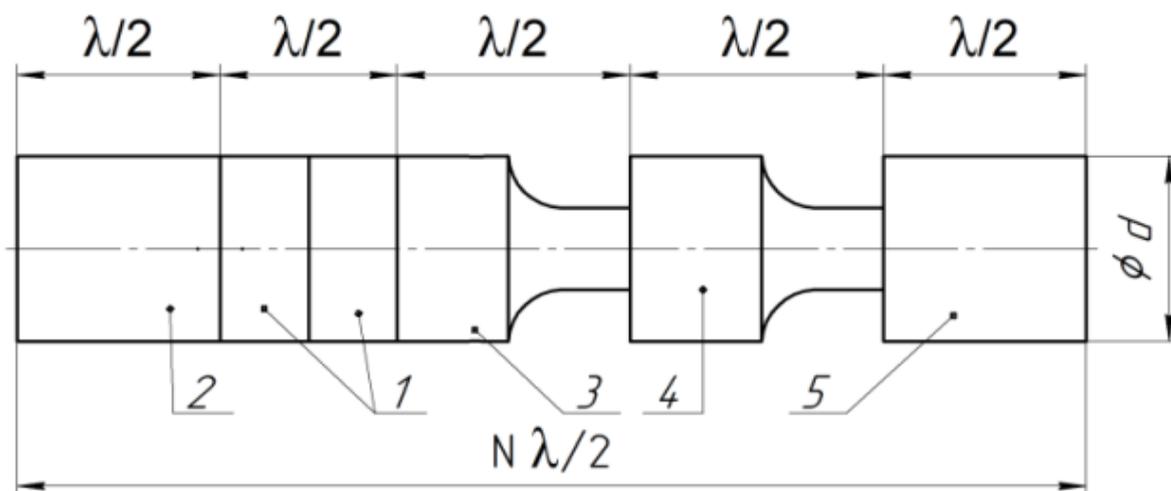


Рис. 7. Эскиз разработанных ультразвуковых колебательных систем: 1 – пьезоэлектрические элементы; 2 – прижимная полуволновая накладка; 3 – прижимная полуволновая накладка – концентратор механических колебаний; 4 – дополнительный концентратор механических колебаний; 5 – резонансное распылительное звено

Отличительной особенностью предложенной конструктивной схемы является применение резонансного распылительного звена 5. За счет этого достигается увеличение площади распылительной поверхности без потери амплитуды колебаний [29].

Для исследования функциональных возможностей разработанных распылите-

лей были изготовлены опытные образцы ультразвуковых колебательных систем (с частотой 120 кГц и 250 кГц). На рис. 8 представлены эскиз и фото разработанных ультразвуковых колебательных систем для распыления жидкости (в скобках указаны размеры для преобразователя с частотой 250 кГц).

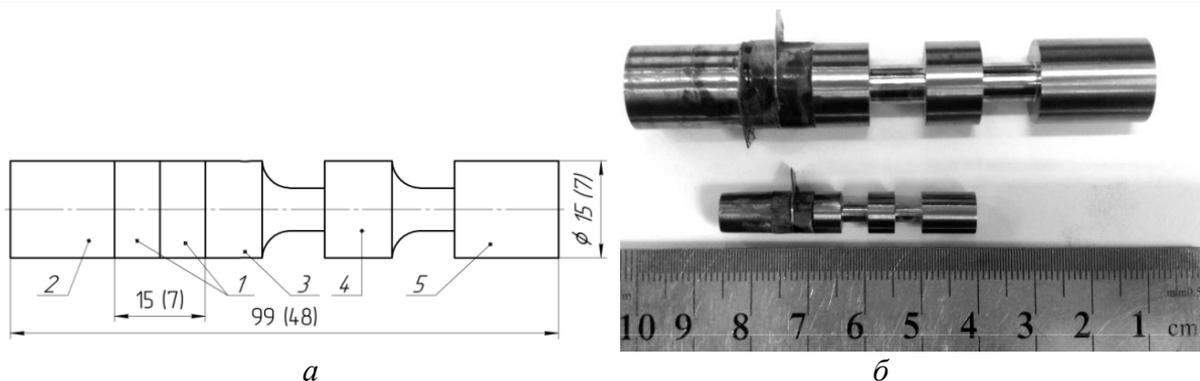


Рис. 8. Эскиз и фото разработанных ультразвуковых колебательных систем: *а* – эскиз пьезопреобразователей; *б* – фото пьезопреобразователей (1 – пьезоэлектрические элементы; 2 – прижимная полу-волновая накладка; 3 – прижимная полуволновая накладка – концентратор механических колебаний; 4 – дополнительный концентратор механических колебаний; 5 – резонансное распылительное звено)

Так как концентраторы 3 и 4 и резонансное распылительное звено 5 выполнены единой деталью, измерение собственных частот колебаний элементов УЗКС не представляется возможным. Поэтому была определена собственная частота колебаний всей ультразвуковой колебательной системы. Измерение амплитуды механических колебаний распылительной поверхности было выполнено с помощью

стробоскопического способа [24-25]. Были проведены экспериментальные исследования, позволившие определить максимальную производительность распыления (по воде) и средний диаметр формируемых капель. Измерение диаметров образующихся капель осуществлялось методом улавливания капель иммерсионной средой [30]. В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований.

Таблица 2

Технические характеристики разработанных УЗКС

Характеристика	Значение	
Собственная частота колебаний, кГц	120	250
Амплитуда (размах) механических колебаний, мкм	15	10
Расчетный суммарный коэффициент трансформации	16	16
Потребляемая мощность без нагрузки, Вт	3	1,4
Потребляемая мощность при максимальной производительности распыления, Вт	10	3
Площадь распылительной поверхности, см ²	2	0,5
Производительность распыления по воде, мл/мин.	54	14
Средний диаметр формируемых капель, мкм	17	10

Анализ полученных результатов измерений показал, что разработанные ультразвуковые колебательные системы сочетают в себе высокие мощностные характеристики пьезопреобразователя (10 Вт для 120 кГц и 3 Вт для 250 кГц), высокую амплитуду колебаний (15 мкм для 120 кГц и 10 мкм для 250 кГц), обеспечиваемую за счет использования нескольких концентрирующих звеньев, и большую площадь распылительной по-

верхности (2 см² для 120 кГц и 0,5 см² для 250 кГц). За счет этого обеспечивается производительность распыления 54 мл/мин. для 120 кГц УЗКС и 14 мл/мин. для 250 кГц УЗКС.

Итак, решена проблема повышения производительности ультразвукового распыления на частотах выше 100 - 250 кГц за счет создания нового типа пьезопреобразователя и последовательного размещения необходимо количества механических

концентраторов с распыляющей поверхностью необходимой площади. Это стало возможным благодаря применению нового подхода к проектированию пьезоэлектрических колебательных систем ультразвуковых распылителей жидкости, заключающегося в применении электроакустического преобразователя повышенной мощности, который выполнен из четного числа пьезоэлектрических элементов и двух прижимных полуволновых накладок. При этом толщина каждого пьезоэлектрического элемента выбрана равной четверти длины волны формируемых колебаний в пьезоматериале, а суммарная длина всех пьезоэлектрических элементов соответствует четному числу четвертей длин волн.

Для достижения достаточной для распыления жидкостей амплитуды колебаний последовательно устанавливаются концентрирующие звенья – трансформаторы колебательной скорости. Для увеличения площади распылительной поверхности без потери амплитуды колебаний применяется распылительный инструмент, выполненный в виде цилиндрического резонансного

звена диаметром менее половины длины волны.

Для проверки эффективности предложенного подхода были разработаны, изготовлены и исследованы ультразвуковые колебательные системы, обеспечивающие формирование высокодисперсных аэрозолей со средними размерами капель 10-17 мкм при производительности распыления 54 мл/мин на 120 кГц и 14 мл/мин для 250 кГц при потребляемой электрической мощности не более 10 Вт для 120 кГц и 3 Вт для 250 кГц.

В ходе исследований установлено, что существенное улучшение параметров распыления было достигнуто за счет увеличения площади распылительной поверхности (2 см² для 120 кГц и 0,5 см² для 250 кГц) и обеспечения амплитуд колебаний до 15 мкм на частоте 120 кГц и 10 мкм на 250 кГц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-424.2018.8 и РФФИ и Администрации Алтайского края в рамках научного проекта 18-48-220006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Using ultrasonic atomization to produce an aerosol of micron-scale particles / T.D. Donnelly, J. Hogan, A. Mugler, M. Schubmehl, N. Schommer, A.J. Bernoff, S. Dasnurkar, T. Ditmire // Review of scientific instruments, vol. 76, No 11, 2005. P. 1-10.

2. Development of the equipment for ultrasonic treatment of biological tissues with simultaneous spraying of medicines / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, A.V. Shalunov, V.V. Nesterov, V.A. Pedder, A.V. Pedder // 14th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013, Novosibirsk, NSTU, 2013. P. 112-118.

3. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев, А. Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.

4. High-Frequency Ultrasonic Atomization With Pulsed Excitation / A. Lozano, H. Amadeva, F. Barreras, X. Jorda, M. Lozano // Journal of Fluids Engineering, Vol. 125, 2003. P. 941–945.

5. Tomita Y. Focused ultrasound induced free-surface breakup and damage in acrylic plates / Y. Tomita, S. Tanaka // AIP Conf. Proc. 1474, 2012. P. 123-126.

6. Studies of spray drying process of sour milk products with the application of ultrasonic vibrations / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, N.A. Shavyrkina // 17th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016, Novosibirsk, NSTU, 2016. P. 246-250.

7. Ultrasonic spray pyrolysis for nanoparticles synthesis / S.C. Tsai, Y.L. Song, C.S. Tsai, C.C. Yang, W.Y. Chiu, H.M. Lin // J. Mater. Sci., 39, 2004. – pp. 3647–3657.

8. **Berger H.L.** Ultrasonic Liquid Atomization Partridge Hill Publishers / H.L. Berger. Hyde Park: NY, 1998. P. 45-48.
9. Automated line for ultrasonic spraying of anticoagulant into the blood collection tubes / V. N. Khmelev, A.V. Shalunov, V. A. Nesterov, D.S. Abramenko, D. V. Genne and R. S. Dorovskikh // 15th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014, Novosibirsk, NSTU, 2014. – P. 181–186.
10. **Khmelev V. N.** The Cavitation Spraying of the Viscous Liquids / V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, E. S. Smerdina // 7th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2006, Novosibirsk, NSTU, 2006. P. 269-273.
11. **Lang R.J.** Ultrasonic atomization of liquids / R.J. Lang // The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 34, 1962. P. 6-8.
12. **Khmelev V.N.** Optimization of these modes and conditions of ultrasonic influence on various technological mediums by mathematical modeling / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh // 13th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2012, Novosibirsk, NSTU, 2012. P. 124-134.
13. Ultrasonic atomizing nozzle and method: pat: 7712680 USA: ICL B05B 1/08/ Berger, L.Harvey, Mowbray, F. Donald, Copeman, A. Randy, Russell, J.Robert, Sono-Tek Corporation; app. num 11/341616; app 30.01.2006, pub. 11.05.2010.
14. Study of the Process of Liquid Atomization from the Ultrasonic Disk Radiator / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, A.N. Galakhov, A.V. Shalunova //14th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. P. 119-122.
15. Revelation of optimum modes of ultrasonic influence for atomization of viscous liquids by mathematical modeling / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, A.V. Shalunova, D.V. Genne // 13th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2012, Novosibirsk, NSTU, 2012. P. 114-123.
16. Effect of Frequency on Ultrasonic Atomization / K. Yasuda, H.Honma, Y. Asakura, S.Koda // Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 31, 2010. P. 363-364.
17. Designing of ultrasonic oscillation systems for technological devices / V.N. Khmelev, A.N. Lebedev, S.N. Tsyganok, I.I. Savin, V.N. Steer, M.V.Khmelev // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003. - Novosibirsk, NSTU Publishing house, 2003. P. 205-209.
18. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. № 4. P. 831-844.
19. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок; Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. 688 с.
20. **Khmelev V. N.** Designing and Efficiency Analysis of Half-Wave Piezoelectric Ultrasonic Oscillatory Systems / V.N. Khmelev // International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2005. P. 82-85.
21. **Хмелев В.Н.** Автоматизированное проектирование ультразвуковых колебательных систем / В. Н. Хмелев, А. Н. Лебедев, С. Н. Цыганок // Известия Тульского государственного университета: избранные труды участников Второй международной электронной научно-технической конференции. – 2003. – С. 14-18.
22. **Меркулов Л. Г.** Теория ультразвуковых концентраторов / Л. Г. Меркулов // Акустический журнал. 1957. Т. 3. № 3.
23. **Меркулов Л.Г.** Теория и расчет составных концентраторов / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // Акустический журнал. 1959. Т. 5. № 2.
24. **Leonov G. V.** Automation of the Amplitude Measurement Process of Ultrasonic Oscillatory Systems Irradiating Surface / G.V. Leonov // International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and

Materials Proceeding EDM'2005: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2005. P. 86-70.

25. Usage features of contact and noncontact measuring methods of oscillation amplitude during adjustment process of ultrasonic devices / D. S. Abramenko, V. N. Khmelev, R. V. Barsukov, A. N. Lebedev // 9th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2008. Novosibirsk; NSTU, 2008. P. 223-226.

26. Explosion generation of microatomized aerosols and their evolution / B. I. Vorozhtsov, O. B. Kudryashova, A. N. Ishmatov, I. R. Akhmadeev, G. V. Sakovich // J. Eng. Phys. Thermophys. Vol. 83. No. 6. 2010. P. 1149-1169

27. Разработка и исследование новых принципов построения мелкодисперсных ультразвуковых распылителей вязких жидкостей / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов,

Д.В. Генне, А.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Известия Томского политехнического университета, Т. 319. № 4. С. 158-163.

28. The investigation of modes of ultrasonic influence for atomization of liquids with specified dispersivity and productivity / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, A.V. Shalunova, D.V. Genne // 13th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2012, Novosibirsk, NSTU, 2012. P. 188-194.

29. **Peshkovskiy S.** Ultrasonic Rod Waveguide-Radiator, United States Patent 7156 201, January 2, 2007 / S. Peshkovskiy, M. Friedman, W. Hawkins.

30. **Пажи, Д.Г.** Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. М.: Химия, 1984. 256 с.

Хмелёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Шалунов Андрей Викторович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Методы и средства измерения и автоматизации» Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Нестеров Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерения и автоматизации» Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Vladimir N. Khmelev – Dr.Sc., Professor, Deputy Director for Research at Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Andrei V. Shalunov – Dr.Sc., Head: Department of Instrumentation and Automation Methods, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Viktor A. Nesterov – PhD, Associate Professor, Department of Instrumentation and Automation Methods, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Статья поступила в редакцию 01.11.18, принята к опубликованию 28.11.18

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ МОДИФИКАЦИЯ
ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

И.В. Злобина

**LOW-TEMPERATURE HARDENING MODIFICATION OF CURED
POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE MICROWAVE
ELECTROMAGNETIC FIELD**

I.V. Zlobina

Выполнены экспериментальные исследования изменения прочностных характеристик образцов из армированного углеродной тканью отвержденного полимерного композиционного материала после кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии в рабочей зоне $9 \cdot 10^4$ - $20 \cdot 10^4$ мкВт/см². Установлено, что наибольшее упрочнение по напряжению межслоевого сдвига, равное (40-48) %, наблюдается при воздействии на образцы СВЧ электромагнитного поля с плотностью потока энергии $17 \cdot 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут. При этом температура нагрева образца составляет $(28-30)^\circ\text{C}$. При большем времени обработки и большей плотности потока энергии, приводящих к повышению температуры выше 40°C , констатируется снижение упрочняющего эффекта.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, отверждение, СВЧ электромагнитное поле, плотность потока энергии, диэлектрический нагрев, межслоевой сдвиг, прочность, термическая деструкция

В настоящее время применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных углеродными, арамидными и стеклянными волокнами, становится одним из приоритетных направле-

Experimental studies of the changes in strength characteristics of samples of carbon-reinforced cured polymer composite materials after a short-term exposure to the microwave electromagnetic field with the frequency of 2450 MHz and the energy flux density in the working area of 20×10^4 - 9×10^4 mW/cm² have been performed. It is found that the greatest strengthening of the interlayer shear stress equal to 40-48 % is observed when the samples are exposed to the microwave electromagnetic field with the energy flux density of 17×10^4 mW / cm² within 2 minutes. The sample heating temperature is $28-30^\circ\text{C}$. With substantial processing time interval and high energy flux density, leading to an increase in the temperature by more than 400°C , a decrease in the hardening effect is observed.

Keywords: polymer composite materials, curing, microwave electromagnetic field, energy flux density, dielectric heating, interlayer shear, strength, thermal destruction

ний совершенствования конструкций различных технических систем, особенно воздушно-космических аппаратов, автомобильного и водного транспорта. Их производство является стимулом для внедрения

инновационных материалов и технологий в другие производственные сферы. В частности, в октябре 2018 г. в СМИ прошло несколько сообщений о презентации ВИАМ технологии оперативного изготовления легких мостовых конструкций из армированных углепластиков с максимальным весом элементов до 120 кг, обеспечивающих пропуск транспортных средств типа трейлеров и тяжелой военной техники. Тенденция расширенного применения углепластиков и других ПКМ будет только усиливаться в ближайшей и отдаленной перспективе [1, 2]. Однако данные материалы отличаются высокой анизотропией свойств, в частности, предельные напряжения межслоевого сдвига могут быть в два и более раз меньше, чем при растяжении-сжатии. Поэтому при проектировании изделий из ПКМ и разработке их технологий наибольшее внимание уделяется увеличению прочности именно по данному параметру. В то же время технологии синтеза новых компонентов ПКМ и их формирования достаточно сложны, требуют длительных сроков для совершенствования, и создания нового сложного оборудования [3]. Также сдерживающим фактором традиционных методов упрочнения путем усиления конструкции является высокая стоимость углеродсодержащих ПКМ, определяемая сложностью и трудоемкостью технологии, пока еще не высоко автоматизированной, а также стоимостью армирующих волокон. Так, стоимость 1 кг углепластика европейского производства в среднем доходит до 20 долларов, в то время как стоимость 1 кг качественной стали не превышает 1 доллара [4].

Изложенное делает актуальным исследование альтернативных методов снижения материалоемкости углепластиковых конструкций за счет соответствующего их упрочнения.

Применение электромагнитных полей, в частности СВЧ диапазона, для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить степень равномерно-

сти обработки вследствие объемного характера воздействия.

В настоящее время благодаря работам отечественных и зарубежных ученых в основном создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ камер различного типа и технологических магнетронов. Получены результаты, свидетельствующие о положительном влиянии на прочность и другие свойства стекловолоконных и других полимерных материалов теплового и нетеплового СВЧ воздействия [5-7]. Известно значительное количество изобретений, посвященных повышению прочности композиционных материалов путем термического воздействия СВЧ электромагнитного поля на композицию в процессе ее отверждения [8-10]. Однако технологии и методы, использующие воздействие СВЧ электромагнитного поля на формирующиеся композиционные материалы, имеют следующие недостатки.

Прежде всего, это термические напряжения, возникающие на границах раздела слоев и границах волокно-матрица. Возникновение напряжений связано с различными коэффициентами термического расширения у армирующих волокон из разнородного материала и полимерной матрицы, что вызывает значительные деформации волокон, которые при остывании матрицы не релаксируют вследствие ее затвердевания. Это препятствует сокращению удлинившихся волокон. Соответственно возникающим напряжениям снижается эффект упрочнения материала. Дополнительно возникает концентрация напряжений при формовании изделия из данного материала, вызывающая неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС). Важное значение имеет влияние на работоспособность сформированного изделия технологической наследственности предшествующей термической обработки и размерного формования. В этом случае эффект по повышению уровня разрушающих напряжений оказывается снижен последующей за получением материала размерной обработкой. Допол-

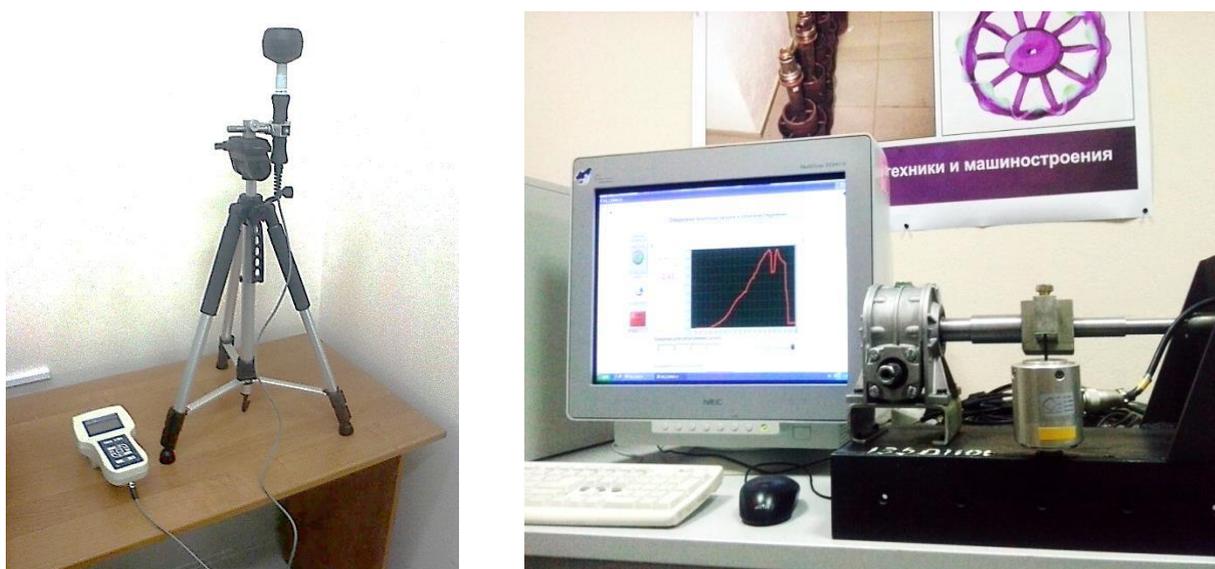
нительная концентрация напряжений возникает при формовании изделия из данного материала и при его последующей размерной обработке, что вызывает неоднородность НДС, повышает опасность разрушения при знакопеременных нагрузках, возникающих, например, при эволюциях летающих с большими ускорениями объектов.

Следовательно, целесообразным является применение модифицирующего электрофизического воздействия, не приводящего к разогреву материалов до температуры, способствующей возникновению внутренних термических напряжений, но в то же время стимулирующей взаимодействие компонентов матрицы, а также между матрицей и границей армирующих волокон. Таким воздействием может явиться обработка в СВЧ электромагнитном поле, осуществляемая после завершения всех формообразующих операций, как финишный процесс.

Целью исследований является изучение влияния интенсивности воздействия СВЧ электромагнитного поля на предельные напряжения межслоевого сдвига ПКМ типа углепластиков и установления температурной зависимости получаемых эффектов.

Исследовали образцы в виде балок сечением 10×5 мм и 10×3 мм длиной 70 мм из отвержденного композита, состоящего из матрицы на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в соотношении 10:1 и наполнителя – углеродной ленты ЭЛУР-П-А с объемной долей наполнителя 70-75 %. В экспериментах использовали микроволновую установку «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской области, с излучателем рупорного типа. Установка генерирует электромагнитное поле частотой 2450 МГц при выходной мощности 1200 Вт. Для воздействия использовали дистанции от плоскости рупора до поверхности образца 100 и 250 мм. В качестве характеристики воздействия СВЧ электромагнитного поля использовали плотность потока энергии, которую определяли на расстоянии 0,5; 0,7 и 1,0 м от плоскости раскрытия излучающего рупора при помощи элект-

ронного измерителя параметров электромагнитного поля ПЗ-33М (рис. 1 а) при времени экспозиции, равном 1 минуте. Полученный график (рис. 2) аппроксимировали кривой до плоскости раскрытия рупора с целью определения плотности потока энергии на принятых дистанциях исследований. Проведение замеров в непосредственной близости от рупора не представлялось возможным по ограничениям правил эксплуатации прибора. В процессе обработки осуществляли контроль температуры поверхности образцов и распределение температуры по толщине путем непрерывной записи термограмм во фронтальной и фланговой зонах при помощи тепловизора модели FLIR E40 (США). Предварительно показания в опорных точках калибровали при помощи пирометра Testo 830-T1 (Германия). Образцы в процессе экспериментов закрепляли по три на вертикальном столе из полипропилена РР. За столом размещали приемный рупор, обеспечивающий отвод непоглощенной энергии СВЧ электромагнитного поля в емкость с водой. Время обработки по результатам ранее проведенных нами исследований [11-13] принимали равным 0,5; 1; 2; 3 и 4 минуты, поскольку при большем времени ожидаемо существенное повышение температуры на всех режимах, а меньшее время при малой подводимой СВЧ мощности не вызывает заметного ее изменения. Испытания образцов до и после обработки проводили на компьютерной установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения (рис. 1 б). Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки производилась по специальной заложенной в установку программе (LabVIEW, г. Орел) и позволила получить графики нагрузки (момента на приводе) в динамике от момента приложения до разрушения. По известным зависимостям механики материалов вычисляли напряжения межслоевого сдвига и модуль упругости. Измерения останавливали после потери образцом целостности.



a

б

Рис. 1. Экспериментальное оборудование: *a* – электронный измеритель параметров СВЧ электромагнитного поля ПЗ-33М; *б* – компьютерная экспериментальная установка для проведения испытаний

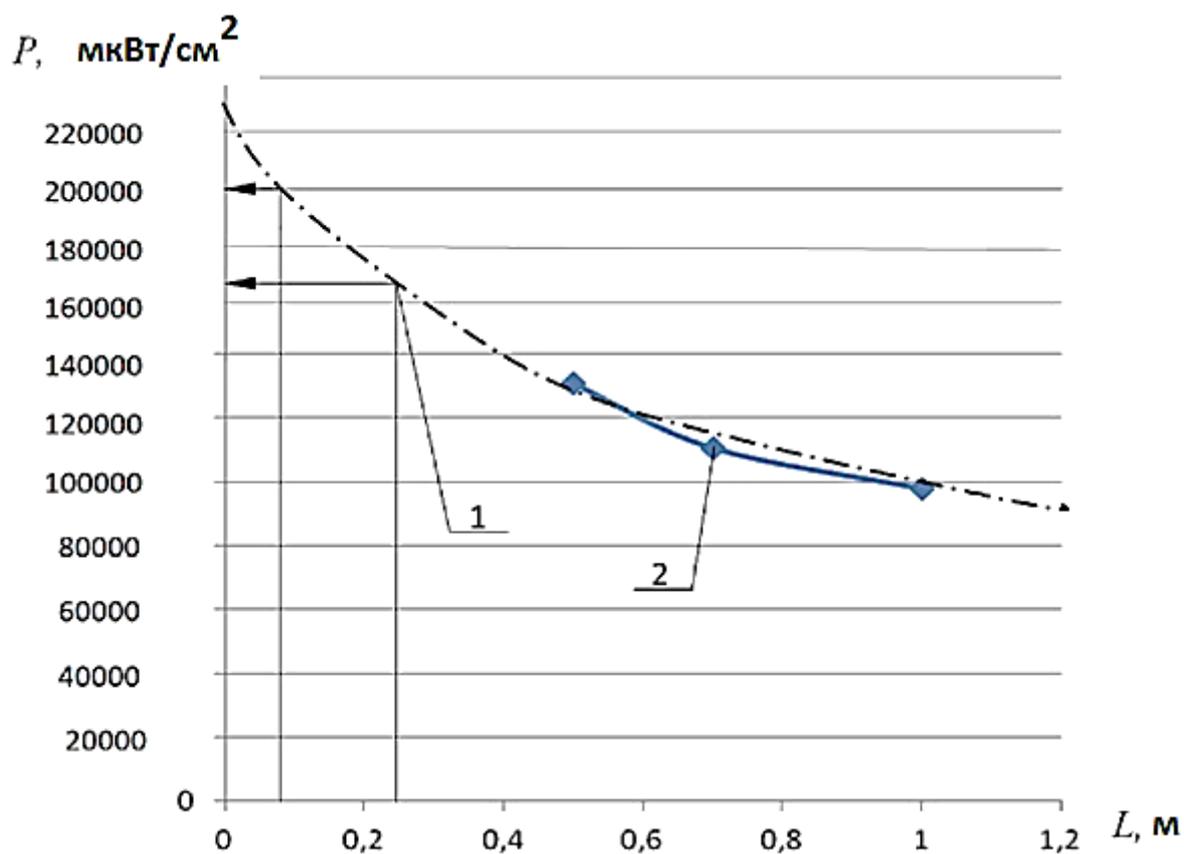


Рис. 2. Плотность потока энергии СВЧ электромагнитного поля в зависимости от расстояния от датчика до плоскости раскрыва рупорного излучателя: 1 – аппроксимирующая кривая; 2 – экспериментальная зависимость

Предельную нагрузку определяли как среднюю величину по нескольким значениям нагружающего момента согласно полученному графику от момента прекращения стабильного нарастания его величины до момента спада не менее чем на 15 %.

Результаты экспериментов представлены в таблице и на рис. 3-5.

В результате испытаний на межслоевой сдвиг установлено, что при увеличении времени воздействия СВЧ электромагнит-

ного поля от 0,5 до 2 минут наблюдается стабильное увеличение определяемых параметров прочности. Максимальный эффект достигается при времени 1-2 минуты. При дальнейшем увеличении времени до 4 минут и более рост параметра становится незначимым (3-5 %) или наблюдается некоторое его снижение. Таким образом, увеличение времени СВЧ обработки более 2 минут нецелесообразно.

Изменение напряжений межслоевого сдвига % и температура образцов толщиной 3,3 и 5,0 мм в зависимости от режимов СВЧ обработки и времени СВЧ воздействия

Параметр	Контрольный образец	Режим СВЧ обработки			
		ППЭ 17×10^4 мкВт/см ²		ППЭ 20×10^4 мкВт/см ²	
		1 мин	2 мин	1 мин	2 мин
t, °C	18	21,3	28,7	32	43
3,3 мм	100	120	140	116	110
5 мм	100	135	148	145	125

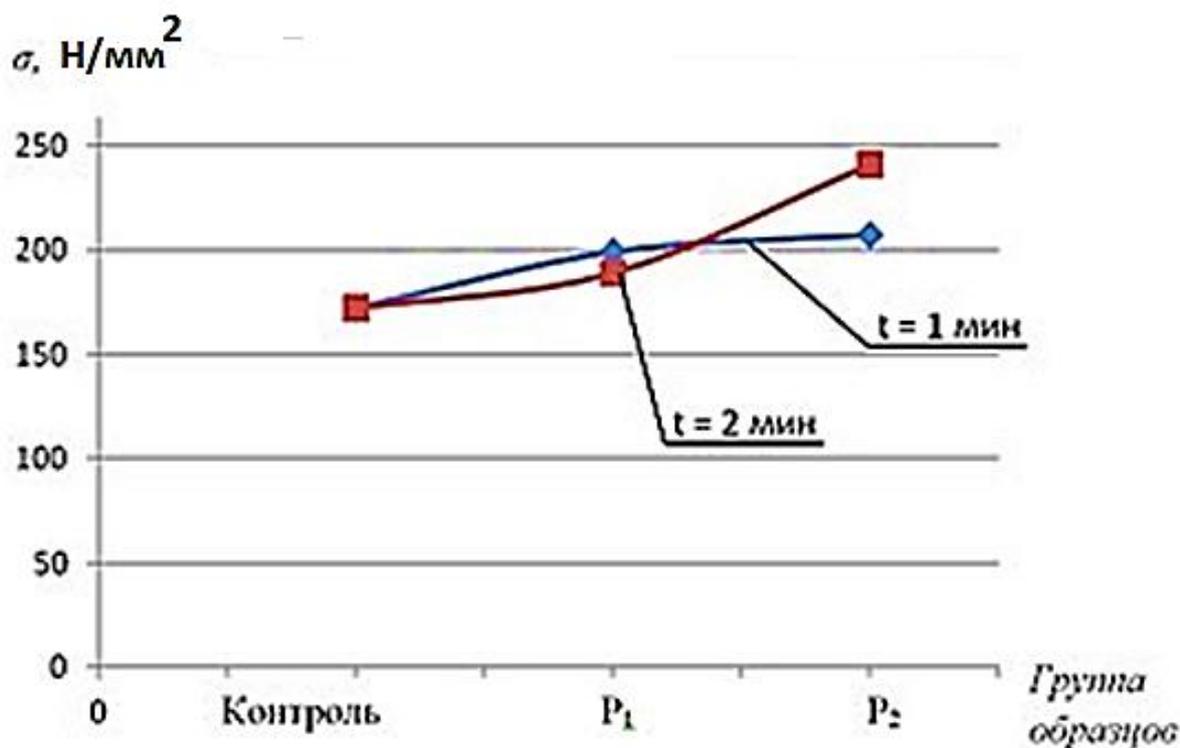


Рис. 3. Влияние обработки отвержденного углепластика толщиной 5 мм в СВЧ электромагнитном поле на напряжения межслоевого сдвига P₁ – ППЭ $17 \cdot 10^4$ мкВт/см², P₂ – ППЭ $20 \cdot 10^4$ мкВт/см²

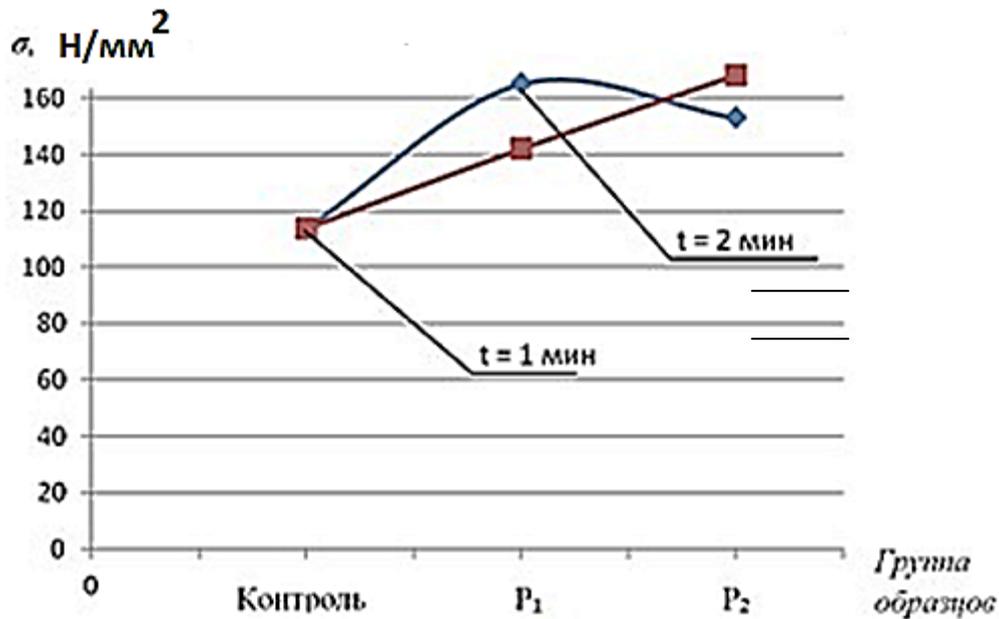


Рис. 4. Влияние обработки отвержденного углепластика толщиной 3 мм в СВЧ электромагнитном поле на напряжения межслоевого сдвига P₁ – ППЭ $17 \cdot 10^4$ мкВт/см², P₂ – ППЭ $20 \cdot 10^4$ мкВт/см²

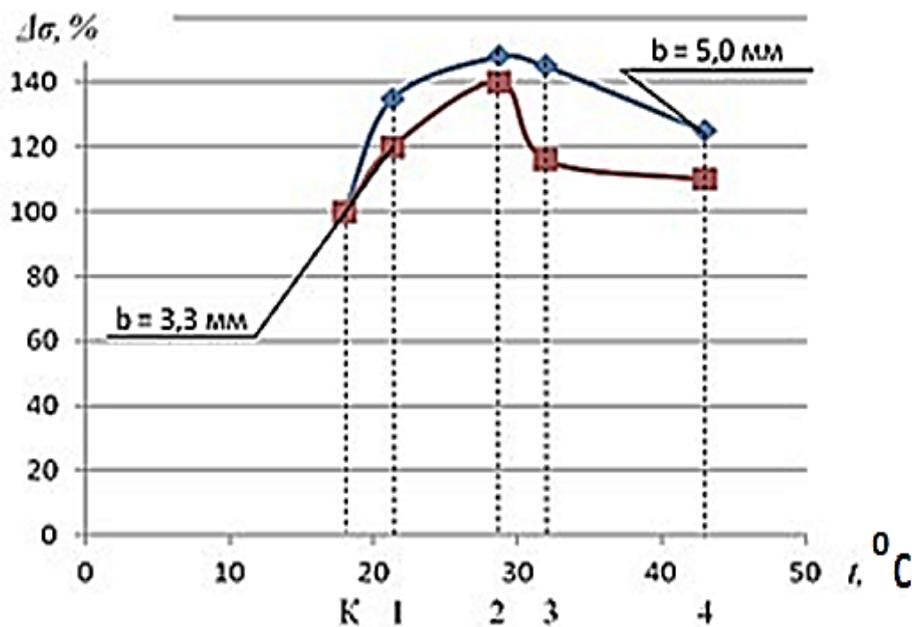


Рис. 5. Влияние режимов воздействия СВЧ электромагнитного поля на образцы ПКМ различной толщины на температуру диэлектрического нагрева и увеличение напряжения межслоевого сдвига 1 – ППЭ $17 \cdot 10^4$ мкВт/см², t = 1 мин; 2 – ППЭ $17 \cdot 10^4$ мкВт/см², t = 2 мин; 3 – ППЭ $20 \cdot 10^4$ мкВт/см², t = 1 мин; 4 – ППЭ $20 \cdot 10^4$ мкВт/см², t = 2 мин; К – контрольный образец

Анализ графиков рис. 3 и 4 свидетельствует, что наибольшие напряжения межслоевого сдвига выдерживают образцы, подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля в течение 2 минут при дистанции между плоскостью рупорного излу-

чателя и поверхностью образца, равном 250 мм, что согласно рис. 2 соответствует плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля, равной $17 \cdot 10^4$ мкВт/см². При меньших дистанциях, что соответствует большей плотности потока энергии, пре-

дельные напряжения меньше как для образцов толщиной 3,3 мм, так и 5 мм соответственно на 27 % и на 18 %. С другой стороны, при времени воздействия, равном 1 минуте, большая прочность образцов толщиной 5 мм по напряжениям межслоевого сдвига обеспечивается при большей плотности потока энергии, то есть на дистанции 100 мм, на (7-8) %. Для образцов толщиной 3,3 мм эффективность обработки на дистанции 250 мм снижается на 4 %, что можно считать малозначимым. Очевидно, при малой плотности потока энергии, что соответствует большей дистанции и меньшему времени воздействия, в структуре матрицы и межфазных зонах матрица-волокно не успевает произойти перестройка микроструктуры и образование дополнительных связей. При большей плотности потока энергии такие изменения происходят, и материал становится более прочным. При увеличении времени процессы образования связей нарастают при малом уровне мощности, при этом диэлектрический нагрев проходит менее интенсивно из-за теплоотвода в окружающую среду и глубинные области материала. В случае высокой плотности потока энергии теплота, выделившаяся вследствие диэлектрического нагрева матрицы, не успевает рассеяться в окружающую среду и глубинные объемы материала. Поэтому процесс сопровождается ростом температуры, и образование новых связей в межфазной зоне происходит одновременно с возникновением термических напряжений и различных по величине тепловых деформаций матрицы и армирующих волокон. Это приводит к трещинообразованию на различных уровнях и, как следствие, к уменьшению прочности по напряжениям межслоевого сдвига. Это утверждение подтверждается данными таблицы и графиками рис. 5. Видно, что наибольший эффект по увеличению прочности армированного углеродными волокнами полимерного композиционного мате-

риала наблюдается для образцов большей толщины, однако абсолютное значение напряжений у образцов толщиной 3,3 мм существенно выше.

Данный факт может быть связан с большей относительной долей матрицы в объеме образцов толщиной 5 мм, на структуру которой в большей степени влияет СВЧ электромагнитное поле. В то же время меньшая прочность матрицы определяет меньшие значения предельных напряжений межслоевого сдвига в образцах с большим ее содержанием.

Для образцов двух исследованных поперечных сечений (10×3 и 10×5 мм) температура поверхности на режимах, соответствующих максимальному упрочняющему эффекту, составила (28-30)⁰С. При этом для образцов с меньшей толщиной зависимость является более четкой, для образцов большей толщины диапазон температур может быть несколько расширен.

Таким образом, экспериментально установлено, что обработка окончательно сформированных образцов армированного углеродными волокнами полимерного композиционного материала в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц при плотности потока энергии $17 \cdot 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут обеспечивает увеличение прочности по напряжениям межслоевого сдвига на (40-48) % в зависимости от толщины образца. Данному эффекту соответствует диэлектрический нагрев материала до (28-30)⁰С, что может быть принято в качестве объективного параметра контроля продолжительности процесса при его реализации в автоматизированном технологическом оборудовании.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кошкин Р.П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: URL: <http://spma-gazine.ru/420> (дата последнего обращения 28.01.2017).
2. **Мирный М.** Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/> (дата последнего обращения 15.10.2018).
3. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
4. **Белова Н.А.** Композитные материалы на основе углеродных волокон / Н.А. Белова // Молодой ученый. 2015. № 24.1. С. 5-7. URL: <https://mo-luch.ru/archive/104/23577/> (дата обращения: 15.10.2018).
5. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
6. **Коломейцев В.А.** Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.
7. **Estel, L.** Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. 2004. № 11. P. 33.
8. Пат. US на изобретение № 5338611 А.
9. Пат. СН на изобретение МПК В29С № 2438867 от 10.01.2012 г.
10. Пат. RU на изобретение № 2135530. МПК С08L63/02, С08J5/24, С08J5/06, С08G59/56, Способ получения армированных полимерных материалов. Оpubл. 27.08.1999.
11. **Zlobina I.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I. V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.
12. **Zlobina I.V.** The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Solid State Phenomena. 2016. V. 870, P. 101-106.
13. **Zlobina I.V.** Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, G.K. Muldasheva // AIP Publishing, vol. 1783, 10 November 2016, 020236-1 – 020236-4.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.11.18, принята к опубликованию 28.11.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТА

Д.И. Артюхов, Н.В. Киселев, Н.В. Горшков, Н.Н. Ковынева,
И.Н. Бурмистров

A RESEARCH INTO DEPENDENCE OF THERMOELECTROCHEMICALS EFFICIENCY ON ELECTROLYTE CONCENTRATION

D.I. Artyukhov, N.V. Kiselev, N.V. Gorshkov, N.N. Kovyneva,
I.N. Burmistrov

Эффективность преобразования низкопотенциального тепла в полезную энергию, например электрическую, значительно зависит от такого параметра, как концентрации электролита. В работе исследованы зависимости показателей выходной удельной мощности термоэлектрохимической ячейки от концентрации электролита. Результаты показывают, что концентрационная зависимость имеет сложный нелинейный характер.

Ключевые слова: термоэлектрохимическая ячейка, гексацианоферрат калия, углеродные нанотрубки, эффект Зеебека

Одним из наиболее дешевых и простых способов преобразования низкопотенциального тепла в электроэнергию является сбор энергии с термоэлектрохимических (ТЭХ) ячеек.

В основе работы ТЭХ ячеек лежит эффект Зеебека – явление возникновения ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах. Соотношение между разницей температур на контактах и величиной ЭДС определяется коэффициентом Зеебека.

Для достижения высокой эффективности преобразования были исследованы раз-

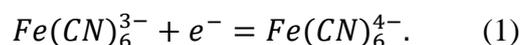
The efficiency of low-potential heat conversion into useful energy, such as electrical energy, significantly depends on the electrolyte concentration parameter. The dependence of the output specific power of a thermoelectric cell on electrolyte concentration is investigated. The results show that the concentration dependence has a sophisticated nonlinear character.

Keywords: a thermoelectrochemical cell, potassium hexacyanoferrate, carbon nanotubes, the Seebeck effect

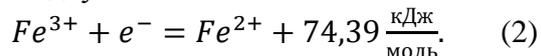
нообразные конструкции термоячеек, электролитов, электродных материалов и окислительно-восстановительных пар [1-3].

В настоящее время большой объем исследований [2-6] посвящен ТЭХ ячейкам на основе системы $[Fe(CN)_6]^{3-} / [Fe(CN)_6]^{4-}$ в связи с возможностью этой окислительно-восстановительной системы производить большую энтропию реакции, которая позволяет получать высокие значения коэффициента Зеебека и обменного тока.

Восстановительная реакция протекает следующим образом:

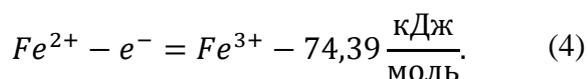
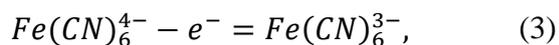


Это значит, что атом трехвалентного железа Fe^{3+} , получая электрон, становится атомом двухвалентного железа Fe^{2+} :



Так как восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} протекает с выделением энергии, данная реакция происходит на холодном электроде.

Обратная (окислительная) реакция происходит на горячем электроде:



Согласно [3,4] эффективность ТЭХ ячейки с электролитом на основе растворов калиевых солей гексацианоферратов/ферритов обеспечивается скоростью протекания электродной реакции. В связи с этим чем выше концентрация электролита в приэлектродном пространстве, тем, на первый взгляд, больший ток будет произ-

водиться ячейкой и соответственно выходная мощность будет выше. Учитывая, что химические процессы в растворах связаны с активностью ионов, которая не всегда линейно зависит от концентрации, возможны различные нелинейные зависимости мощности ячеек от концентрации электролита.

В качестве электродов были взяты многостенные углеродные нанотрубки «Таунит-М» (МУНТ) производства ООО «НаноТехЦентр» и окисленные многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ_{ОК}).

Как видно из данных сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 1), толщина электродного слоя МУНТ_{ОК} составляет 1-2 мкм. При этом слой довольно плотный и состоит из спутанных, ориентированных случайным образом нанотрубок. Результаты элементного анализа (EDX) показывают, что в составе электродного слоя преобладает углерод, проявление пиков Ti связано с рефлексиями от титановой подложки электрода.

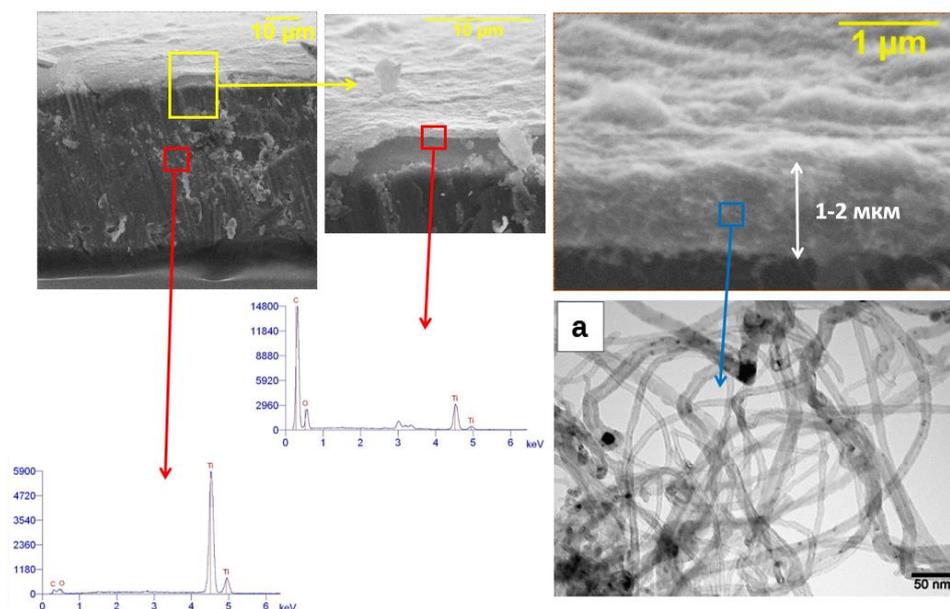


Рис. 1. СЭМ электрода на основе МУНТ

Для исследования эффективности измеряли вольт-амперные характеристики (ВАХ), на основе которых определяли значения напряжения холостого хода, ток короткого замыкания и выходной

мощности ячейки. Исследуемая ТЭХ ячейка состоит из двух токовых коллекторов, двух электродов, пластинчатой прокладки толщиной 2,6 мм, изготовленной из полимерного материала, кото-

рая определяет объем электролита в ячейке. Электроды имеют площадь 1 см^2 и толщину от 0,1 до 0,34 мм.

Конструкция исследуемой термо-ячейки приведена на рис. 2.

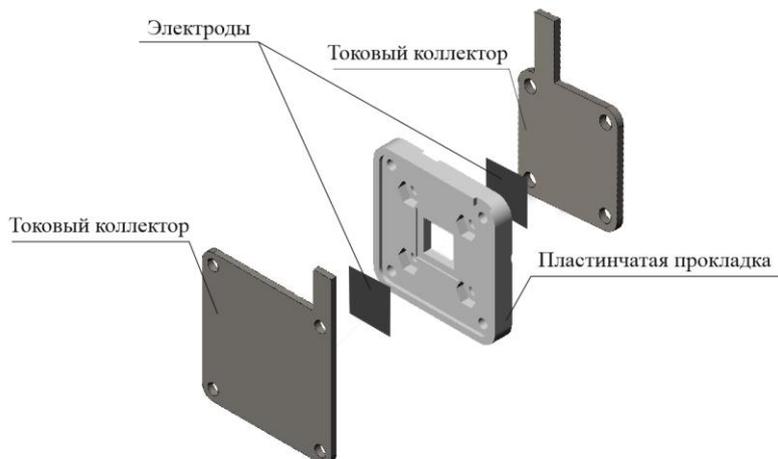


Рис. 2. Структура термо-ячейки

Для создания теплового потока через ячейку использованы элементы Пельтье, управление которыми производится за счет регулирования напряжения в цепи постоянного тока. Для этого был спроек-

тирован и сконструирован многоканальный источник постоянного тока на основе выпрямителя, четырех диммеров и четырех контуров сглаживания пульсаций (рис. 3).

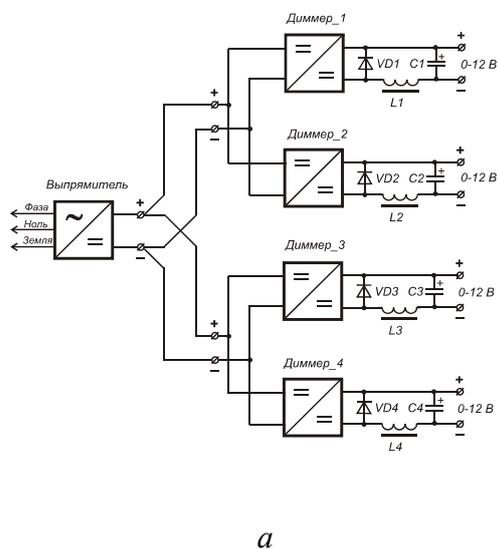


Рис. 3. Многоканальный источник постоянного тока: а – схема; б – внешний вид

В ходе исследований были проведены измерения ВАХ (рис. 4 а) и выходной мощности (рис. 4 б) при концентрациях электролита 0,2, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45, 0,5 и

0,6 моль/л. Шаг изменения концентрации вблизи 0,4 моль/л был уменьшен в связи с существенным изменением показателей эффективности ячейки в этом диапазоне.

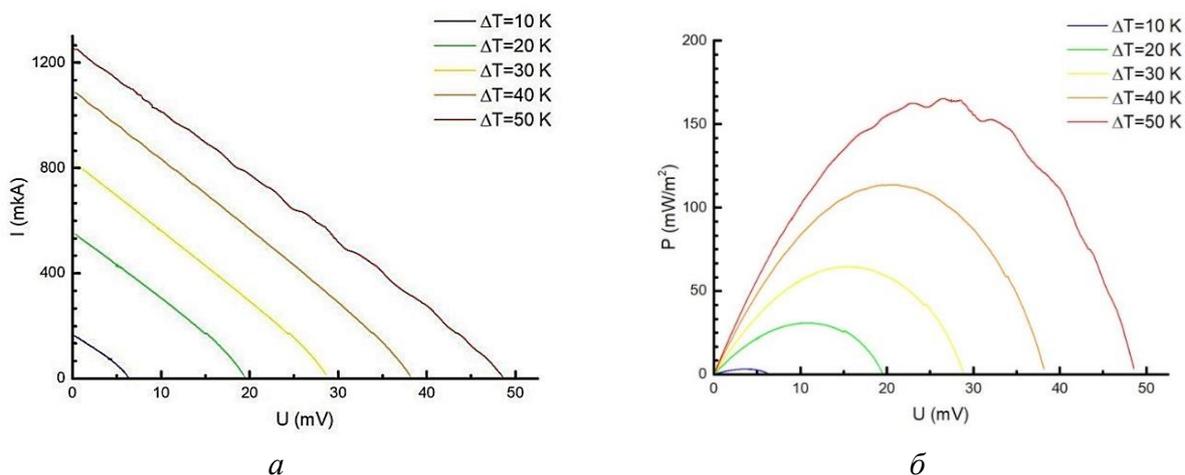


Рис. 4. ВАХ (а) и зависимость мощности от потенциала ТЭХ ячейки при концентрации электролита 0,2 моль/л (температура холодного электрода 20°C) (б)

Анализ полученной зависимости показывает, что при концентрации 0,4 моль/л наблюдается минимальная мощность, а при концентрациях вблизи

0,3 и 0,45 моль/л мощность максимума, при этом наибольшая эффективность отмечена при концентрации 0,3 моль/л (рис. 5).

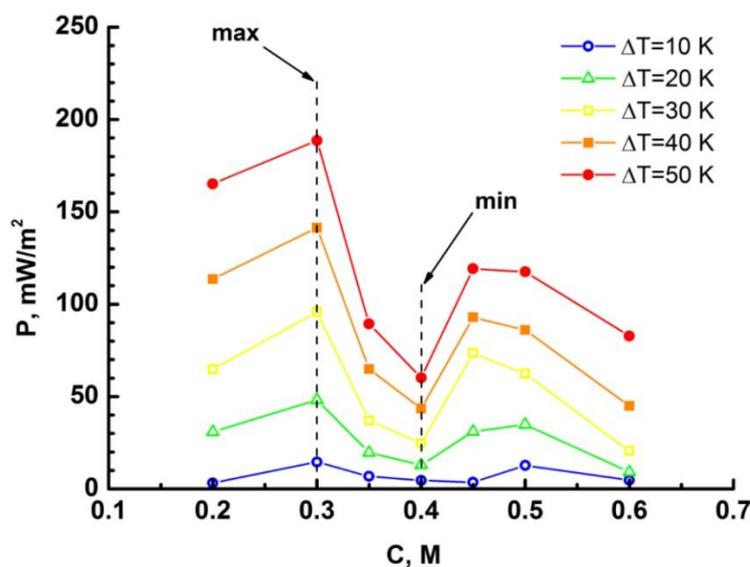


Рис. 5. Зависимость выходной мощности ячейки от концентрации электролита

Наблюдаемая зависимость может быть связана с влиянием активности ионов и вкладом сольватных оболочек, формирование которых существенно зависит от концентрации. Очевидно, что вблизи концентрации 0,4 моль/л происходят процессы, затрудняющие протекание перехода $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ и $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$.

Экспериментально установлено, что

наибольшая выходная удельная мощность наблюдается при концентрации электролита 0,3 моль/л и составляет 188 mW/m^2 при разности температур между электродами 50°C.

Исследование проводилось при финансировании Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 10.1434.2017 / 4.6).

1. Mechanical and electrical properties of ethylene-1-octene and polypropylene composites filled with carbon nanotubes / I. Burmistrov, N. Gorshkov, I. Ilinykh, D. Muratov, E. Kolesnikov, E. Yakovlev, I. Mazov, J.-P. Issi, D. Kuznetsov // *Composites Science and Technology*. 2017. Vol. 147. P. 71-77.
2. Thermo-electrochemical cells based on polymer and mineral hydrogels for low-grade waste heat conversion / A. Shindrov, D. Artyukhov, M. Vikulova, N. Spirin, N. Nikitina, N. Savin, N. Gorshkov, I. Burmistrov // *AIP Conference Proceedings*, 2017. Vol. 1899. № 1. P. 020016.
3. High Power Density Electrochemical Thermocells for Inexpensively Harvesting Low-Grade Thermal Energy / L. Zhang, T. Kim, N. Li, T.J. Kang, J. Chen, J.M. Pringle, D. Al-Masri // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29. № 12.
4. **Kazim A.** Electrochemical Characterization of Carbon Nanotube and Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) Poly (styrenesulfonate) Composite Aqueous Electrolyte for Thermo-Electrochemical Cells / A. Kazim, B. Cola // *Journal of The Electrochemical Society*, 2016. Vol. 163. № 8. P. 867-871.
5. Recent developments in thermoelectric materials / G. Chen, M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, J. Fleurial, T. Caillat // *International Materials Reviews*, 2013. Vol. 48. № 1. P. 45-66.
6. Thermo-Electrochemical Cells Based on Carbon Nanotube Electrodes by Electrophoretic Deposition / W. Qian, M. Cao, F. Xie, C. Dong // *Nano-Micro Letters*, 2016. Vol. 8. № 3. P. 240-246.
7. High-efficiency electrochemical thermal energy harvester using carbon nanotube aerogel sheet electrodes / H. Im, T. Kim, H. Song, J. Choi, J.S. Park, R. Ovalle-Robles, H.D. Yang, K.D. Kihm, R. H. Baughman, H.H. Lee, T.J. Kang, and Y. H. Kim // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. P. 10 600.
8. A tubing shaped, flexible thermal energy harvester based on a carbon nanotube sheet electrode / H.D. Yang, L.T. Tufa, K.M. Bae, and T.J. Kang // *Carbon*, 2015. Vol. 86. P. 118-123.

Артюхов Денис Иванович – студент магистратуры кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Киселев Николай Витальевич – студент магистратуры кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Горшков Николай Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Denis I. Artyukhov – Master Student, Department of Chemistry and Materials Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikolai V. Kiselev – Master Student, Department of Chemistry and Materials Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikolai V. Gorshkov – PhD, Associate Professor, Department of Chemistry and Materials Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ковынева Наталья Николаевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia N. Kovineva – PhD, Associate Professor, Department of Chemistry and Materials Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бурмистров Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor N. Burmistrov – Dr.Sc., Professor, Department of Chemistry and Materials Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.10.18, принята к опубликованию 28.11.18



ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681.171.5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРИЗНАКА ИЗ СПЕКТРА ТОКА ТЯГОВОГО РТ -51М ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СЕРИИ ЭР-9^Т

И.А. Менщиков

A METHOD FOR IDENTIFYING A DIAGNOSTIC PROPERTY FROM A SPECTRUM OF THE TRACTION RT-51M AC ELECTRIC MOTOR OF THE ER-9^T SERIES

I. A. Menshikov

Приведены результаты разработки методики выявления диагностического признака из спектра тока в цепи якоря тягового электродвигателя типа РТ-51М с повышенным отработанным ресурсом. Проблемы оценки надежности тяговых электрических машин на железнодорожном транспорте с повышенным отработанным ресурсом предлагается решать с помощью выявления диагностического признака из спектра тока в цепи якоря тягового электродвигателя постоянного тока.

Ключевые слова: электропоезд переменного тока, тяговый электродвигатель, спектральный анализ тока якоря электродвигателя

Электропоезда переменного тока серии ЭР-9^Т на Приволжской железной дороге эксплуатируются более 20 лет с повышенным отработанным ресурсом силового электромеханического оборудования. Для повышения безопасности движения и надежности эксплуатации электропоездов данной серии необходимо провести комплексную модернизацию существующих

The results relating the development of a method for detecting a diagnostic indicator from the current spectrum in the anchor chain of the traction motor of the RT-51M type with an increased expired service life are presented. It is proposed to solve the problems with estimating reliability of traction electric machines for the railway transport with high rate of expired service life by detecting the diagnostic characteristic from the spectrum of the current in the armature circuit of the traction motor DC.

Keywords: AC electric train, traction motor, spectral analysis of the motor armature current

систем регистрации параметров движения поезда и автоведения (РПД-А), дополнить эти системы устройствами мониторинга и диагностирования силовых цепей электрооборудования электропоезда. При длительной эксплуатации электроподвижного состава (ЭПС) структурным признаком наступления фазы критического износа изоляции обмоток якоря и возбуждения

главных полюсов, а также перехода ТЭД в состояние скрытого отказа служит образование сквозных трещин в межвитковой изоляционной композиции.

Для выявления и прогнозирования состояния изоляции силовых цепей электрооборудования предлагается в качестве диагностического параметра использовать спектр тока в цепи якоря тягового электродвигателя типа РТ-51М.

Диагностический параметр спектра тока в цепи якоря ТЭД в виде функции $S_I(k\omega)$, заданный на отрезке $t = 0 \dots t_N$, можно считать периодическим, то есть считать $S_I(t \pm nt_N) = S_I(t)$, где k – любое целое число, а t_N – период. Фурье [1, 2]:

$$S_I(k\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t), \quad (1)$$

где $a_k = a(k\omega)$ и $b_k = b(k\omega)$ образуют комплексный частотный спектр сигнала

$S_I(k\omega) = a_k - ib_k, i = \sqrt{-1}; \quad \omega = 2\pi / t_N$ – основная круговая частота; k – номер гармоники.

Составляющие спектра определяются преобразованием Фурье:

$$a_0 = \frac{1}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) \cos k\omega t dt; \\ b_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} s(t) \sin k\omega t dt, \quad (2)$$

где $S_I(t)$ – аналоговый диагностический сигнал значения тока в цепи якоря ТЭД.

Спектр диагностического периодического сигнала является линейчатым и определяется дискретными значениями в точках частот, кратных ω . Основная круговая частота ω играет роль масштабного множителя. Для непрерывного сигнала, $k = 1 \dots \infty$, то есть спектр является бесконечным. Спектр тока в цепи якоря ТЭД типа РТ – 51М показан на рис. 1.

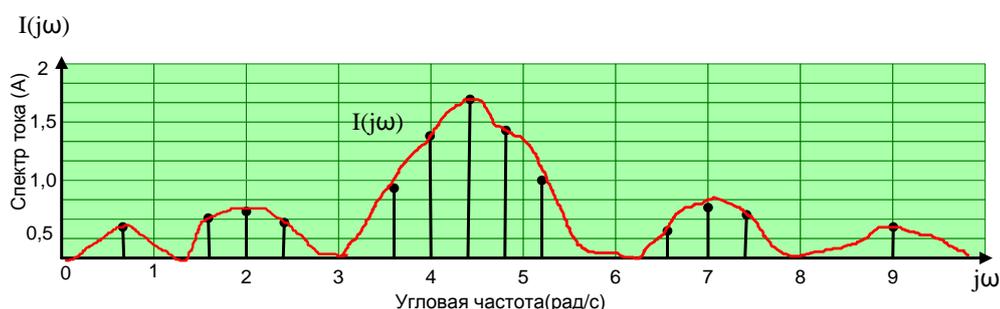


Рис. 1. Спектр тока в цепи якоря ТЭД типа РТ – 51М

При исследовании и анализе переходных процессов удобно пользоваться интегралом свертки, который в дискретном виде имеет вид:

$$s(t)_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_I(k) g(m-k), \\ m = 0 \dots N-1, \quad (3)$$

где $S_I(k)$ – дискретный спектр сигнал на входе диагностической системы; $g(m-k)$ – импульсная переходная функция системы.

При спектральном анализе тока в цепи якоря ТЭД рассматриваются не изменения

тока, а изменения его спектра. Как известно, реакция линейной цепи на воздействие синусоидального сигнала заключается в изменении амплитуды и начальной фазы этого сигнала. Поскольку параметры цепи зависят от частоты, эти изменения также являются функциями частоты. Поэтому об изменении спектра тока удобно судить по частотным характеристикам цепи. На рис. 1 представлен спектр тока в цепи якоря ТЭД типа РТ – 51М.

Рассмотрим блок определения состояния пороговых датчиков как четырехполюсник, имеющий комплексное сопротив-

ление $Z(j\omega)$. К входным зажимам четырехполюсника с датчиков тока и напряжения подводится импульсное напряжение $u(t)$ и ток якоря ТЭД, имеющий несинусоидальную форму $i(t)$, спектральная плотность которого равна $I(j\omega)$.

В соответствии с законом Ома спектральная плотность тока равна

$$I(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{Z(j\omega)}. \quad (4)$$

Ток в цепи якоря ТЭД как функцию времени мы можем найти с помощью обратного преобразования Фурье:

$$i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega. \quad (5)$$

Как известно, передающие свойства четырехполюсников характеризуются передаточными функциями [3, 4]. Комплексной передаточной функцией называют отношение комплексной амплитуды реакции к комплексной амплитуде входного воздействия. Спектральная функция выходного тока якоря имеет вид

$$I_2(j\omega) = H(j\omega)I_1(j\omega). \quad (6)$$

Представим комплексную передаточную функцию в показательной форме:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \exp[j\varphi(\omega)]. \quad (7)$$

Из последнего равенства следует, что на частоте ω модуль выходного тока якоря отличается от входного в $|H(\omega)|$ раз, а начальная фаза выходного тока от фазы входного – на угол $\varphi(\omega)$. Расчет линейной цепи спектральным методом выполняется в следующем порядке.

1. Определяется комплексная функция цепи.
2. Находится спектр входного воздействия.
3. Вычисляется спектр реакции.
4. Определяется обратное преобразование спектра.

Спектральный метод расчета применим и в том случае, если на входе действует периодическая несинусоидальная функ-

ция. Спектр такой функции является дискретным. Обозначим комплексные амплитуды гармоник входного тока якоря $I_K^{(1)}$. Комплексная амплитуда k -й гармоники на выходе

$$I_K^{(2)}(j\omega) = H(j\omega_k)I_K^{(1)}(j\omega), \quad (8)$$

где $H(j\omega_k)$ – значение комплексной передаточной функции на частоте k -й гармоники.

Таким образом, выходной ток в цепи якоря можно описать соотношением

$$I_2(t) = \frac{I_0^{(1)}}{2} H(0) + \sum_{k=1}^n I_K^{(1)} H(jk\omega_k) [\sin(k\omega_k t + \varphi(k\omega_k))]. \quad (9)$$

Амплитуды гармоник периодической функции быстро убывают с ростом порядкового номера. Поэтому на практике ограничиваются частной суммой ряда, число гармоник которой зависит от скорости сходимости ряда и требуемой точности [2].

В качестве примера рассчитаем спектр тока в цепи якоря ТЭД типа РТ-51М электропоезда переменного тока серии ЭР-9^Т частотным методом. Необходимо определить спектр тока на выходе схемы анализатора спектра, блока выделения и формирования диагностического сигнала. На рис. 2 представлена структурная схема блока обработки и выделения диагностического сигнала.

При нарушении устойчивости функционирования ЭМС ток в цепи якоря на входе датчика тока представляет собой высокочастотные несинусоидальные импульсы с периодом $T = 3.14 \cdot 10^{-3}$ с и единичной амплитудой.

На рис. 3 показаны высокочастотные импульсы тока якоря ТЭД на входе блока определения состояния пороговых датчиков..

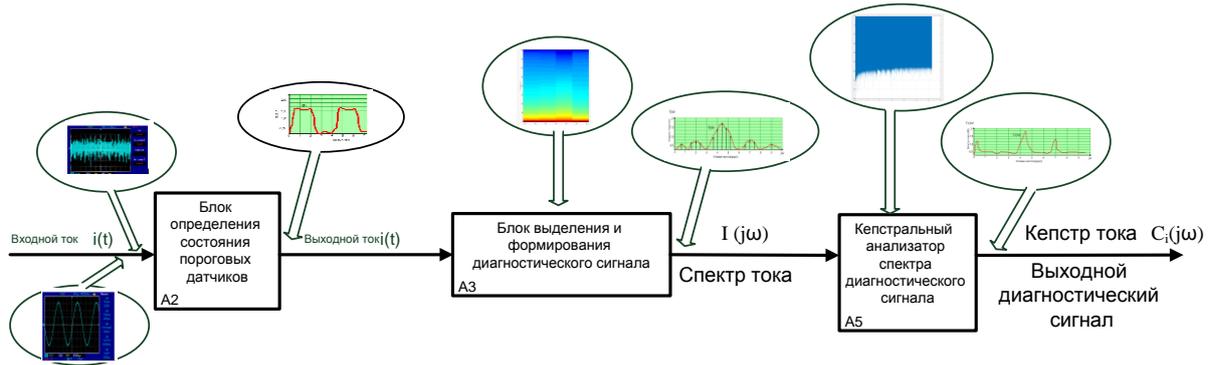


Рис. 2. Структурная схема блока обработки и выделения диагностического сигнала

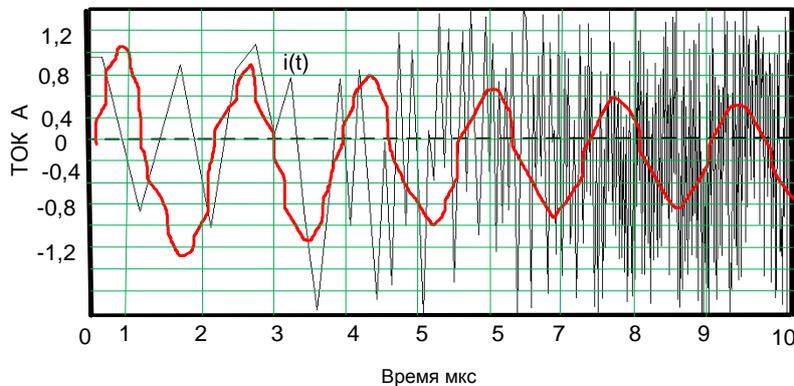


Рис. 3. Высоочастотные импульсы тока якоря ТЭД на входе блока определения состояния пороговых датчиков

Блок определения состояния пороговых датчиков представляет собой активный фильтр. Электрическая схема выделения диагностического сигнала представлена на

рис. 4. Элементы схемы имеют следующие значения: $R1 = 14,14$ кОм, $R2 = 4,71$ кОм, $C1 = 0,01$ мкФ, $C2 = 0,015$ мкФ. Коэффициент усиления усилителя $K = 2$.

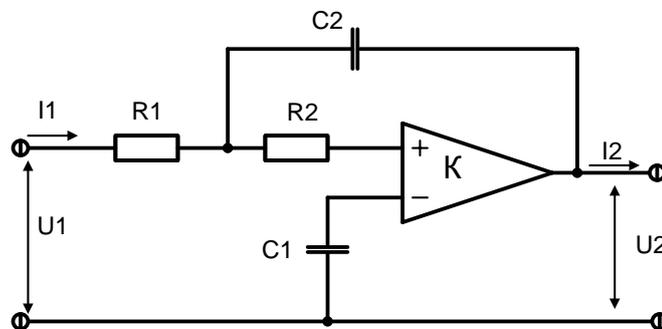


Рис. 4. Электрическая схема выделения диагностического сигнала

Разложение в ряд Фурье периодической функции времени тока якоря ТЭД имеет вид

$$i_1(t) = \frac{i_m}{2} + \frac{2i_m}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \right) = 250 + 318,3 \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \right).$$

Частота первой гармоники равна

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}.$$

Передаточная функция блока обработки и выделения диагностического сигнала имеет вид

$$H(j\omega) = \frac{K}{R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{1}{-\omega^2 + j\omega \left[\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \cdot (1-K) \right]}.$$

Подставив сюда значения элементов схемы активного фильтра, получим

$$H(j\omega) = \frac{2 \cdot 10^8}{-\omega^2 + j\omega \cdot 1,414 \cdot 10^4 + 10^8}.$$

Амплитуды гармоник тока на выходе активного фильтра:

$$A_0 = 1.0, A_1 = 1.274, A_3 = 0.415, A_5 = 0.182, A_7 = 0.084, A_9 = 0.042.$$

Начальные фазы гармоник (в радианах):

$$j_1 = -0.284, j_3 = -0.92, j_5 = -1.57, j_7 = -2.026, j_9 = -2.297.$$

График амплитудно-частотной характеристики показан на рис. 5, а на рис. 6 показана фазочастотная характеристика (значения ФЧХ даны в радианах).



Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика активного фильтра



Рис. 6. Фазочастотная характеристика активного фильтра

Ток на выходе активного фильтра блока выделения диагностического сигнала

$$i_2(t) = 1 + 1,274 \sin(\omega t - 0,287) + \\ + 0,41 \sin(3\omega t - 0,92) + \\ + 0,182 \sin(5\omega t - 1,57) + \\ + 0,084 \sin(7\omega t - 20,26) + \\ + 0,042 \sin(9\omega t - 2,297).$$

График тока на выходе активного фильтра блока выделения диагностического сигнала представлен на рис. 7.

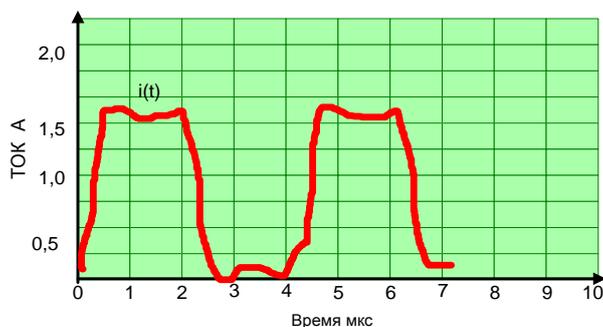


Рис. 7. График тока на выходе активного фильтра блока выделения диагностического сигнала

Таким образом, анализируя спектральные токовые характеристики можно сделать вывод, что ток на выходе активного фильтра имеет пологий фронт, а также заметный выброс (перерегулирование). Рассмотренный пример показывает, что реак-

ция линейной цепи на воздействие периодического сигнала заключается в изменении амплитуд и начальных фаз гармоник, составляющих сигнал. При этом спектральный состав сигнала на выходе цепи не изменяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдберг О.Д.** Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.

2. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. СПб.: Питер, 2006. 751 с.

3. Основы технической диагностики. (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия, 1981. 320 с.

4. **Менщиков И.А.** Математические методы исследования электромеханических систем обеспечения безопасности движения в переходных режимах функционирования / И.А. Менщиков // Наука и образование транспорту: сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Самара: СамГУПС, 2009.- 302 с.

Менщиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электро-технология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

**МОДЕЛИ ОДИНАРНЫХ СХЕМ ИСПЫТАНИЙ
ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Е.В. Николаев

**MODELS OF SINGLE TEST
PATTERNS FOR LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS UNDER VARIOUS
MOTOR FIELD TYPES**

E.V. Nikolaev

Построена серия нелинейных математических моделей электродинамических схем испытаний двигателей постоянного тока на повышенную частоту вращения и прочность межвитковой изоляции. Предусмотрено использование принятых в технике последовательного, параллельного и смешанного типов возбуждения. Каждая модель представляет собой совокупность уравнений Кирхгофа для электрической цепи, механического уравнения моментов и соотношения для скорости изменения температуры обмотки якоря испытуемого двигателя. Получены стационарные режимы и условия их асимптотической устойчивости, которые дают границы устойчивости на прямой или плоскости управляющих параметров. Показано, что стационарные режимы при параллельном возбуждении могут терять устойчивость только в результате перегрева обмотки якоря, а при последовательном и смешанном и через перегрев, и путем появления автоколебаний

Ключевые слова: испытание тяговых двигателей постоянного тока, нелинейные математические модели электродинамических схем испытаний тяговых двигателей, одинарные схемы испытаний тяговых двигателей

A series of nonlinear mathematical models of electrodynamic circuits to test DC motors for increased speed and strength of interturn insulation has been designed. The models ensure utilization of the accepted consecutive, parallel and mixed types of excitation. Each model is a set of Kirchhoff equations for an electrical circuit, and mechanical equations of moments and correlation for the temperature variation rate in the armature winding of the test motor. Steady-state modes and conditions for their asymptotic stability have been obtained, which provide stability boundaries over the straight line or plane of control parameters. It is shown that the stationary modes with parallel excitation can lose stability only as a result of overheating of the armature winding, whereas under the series or compound excitations, stability can be lost through overheating or emerging self-oscillations.

Keywords: testing traction DC motors; mathematical model of Nonlinear electrodynamic circuits testing of traction motors; a single pattern of testing traction motors

Одинарные схемы испытаний тяговых двигателей постоянного тока для основных типов возбуждения. Предусмотренные ГОСТ 2582-81 приемодаточные испытания электрических машин постоянного тока, например, тяговых электродвигателей (ТЭД) необходимо проводить при помощи специального аппаратного комплекса - испытательной станции тяговых двигателей. К этим испытаниям, в частности, относятся испытание на повышенную частоту вращения и проверка электрической прочности витковой изоляции. Эти испытания объединяет то, что все они проводятся при постоянной нагрузке электрических машин. В качестве схемы проведения испытаний принимается классическая схема проведения испытаний двух тяговых двигателей методом взаимной нагрузки с выяснением потерь, возникающих в испытуемых двигателях. Данная схема позволяет наиболее качественно производить испытания ТЭД с получением для любого испытуемого двигателя значений параметров, близких к номинальным. Использование метода взаимной нагрузки многократно снижает мощности преобразователей и потребления электроэнергии из сети для проведения испытаний. Также не требуются гасящие и инвертирующие устройства для гашения излишков энергии. Постоянное напряжение в цепи испытуемого двигателя и нагрузки подается от линейного генератора (ЛГ), который, как и вольтодобавочная машина (ВДМ), является электрической машиной постоянного тока. Оба они имеют групповой привод от электрической машины. ЛГ и ВДМ могут заменяться статическими преобразователями (ЛП и ВДП соответственно), которые имеют на входе характеристики, аналогичные машинным преобразователям тока. Вследствие данного условия в дальнейшем нет деления на статические и машинные преобразователи, и они рассматриваются как одинаковые источники постоянной сторонней ЭДС. При расхождении характеристик испытуемых ТЭД в допустимых нормативными документами пределах ($\pm 3\%$) возможен переход ЛГ (ЛП) или

ВДМ (ВДП) из генерирующего в двигательный режим. При использовании ЛГ и ВДМ переход осуществляется автоматически, причем благодаря групповому приводу ЛГ и ВДМ механическая энергия передается на вал генератора и возвращается им в систему испытания как электрическая. При применении статических преобразователей (ЛП и ВДП) на испытательной станции ТЭД такой переход требует их инвертирования, которое осуществляется посредством управления характеристиками преобразователей. В модельном подходе можно обойтись возможностью смены знака подаваемого в цепь испытуемой машины напряжения.

Схемы для моделируемых типов испытаний можно назвать одинарными по количеству параллельных цепей, подключенных к источнику постоянного напряжения U . При каждом виде испытаний возможно использование любого из трех видов возбуждения: параллельного, последовательного и смешанного. На рис. 1 показаны одинарные схемы, соответствующие этим способам.

Механическая связь валов обеих машин в случае одинарной схемы обеспечивает нагрузку для якоря испытуемой машины, работающей в двигательном режиме. При этом одним из определяющих факторов является обеспечение совместной работы двух электрических машин во время проведения испытаний, что порождает проблему устойчивости работы испытательной схемы при различных разбросах характеристик электрических машин.

1. Постановка задачи моделирования испытательного процесса. Основной целью настоящей работы является получение критериев выбора схемы возбуждения для каждого вида испытаний на основе серии простейших динамических моделей испытательного процесса. Ключевым требованием к этим моделям является требование «минимальности»: с одной стороны, их структура и число переменных должны допускать элементы аналитического исследования, а с другой – они обязаны адекватно отражать главные физические

закономерности протекающих в электро-механической системе процессов и при компьютерной имитации давать сравнимые с экспериментальными данными траектории. Этому требованию удовлетворяют системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с гладкими правыми частями невысокой размерности, реализующие фундаментальные физические соотношения: законы Кирхгофа для электрических цепей, закон

сохранения момента импульса и второй закон термодинамики. Поэтому простейшую задачу моделирования испытаний можно поставить следующим образом: для каждой из схем рис. 1 построить динамическую модель и исследовать устойчивость стационарных режимов в зависимости от контролируемых испытателем параметров, ввести характеристику выбора типа возбуждения для каждого типа испытаний.

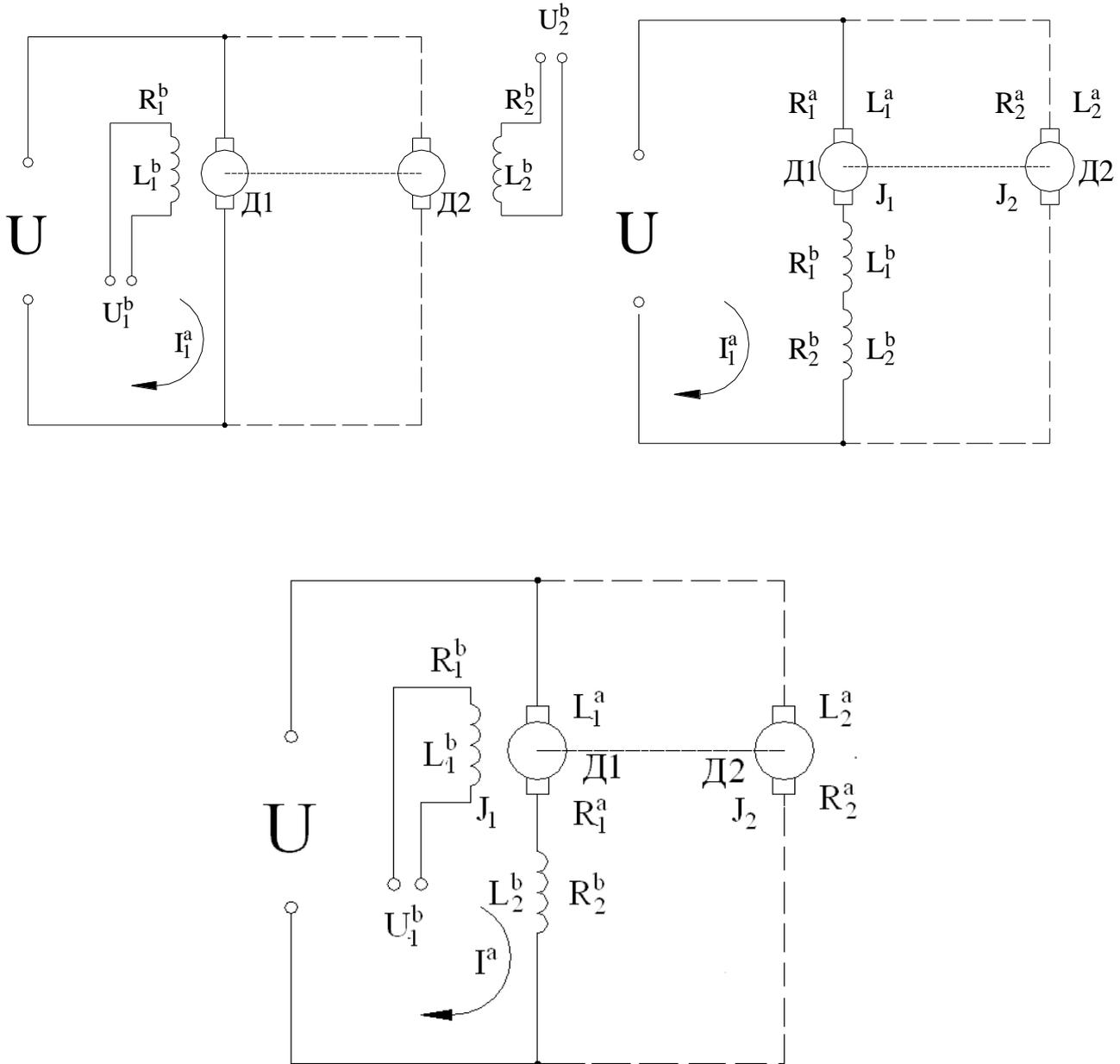


Рис. 1. Простейшие (одинарные) схемы испытаний тяговых двигателей: на повышенную частоту и проверка межвитковой изоляции

Исследование влияния линейного преобразователя и вольтодобавочной машины на динамику электромагнитных процессов в испытательной схеме на данном шаге исследования не проводится. В рассматриваемых моделях не учитываются следующие процессы:

- взаимоиндукция якорей и обмоток возбуждения, то есть реакция якорей (считается, что добавочные полюса хорошо компенсируют порождаемое обмоткой якоря магнитное поле, а компенсационная обмотка нейтрализует реакцию добавочных полюсов);

- зависимость сопротивлений обмоток якоря нагрузочной машины и обмоток возбуждения от температуры;

- напряжение, подаваемое в цепи, считается регулируемым параметром, в то время как в реальной испытательной станции оно формируется специальным блоком тиристорных преобразователей.

Каждая из изучаемых моделей включает уравнение Кирхгофа для электрической цепи якоря испытуемого двигателя, уравнение для превышения температуры об-

мотки якоря, уравнение сохранения момента импульса вала, поскольку в связи с жестким соединением валов двух машин инерция вращения имеет существенное значение в динамике процесса. Соотношение для превышения температуры обмотки якоря испытуемого двигателя является выражением закона сохранения энергии: вырабатываемая за счет прохождения тока мощность расходуется на нагревание обмотки и рассеяние в окружающем пространстве путем теплопередачи. Отвод теплоты с помощью вентиляции в данных моделях не учитывается. Сопротивление обмотки якоря испытуемого двигателя считаем зависящим от превышения температуры по обычному линейному закону:

$$R^a = R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau),$$

где $\alpha_0^a = 0,00433$ – коэффициент линейного расширения меди, τ – величина превышения температуры над температурой в холодном состоянии. Выражение для количества теплоты, излучаемого с поверхности обмотки в единицу времени, по закону Стефана-Больцмана имеет вид [2]:

$$Q_{\text{изл}} = k_{\text{лч}}(T_1^4 - T_0^4)S^a = k_{\text{лч}} S^a \tau [4T_0^3 + 4T_0\tau^2 + 6T_0^2\tau + \tau^3],$$

где T_0 – абсолютная температура излучающей обмотки, T_1 – абсолютная температура окружающей среды, $k_{\text{лч}}$ – модифицированный коэффициент лучеиспускания. За счет конвекции отводится в единицу времени

$$Q_{\text{конв}} = k_{\text{конв}} S^a \tau.$$

Однако учет слагаемых со степенями τ выше первой необязателен, поскольку они слабо влияют на скорость изменения превышения температуры, и можно ограничиться лишь линейным разложением по τ количества теплоты, отводимого от обмотки совместно излучением и конвекцией:

$$Q_{\text{общ}} \approx (k_{\text{конв}} + k_{\text{лч}} \cdot 4 \cdot T_0^3) S^a \tau = k_0^T S^a \tau,$$

где $k_0^T \approx 11,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ – объединенный удельный коэффициент теплоотдачи.

Следовательно, уравнение для превышения температуры обмотки якоря одно и то же для всех моделей и представляет собой уравнение теплового баланса:

$$cm^a \frac{d\tau}{dt} = R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) I^{a2} - k_0^T S^a \tau,$$

где c – удельная теплоемкость меди, m^a – масса обмотки, S^a – площадь поверхности обмотки.

Так как реакция якоря не учитывается в моделях, уравнение для обмотки возбуждения в случаях, когда она не включена в цепь якоря, принимает простейший вид

$$L_i^s \frac{dI_i^s}{dt} = U_i^s - I_i^s R_i^s, \quad i=1,2$$

и имеет точное аналитическое решение:

$$I_i^s = \frac{U_i^s}{R_i^s} (1 - e^{-R_i^s t / L_i^s}).$$

Поэтому в качестве управляющих параметров схем испытаний выбираются напряжение возбуждения U_1^B , однозначно определяющее стационарное значение тока возбуждения, и напряжение U , подаваемое в цепь якоря испытуемой машины. Зависимость потока электромагнитной индукции якоря от тока возбуждения можно аппроксимировать дробно-рациональной функцией, обладающей свойством насыщения, по формуле

$$\Phi(I) = \frac{k_0^\Phi I}{k_1^\Phi + I}, \quad (1)$$

где коэффициенты определяются из экспериментальной магнитной характеристики двигателя. На рис. 2 показана такая аппроксимация для характеристики двигателя постоянного тока НБ-412К, коэффициенты которой получены с помощью решения переопределенной линейной системы алгебраических уравнений с применением метода наименьших квадратов.

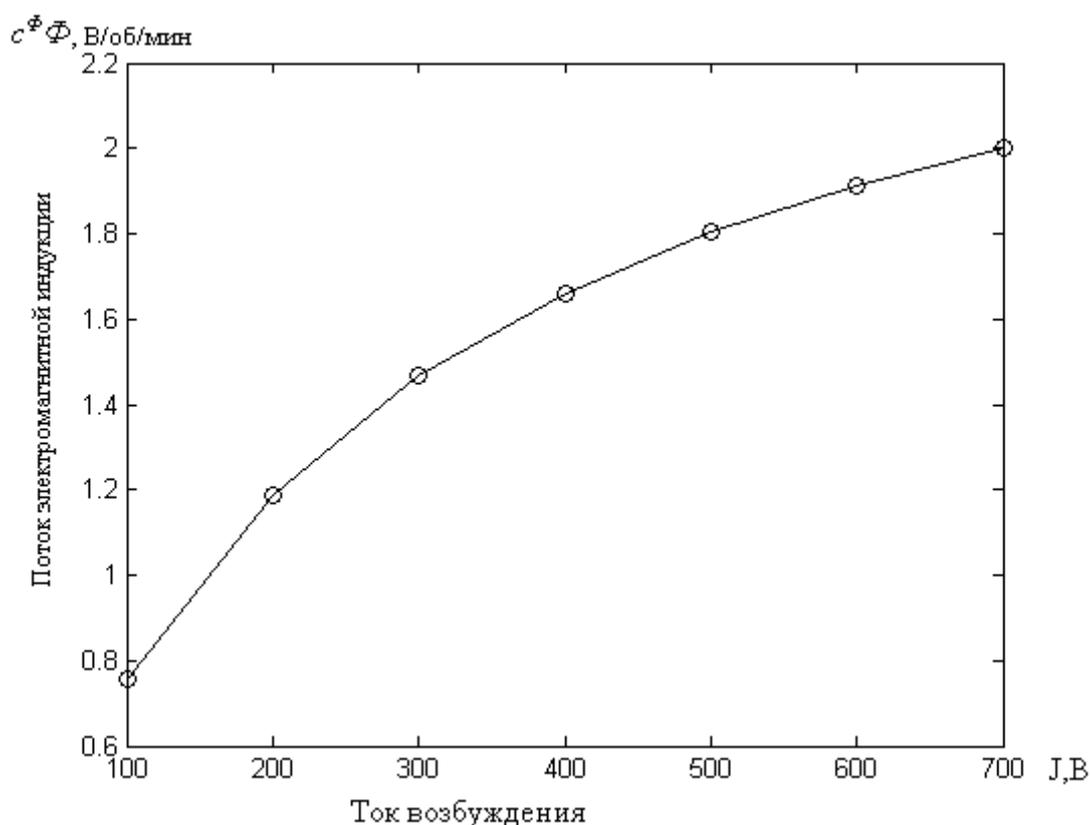


Рис. 2. Аппроксимация кривой намагничивания двигателя НБ-412К

Исходные уравнения для токов якорей, угловой частоты вращения валов и превышения температуры обмотки якоря испытуемой машины в каждой из изображенных на рис. 1 схем перечислены в табл. 1. В табл. 2 дана расшифровка обозначений переменных и параметров. Из уравнений табл. 1 можно видеть, что нелинейность возникает благодаря двум факторам: нелинейной зависимости магнитного потока

индукции от тока возбуждения и учету влияния изменения температуры на сопротивление обмотки якоря. Если первый из них учитывался в предшествующих моделях как определяющий физический эффект, то второй, как правило, в целях упрощения игнорировался. В данной работе изучается влияние обоих эффектов на устойчивость стационарных режимов работы испытательной схемы.

Уравнения динамических моделей для одинарных схем испытаний

Тип возбуждения	Уравнения модели испытательной схемы
Параллельное	$\frac{dI_1^e}{dt} = \frac{1}{L_1^e} [U_1^e - I_1^e R_1^e];$ $I_1^a R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) = U - \frac{dI_1^a}{dt} L_1^a - \frac{c_1^\phi}{2\pi} \Phi_1(I_1^e) \omega;$ $\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{cm^a} [R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) (I_1^a)^2 - k_0^T S^a \tau];$ $(J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt} = c_1^M \Phi_1(I_1^e) I_1^a - M_1^C - M_2^C.$
Последовательное	$I^a (R_1^e + R_2^e + R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau)) = U - \frac{dI^a}{dt} (L_1^a + L_1^e + L_2^e) - \frac{c_1^\phi}{2\pi} \Phi_1(I^a) \omega;$ $\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{cm^a} [R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) (I^a)^2 - S^a k_0^T \tau];$ $(J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt} = c_1^M I^a \Phi_1(I^a) - M_1^C - M_2^C$
Смешанное	$\frac{dI_1^e}{dt} = \frac{1}{L_1^e} [U_1^e - I_1^e R_1^e];$ $I^a (R_2^e + R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau)) = U - \frac{dI^a}{dt} (L_1^a + L_2^e) - \frac{c_1^\phi}{2\pi} \Phi_1(I_1^e) \omega - \frac{c_2^\phi}{2\pi} \Phi_2(I^a) \omega;$ $\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{cm^a} [R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) (I^a)^2 - k_0^T S^a \tau];$ $(J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt} = I^a (c_1^M \Phi_1(I_1^e) + c_2^M \Phi_2(I^a)) - M_1^C - M_2^C.$

Таблица 2

Переменные и параметры динамических моделей схем испытаний

Переменные	
Обозначение	Расшифровка
I^a	Ток якоря испытуемого двигателя
ω^a	Угловая частота вращения сцепленных валов
τ	Превышение температуры якоря испытуемого двигателя

Параметры и величины	
$L_1^a, L_2^a, L_1^b, L_2^b$	Индуктивности якорей двигателей и обмоток возбуждения
U_1^b, U	Напряжения на обмотках возбуждения и в цепи якоря
R_2^a, R_1^b, R_2^b	Сопrotивления нагрузочного якоря и обмоток возбуждения
R_0^a	Сопrotивление испытуемого якоря при температуре 20°C
α_0^a	Коэффициент температурного линейного расширения меди
c	Удельная теплоемкость меди
m^a	Масса якоря испытуемого двигателя
S^a	Площадь поверхности обмотки якоря испытуемого двигателя
J_1, J_2	Моменты инерции якорей
Φ	Поток электромагнитной индукции якоря
M_1^c, M_1^c	Моменты холостого хода
$c_1^\Phi, c_2^\Phi, c_1^M, c_2^M$	Коэффициенты потоков индукции и электромагнитных моментов

2. Стационарные режимы одинарных схем. Функционирование одинарных схем испытаний, показанных на рис. 1, во многом идентично, несмотря на разницу в типах возбуждения. Разрешая уравнения динамической модели табл. 1 относительно производных силы тока и угловой частоты вращения, получаем следующие системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в испытаниях с одинарной схемой:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{cm^a} \left[R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) (I^a)^2 - k_0^T S^a \tau \right], \quad (2)$$

при **параллельном возбуждении**

$$\frac{dI^a}{dt} = \frac{1}{L_1^a} (U - I^a R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) - \frac{c_1^\Phi}{2\pi} \omega \Phi_1(I_1^e)), \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_1 + J_2} (c_1^M \Phi_1(I_1^e) I^a - M_1^c - M_2^c),$$

при **последовательном возбуждении**

$$\frac{dI^a}{dt} = \frac{1}{L^a + L_1^a + L_2^a} \left[U - I^a (R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) + R_1^e + R_2^e) - \frac{c_1^\Phi}{2\pi} \omega \Phi_1(I^a) \right], \quad (4)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_1 + J_2} \left[c_1^M I^a \Phi_1(I^a) - M_1^c - M_2^c \right],$$

при смешанном возбуждении

$$\begin{aligned} \frac{dI^a}{dt} &= \frac{1}{L_1^a + L_2^s} \left[U - I^a (R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau) + R_2^s) - \frac{c_1^\phi}{2\pi} \omega \Phi_1(I_1^s) - \frac{c_2^\phi}{2\pi} \omega \Phi_2(I^a) \right], \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J_1 + J_2} \left[c_1^M I^a \Phi_1(I_1^s) + c_2^M I^a \Phi_2(I^a) - M_1^c - M_2^c \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где Φ_i – магнитный поток якоря машины;

$c_i^\phi = \frac{pN \cdot 10^{-8}}{60 \cdot a}$ – коэффициент потока;

$c_i^M = \frac{pN}{2\pi a}$ – коэффициент электромагнит-

ного момента; $2p$ – число полюсов; N – число активных проводников обмотки; $2a$ – число параллельных цепей; $i = 1, 2$, а остальные параметры расшифрованы в табл. 2.

Величины индуктивностей якорей и обмоток возбуждения вычислялись согласно формулам, предложенным в работе (Гольдберг, 2001). Стационарные режимы отвечают равенству нулю правых частей уравнений (2)-(5), которые в каждом случае имеют свои отличия. Стационарный ток определяется равенством нулю правой части уравнения для $d\omega/dt$: для случая (3)

сила тока якоря равна $I_1^{ac} = \frac{(M_1^c + M_2^c)}{c_1^M \Phi_1^{ec}}$,

для (4) отвечает уравнению

$\Phi_1(I_c^a) = \frac{M_1^c + M_2^c}{c_1^M I_c^a}$, для (5) – соотноше-

нию $I_c^a (c_1^M \Phi_1^{ec} + c_2^M \Phi_2(I_c^a)) = M_1^c + M_2^c$.

Стационарные значения превышения температуры обмотки и частоты вращения якоря находятся из равенства нулю правой

части (2): $\tau_c = \frac{R_0^a (I_c^a)^2}{k_0^T S^a - R_0^a \alpha_0^a (I_c^a)^2}$ и также

зависят от напряжения возбуждения.

Стационарная угловая частота вращения якоря испытуемого двигателя в случае параллельного возбуждения дается соотношением

$\omega_c = (U - I_c^a R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau_c)) \frac{2\pi}{c_1^\phi \Phi_1^{ec}}$,

а при последовательном возбуждении формулой

$\omega_c = (U - I_c^a (R_1^s + R_2^s + R_0^a (1 + \alpha_0^a \tau_c))) \frac{2\pi}{c_1^\phi \Phi(I_c^a)}$.

Для смешанного возбуждения стационарная угловая частота вращения имеет вид

$\omega_c = \left(U - I_c^a (R_2^s + R_0^a \frac{k_0^T S^a}{k_0^T S^a - R_0^a \alpha_0^a I_c^{a2}}) \right) \frac{2\pi I_c^a}{M_1^c + M_2^c}$.

Видно, что напряжение в цепи якоря влияет только на величину стационарной частоты вращения, а поток возбуждения в явном виде присутствует во всех стационарных значениях переменных. Зависимость (1) потока электромагнитной индукции от тока возбуждения порождает единственное значение стационарного тока для параллельного и последовательного возбуждения, а в случае смешанного – квадратное уравнение для I_c^a вида

$(c_2^M k_0^\phi + c_1^M \Phi_1^{ec}) I_c^{a2} + I_c^a (c_1^M k_1^\phi \Phi_1^{ec} - M_1^c - M_2^c) - k_1^\phi (M_1^c + M_2^c) = 0$,

которое может иметь максимум два решения.

3. Устойчивость стационарных режимов при изменении управляющих параметров. Вычисляя производные правых частей каждой из систем (2)-(5), легко показать, что матрица Якоби, собственные числа которой отвечают за устойчивость стационарного режима, или ее главная подматрица имеет одинаковую структуру для всех трех типов возбуждения:

$$D = \begin{bmatrix} a & b & s \\ d & e & 0 \\ f & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ей соответствует характеристическое уравнение:

$$\det(D - \lambda E) = (a - \lambda)(e - \lambda)(-\lambda) - fs(e - \lambda) + \lambda bd = -\lambda^3 + \lambda^2(a + e) - ae\lambda - fse + fs\lambda + bd\lambda = \\ = \lambda^3 - (a + e)\lambda^2 + \lambda(ae - fs - bd) + fse = \lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0,$$

коэффициенты которого для каждого типа возбуждения реализуются по-своему. Общим является формат границ устойчивости стационарного режима:

$$\det D = a_3 = fse = 0$$

– граница седло-узла;

$$-trA = R_n = a_1a_2 - a_3 = \\ = (a + e)(bd - ae) + afs = 0 \quad (6)$$

– линия автоколебаний.

Обозначим $\Phi_i'(I_c^a) = d\hat{O}_i / dI^a|_{I^a=I_c^a}$. Во всех случаях в силу уравнения (2)

$$I_{\dot{\delta}\delta}^a = \sqrt{\frac{k_0^T S^a}{R_0^a \alpha_0^a}}.$$

Оно означает, что при $I^a > I_{кр}^a$ установившийся режим теряет устойчивость, и траектория системы уходит в бесконечность по переменной τ , что физически соответствует перегреву обмотки якоря. Величина $f > 0$, поскольку для параллельного

возбуждения она равна $\frac{c_1^M \Phi_1^{ec}}{J_1 + J_2}$, в случае

последовательного $\frac{c_1^M (\Phi_1(I_c^a) + I_c^a \Phi_2'(I_c^a))}{J_1 + J_2}$,

а при смешанном

$$\frac{R_0^a}{ct^a} \left(\frac{k_0^T S^a c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}^2}}{L_1^a (k_0^T S^a c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}^2} - R_0^a \alpha_0^a (M_1^c + M_2^c)^2)} + \frac{k_0^T S^a c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}^2} - R_0^a \alpha_0^a (M_1^c + M_2^c)^2}{ct^a R_0^a c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}^2}} \right) \times \\ \times \left(k_0^T S^a c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}^2} + R_0^a \alpha_0^a (M_1^c + M_2^c)^2 \right) = \frac{c_1^i c_1^3 (\Phi_1^{\hat{a}\hat{n}})^4}{2\pi L_1^a (J_1 + J_2)}. \quad (7)$$

Уравнение (7) преобразуется к сложному уравнению 4-й степени относительно Φ_{ec}^2 . Легко видеть, что выражение (7) не зависит от напряжения в цепи якоря U , откуда ясно, что если в системе могут возникнуть автоколебания, то только при вариации напряжения в цепи возбуждения. Численная проверка для двигателя НБ-412К

$$\frac{c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}} + c_2^i (\Phi_2(I_c^a) + I_c^a \Phi_2'(I_c^a))}{J_1 + J_2},$$

где штрих обозначает производную потока индукции по силе тока, взятую при стационарном его значении. Условие $s < 0$, парное для устойчивости к $e < 0$, выполнено автоматически при всех типах возбуждения.

Равенство (6), при котором в моделируемых системах могут появиться автоколебания, может быть записано в виде неявной функции одного или двух регулируемых параметров – напряжения в цепи якоря U и магнитного потока возбуждения Φ_1^{ec} . Это выражение индивидуально для каждого вида возбуждения.

Параллельное возбуждение

$$R_n = (a + e)(bd - ae) + afs = \\ = \frac{R_0^a I_c^{a2}}{ct^a} \left(2\alpha_0^a + \frac{1}{\tau_c} \right) \left(\frac{1 + \alpha_0^a \tau_c}{L_1^a} + \frac{I_c^{a2}}{ct^a \tau_c} \right) - \\ - \frac{c_1^M c_1^M (\Phi_1^{ec})^2}{2\pi L_1^a (J_1 + J_2)} = 0,$$

что при подстановке выражения для τ_c , имея в виду, что стационарный ток равен

$$I_1^{ac} = \frac{(M_1^c + M_2^c)}{c_1^M \Phi_1^{ec}}, \text{ дает равенство:}$$

дает при соответствующем пересчете критическое значение Φ_1^{ec} , превышающее величину

$$\Phi_{\dot{\delta}\delta}^{\hat{a}\hat{n}} = \frac{M_1^c + M_2^c}{c_1^i \sqrt{\frac{k_0^T S^a}{R_0^a \alpha_0^a}}}, \text{ вытекающую из}$$

формулы (5). Следовательно, перегрев об-

мотки наступает при меньших значениях напряжения, чем колебания, и поэтому в реальности они не реализуются. Для других типов двигателей результат может быть противоположным.

Последовательное возбуждение

$$R_H = (a + e)(bd - ae) + afs = - \left[\frac{1}{L} (R + R_0 \alpha_0^a \tau_c + \frac{c_1^\Phi \omega_c \Phi_1'(I_c^a)}{2\pi}) + \frac{R_0 I_c^{a2}}{cm^a \tau_c} \right] \cdot \left[2 \frac{\alpha_0^a R_0 I_c^{a2}}{Lcm^a} (1 + \alpha_0^a \tau_c) + \right. \\ \left. \left[+ \frac{R_0 I_c^{a2}}{cm^a L \tau_c} (R + R_0 \alpha_0^a \tau_c + \frac{c_1^\Phi}{2\pi} \omega_c \Phi_1'(I_c^a)) \right] - \frac{c_1^\Phi c_1^M \Phi_1^{ac} (\Phi_1^{ac} + I_c^a \Phi_1'(I_c^a))}{2\pi L^2 (J_1 + J_2)} \cdot R + R_0 \alpha_0^a \tau_c + \frac{c_1^\Phi}{2\pi} \omega_c \Phi_1'(I_c^a) = 0, \quad (14)$$

что при подстановке выражений для τ_c и ω_c даст квадратное уравнение для критических значений напряжения в цепи якоря испытуемого двигателя:

$$aU^2 + bU + c = 0,$$

в котором коэффициенты сложным образом выражаются через параметры обмоток якоря и возбуждения. Стационарный ток якоря при этом выражается через механические моменты двигателей и коэффициенты потока электромагнитной индукции и не зависит от напряжения возбуждения.

$$R_H = (a + e)(bd - ae) + afs = - \left[\frac{R_0 I_c^{a2}}{cm^a \tau_c} + \frac{1}{L_1 + L_1^s} (R_2^s + \frac{R_0 k_0^T S^a}{k_0^T S^a - R_0 \alpha_0^a I_c^{a2}} + \frac{c_2^\Phi}{2\pi} \omega_c \Phi_2'(I_c^a)) \right] \times \\ \times \left[\frac{2R_0^a \alpha_0^a I_c^{a2} k_0^T S^a}{cm^a (L_1^a + L_2^s)(k_0^T S^a - R_0 \alpha_0^a I_c^{a2})} + \frac{R_0 I_c^{a2}}{cm^a \tau_c (L_1^a + L_2^s)} (R_2^s + \frac{R_0 k_0^T S^a}{k_0^T S^a - R_0 \alpha_0^a I_c^{a2}} + \frac{c_2^\Phi}{2\pi} \omega_c \Phi_2'(I_c^a)) \right] + \\ + \frac{(R_2^a + \frac{R_0 k_0^T S^a}{k_0^T S^a - R_0 \alpha_0^a I_c^{a2}} + \frac{c_2^\Phi}{2\pi} \omega_c \Phi_2'(I_c^a))}{2\pi (L_1^a + L_2^s)(J_1 + J_2)} (\hat{n}_1^\Phi \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}} + c_2^\Phi \Phi_2(I_c^a)) (c_1^i \Phi_1^{\hat{a}\hat{n}} + c_2^i (\Phi_2(I_c^a) + I_c^a \Phi_2'(I_c^a))) = 0 \quad (15)$$

Повторяющееся выражение в скобках преобразуется к виду

$$\Psi(U, I_c^a) = R_2^a + \frac{R_0 k_0^T S^a}{k_0^T S^a - R_0 \alpha_0^a I_c^{a2}} + \frac{c_2^\Phi}{2\pi} \omega_c \Phi_2'(I_c^a) = \frac{c_2^\Phi I_c^a \Phi_2'(I_c^a)}{M_1^c + M_2^c} U + \Psi_1(I_c^a),$$

где

$$\Psi_1(I_c^a) = \left(R_2^{\hat{a}\hat{n}} + \frac{R_0 k_0^T S^a}{k_0^T S^a - R_0 \alpha_0^a I_c^{a2}} \right) \left(1 - \frac{c_2^\Phi \Phi_2'(I_c^a) I_c^{a2}}{M_1^c + M_2^c} \right)$$

– функция стационарной силы тока.

Подстановка выражений для τ_c и ω_c приводит к квадратному уравнению относительно напряжения в цепи якоря:

$$aU^2 + bU + c = 0,$$

в котором все коэффициенты сложным образом зависят от второго управляющего

В этом случае, если магнитная характеристика отвечает формуле (1), то стационарная сила тока в цепи якоря не зависит от изменяемого параметра U . Обозначим $L = L_1^a + L_1^s + L_2^s$, $R = R_0^a + R_1^s + R_2^s$. Тогда

параметра – стационарного потока возбуждения. Поэтому в случае смешанного возбуждения возможны оба варианта потери устойчивости стационарного режима работы испытательной схемы – как путем перегрева обмотки якоря, так и через возникновение автоколебаний.

Итак, учет нагрева обмотки якоря оказывает существенное воздействие на динамику одинарной испытательной схемы при всех типах возбуждения, приближая ее к реально наблюдаемой картине. При параллельном и последовательном возбуждении превышение управляющим напряжением критического значения ведет к разрушению обмотки под действием высо-

кой температуры, а в случае смешанного возбуждения могут вначале появиться автоколебания, а затем произойти перегрев обмотки.

В интервале от нуля до критического значения управляющего напряжения испытательная схема обладает устойчивостью, и, следовательно, легко управляется, что дает основание выбирать тип возбуждения для испытаний конкретного двигателя на основе величины этого интервала: чем она больше, тем на больших напряжениях стационарный режим останется устойчивым, и управляемость не ухудшится.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдберг О.Д.** Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг. М.: Высш. шк., 2001.

2. **Находкин М.Д.** Электрические машины постоянного тока / М.Д. Находкин. М.: МПС СССР, 1960.

3. **Баутин Н.Н.** Поведение динамических систем вблизи границы области устойчивости / Н.Н. Баутин. М.: Наука, 1984.

4. **Винокуров В.А.** Попов Д.А. Электрические машины железнодорожного

транспорта / В.А. Винокуров, Д.А. Попов. М.: Транспорт, 1986.

5. **Хэссард Б.** Теория и приложения бифуркации рождения цикла / Б. Хэссард, Н. Казаринов, И. Вэн. М.: Мир, 1985.

6. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.

7. **Скубов Д.Ю.** Нелинейная электромеханика / Д. Ю. Скубов, К. Ш. Ходжаев. М.: Физматлит, 2003. 360 с.

Николаев Евгений Владимирович – доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (МИИТ)

Evgeny V. Nikolaev – PhD, Department of Traction Equipment, Russian University of Transport (RUT MIIT)

Статья поступила в редакцию 28.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.3

ПРОТЯЖЕННЫЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

Г.И. Давыдов, А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин

LONG-DISTANCE POWER TRANSMISSION LINES IN THE NORTH-EAST OF RUSSIA

G.I. Davydov, A.M. Khoiutanov, P.F. Vasilyev, V.P. Kobylin

Наравне с широкомасштабной интеграцией ВИЭ на северо-востоке России следует рассмотреть транспорт электрической энергии на дальние расстояния применительно к децентрализованной зоне электроснабжения. Предложена магистральная линия в северном направлении, обеспечивающая централизованным электроснабжением новые промышленные центры северных и арктических территорий Якутии и разработаны новые методы построения протяженной электропередачи в заниженном классе напряжения на основе сильнооточной электроники.

Ключевые слова: Арктика, протяженные электропередачи, скомпенсированные электропередачи, тиристорный стабилизатор параметров, расщепленный провод

Дальний Восток России обладает уникальным потенциалом в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Это связано с технологическим прогрессом, влияющим на удешевление оборудования ВИЭ.

Ежегодные объемы «северного завоза» оцениваются в 320 тыс. тонн условного топлива, а затраты на них – в сумму, превышающую 9 млрд руб. Ежегодные расходы РАО «ЭС Востока» на подготовку объ-

Along with large-scale integration of renewable energy sources in the north-east of Russia, it is necessary to consider transmission of electrical energy over long distances, as applied to the decentralized power supply zone. A trunk line running to the north was proposed, providing centralized power supply for new industrial centers in the northern and arctic territories of Yakutia, and new methods for building extended power transmission lines of the low voltage class based on high-current electronics were developed.

Keywords: Arctic, long-distance power transmission line, compensated power transmission, thyristor parameter stabilizer, split wire

ектов компании к отопительному сезону составляют 10-11 млрд руб. [1].

Опыт, накопленный в советские годы, показывает, что можно экономить на дизельном топливе для ДЭС за счет использования технологий ВИЭ. Так, в Камчатском крае в структуре «РусГидро» действуют объекты геотермальной энергетики под управлением АО «Геотерм» (Паужетская, Мутновская и Верхне-Мутновская ГеоЭС) с совокупной уста-

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

новленной мощностью 74 МВт. Сегодня эти уникальные станции обеспечивают до 30 % энергопотребления центрального Камчатского энергоузла, позволяя значительно ослабить зависимость полуострова от дорогостоящего привозного топлива (мазута). Геотермальные источники на Дальнем Востоке есть не везде по сравнению с серьезным потенциалом использования энергий солнца и ветра для произ-

водства электрической энергии. Наибольший потенциал применения ВИЭ определен в Республике Саха (Якутия), в Приморье – это солнечные станции и ветрогенераторы, Камчатский край – ветрогенераторы, мини-ГЭС и геотермальные станции. Сахалинская область и Чукотский автономный округ – ветряная генерация [1]. Программа развития ВИЭ «Русгидро» представлена на рис. 1.

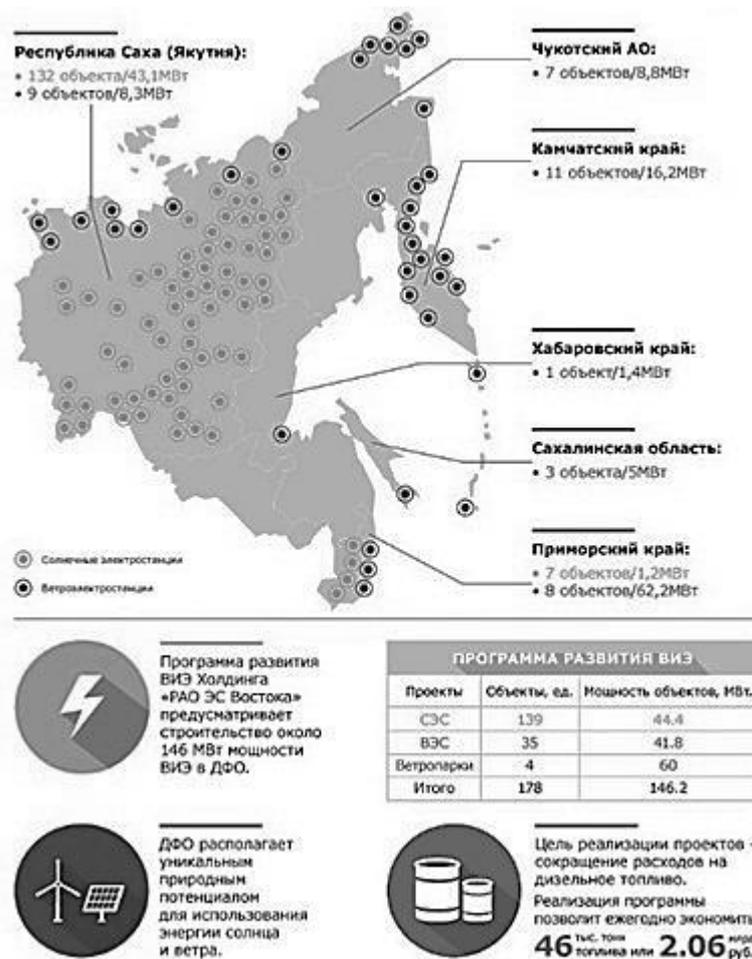


Рис. 1. Программа развития ВИЭ «Русгидро»

Наравне с широкомасштабной интеграцией солнечных и ветровых электростанций следует реализовать задачи транспорта электрической энергии на дальние расстояния применительно к децентрализованной зоне электроснабжения.

Согласно инвестиционной стратегии Республики Саха (Якутия) до 2030 года появится новый промышленный район в Арктической зоне Якутии.

Основная цель инвестиционного проекта «Комплексное развитие Томпонского горнопромышленного района» – создание на основе принципов государственно-частного партнерства условий для формирования на Дальнем Востоке России и на территории Томпонского района Якутии нового промышленного района, основанного на богатом природно-ресурсном потенциале и мероприятиях по развитию

транспортной и энергетической инфраструктуры.

Первый этап инвестиционного проекта включает:

- проекты освоения Нежданинского золоторудного и Верхне-Менкеченского серебряно-полиметаллического месторождений;

- строительство Джебарики-Хаинской угольной электростанции;

- строительство линии электропередач «Хандыга – Теплый Ключ – Развилка – Нежданинское» с ответвлением на Верхне-Менкече.

- строительство участка автомобильной дороги от федеральной трассы «Колыма» до Дыбинского перевала.

На втором этапе реализации инвестиционного проекта «Комплексное развитие Томпонского горнопромышленного района» возможно освоение Джалканского медного и Агылкинского медно-вольфрамового месторождений, строительство единого горно-обогатительного комбината.

Планируется возобновление добычи оловянных концентратов в Усть-Янском районе Республики Саха (Якутия).

Также в Республике Саха (Якутия) планируется реализация крупнейшего инвестиционного проекта освоения Яно-Колымской золоторудной провинции, в рамках которого планируются к освоению золоторудные месторождения Бадран, Удума, Дrajный, Малый Тарын, Базовский, а на территории Магаданской области – Наталкинское, Верхний Хакчан, Олбот, Дегдекан, Токичан, Павлик, Игуменско-Родионовское, Осадочное, Чумыш.

Развитие перерабатывающих производств должно обеспечить рост их доли в ВРП, что повысит уровень конкурентоспособности Республики Саха (Якутия), будет способствовать развитию кадрового, научного и инновационного потенциала региона, снизит зависимость экономики от волатильности цен на первичные природные ресурсы. В связи с этим освоение месторождений природных ресурсов должно рассматриваться в формате комплексного развития с локализацией на территории

Республики Саха (Якутия) производств по обогащению, переработке и выпуску готовой продукции и полуфабрикатов.

Обеспечение транспортной доступности и доступности подключения к энергетическим источникам является основным необходимым условием локализации новых производств и реализации инвестиционных проектов на территории Республики Саха (Якутия).

Немаловажную роль в реализации проектов играют тарифы на энергоресурсы. При объединении энергосистем Восточной Сибири и Дальнего Востока будут вовлечены электрические мощности кластера гидроэлектростанций: Братская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС, каскад Вилюйских ГЭС, Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс, Колымская ГЭС, Усть-Среднеканская ГЭС, Зейская и Бурейская ГЭС. Их электроэнергия значительно дешевле энергии тепловых и дизельных станций, и поэтому для реализации надежного и бесперебойного энергоснабжения и объектов промышленности бытовых потребителей арктической зоны Республики Саха (Якутия) целесообразно расширить зону влияния централизованного электроснабжения.

Предлагается вариант альтернативного электроснабжения арктической зоны Республики Саха (Якутия) от магистральной межсистемной сети, объединяющей Восточную Сибирь и Дальний Восток, путем строительства линии электропередачи «Хандыга – Усть-Куйга» протяженностью 825 км, суммарной мощностью 140 МВт, напряжением 220 кВ и пропускной способностью 203 МВт (рис. 2) [2], Трасса линии планируется вдоль автозимника «Яна», которая будет действовать круглогодично.

Во всём мире для передачи, распределения и отбора мощности используются трёхфазные системы переменного тока. Традиционные линии электропередачи конструктивно простые, но их пропускная способность низкая. Новые разработки позволяют увеличить передачу активной мощности трёхфазной воздушной линии, в

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

сравнении с традиционной, более чем в два раза. Использование электропередач постоянного тока для передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния следует признать нецелесообразным ввиду

высокой стоимости преобразовательных подстанций, которые в 2,5-3 раза дороже подстанций переменного тока, и отсутствия надёжных выключателей.

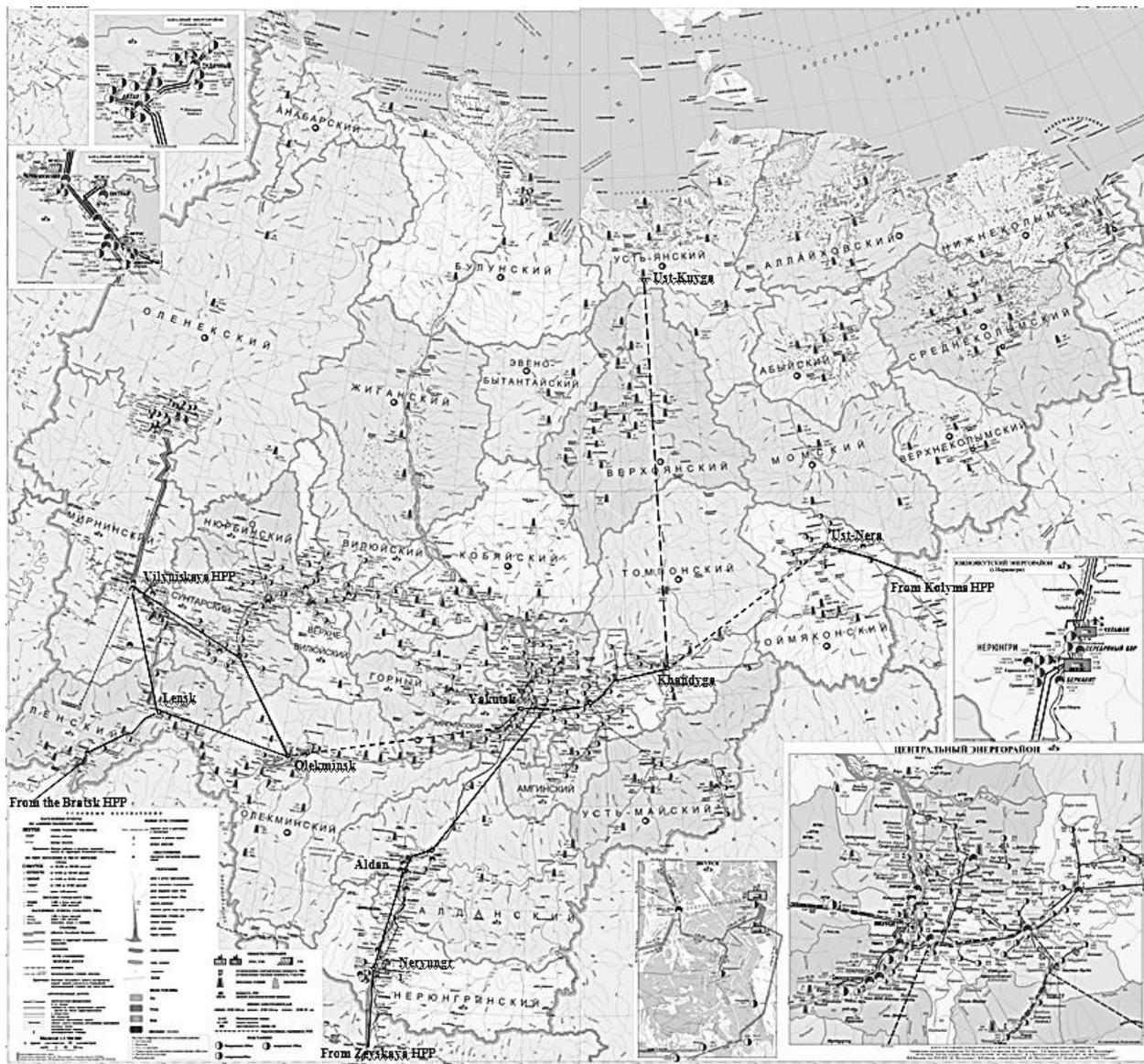


Рис. 2. Магистральная линия электропередачи северного направления для электроснабжения арктических районов

Транспорт электроэнергии переменного тока на сверхдальние расстояния возможен одним из двух принципиально отличающихся способов. Первый способ предусматривает компенсированные электропередачи с отборами мощности [3–6]. Во втором варианте используются полуволновые и настроенные на полуволну транзит-

ные (без отбора мощности) электропередачи [7–9]. Целесообразность настройки на полуволну возникает при длине линии 1500 км и более. Линию, длина которой меньше 1500 км, целесообразно привести к линии «нулевой длины» [10]. Поскольку протяженность рассматриваемой линии меньше граничной длины 1500 км, ее реак-

тивное сопротивление следует скомпенсировать и привести к линии «нулевой» длины для повышения пропускной способности и стабилизации режима напряжения вдоль линии с помощью тиристорного стабилизатора параметров (ТСП) [11], разработанного в Институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

Слабой стороной одноцепных компенсированных электропередач на дальние расстояния является их недостаточная надежность, поскольку нет совершенных способов ликвидации однофазных отказов на линии и способов длительной работы электропередачи на двух фазах с передачей 50...60 % номинальной мощности, как

это имеет место в передаче постоянным током, работающей в униполярном режиме. Поэтому для решения проблемы надежности предлагается вариант линии с расщепленной на три составляющие провода резервной фазой, которая значительно экономичнее двухцепных ВЛ [12, 13].

Предложена магистральная линия в северном направлении, обеспечивающая централизованным электроснабжением новые промышленные центры северных и арктических территорий Республики Саха (Якутия) и разработаны новые методы построения протяженной электропередачи в заниженном классе напряжения на основе силовоточной электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Габдерахманова Т.С.** Некоторые аспекты развития возобновляемой энергетики в арктической зоне РФ / Т.С. Габдерахманова // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 19-20. С. 41-53.

2. Альтернативные источники электроэнергии для снабжения предприятий промышленных центров Арктической зоны Якутии / Г.И. Давыдов, А.В. Кобылин, Р.П. Ли-Фир-Су, В.А. Седалищев, А.С. Нестеров // Электротехника. 2017. № 9. С. 84-88.

3. China's construction in four decades (1949-1989). Electric Power Industry in China. Information Institute of Water Resources and Electric Power: MOE; MWR, 1990. Vol. 10.

4. **Felix F. Wu.** China's Future in Electric Energy / Felix F. Wu, Shutu Fu // IEEE Power and Energy. 2005. Vol. 3. No. 4.

5. **Щербаков В.К.** Технические и экономические характеристики настроенных электропередач / В.К. Щербаков. Новосибирск: Наука, 1965. 68 с.

6. **Щербаков В.К.** Возможности передач настроенных на полуволну / В.К. Щербаков // Вопросы дальних электропередач. 1960. С. 3-20.

7. **Зильберман С.М.** Оценка эффективности применения полуволновой пере-

дачи электроэнергии в Южной Африке / С.М. Зильберман, Г.И. Самородов // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2009. № 5. С. 115-124.

8. **Самородов Г.И.** Прогрессивные технологии передачи электроэнергии на переменном токе на дальние и сверхдальние расстояния / Г.И. Самородов, Т.Г. Красильникова // Энергетическая политика. 2013. № 5. С. 31-38.

9. **Зильберман С.М.** Сверхдальние электропередачи полуволнового типа / С.М. Зильберман, Г.И. Самородов // Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водного трансп., 2010. 327 с.

10. Транспорт электроэнергии переменного тока на сверхдальние расстояния / Г.И. Давыдов, А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин // Интерактивная наука. 2018. № 3 (25). С. 10-15.

11. А.с. СССР № 1473004. Устройство для автоматического регулирования напряжения линии электропередачи / Кобылин В.П., Обрусник В.П., Дордин Ю.Р., Кобзев А.В., Дульзон Н.А. и др. Заявка № 4227658/24-07 от 13.04.1987. Оpubл. Бюл. № 14 от 15.12.1988.

12. Пат. № 2578040 Российская Федерация. Устройство резервирования линии электропередачи / Нестеров А.С., Лебедев

М.П., Кобылин В.П., Васильев П.Ф. 2016. Бюл. № 8.

13. Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой / Нестеров А.С., Лебедев М.П., Кобылин В.П., Васильев П.Ф.,

Давыдов Г.И., Хаютанов А.М. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 45-48.

Давыдов Геннадий Иванович – младший научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Хоютанов Александр Михайлович – ведущий инженер Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Васильев Павел Филиппович – кандидат технических наук, заведующий отделом электроэнергетики Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Кобылин Виталий Петрович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Gennadiy I. Davidov – Junior Research Fellow, Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of RAS

Alexander M. Khoyutanov – Lead Engineer, Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of RAS

Pavel F. Vasil'ev – PhD, Manager: Department of Electric Power Engineering, Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of RAS

Vitaly P. Kobilin – Dr.Sc., Senior Research Fellow, Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of RAS

Статья поступила в редакцию 11.11.18, принята к опубликованию 28.11.18

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

1. Полные имена и отчества всех авторов.
2. Место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

**ОБЗОР И АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ
К ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫМ НАГРУЗКАМ**

Н.Ю. Шевченко, Г.Г. Угаров, С.Н. Кириллова, Ю.В. Лебедева

**A REVIEW AND DESIGN FEATURES ANALYSIS OF OVERHEAD
TRANSMISSION LINES WITH INCREASED STRENGTH AGAINST ICE
AND WIND LOADING**

N.Yu. Shevchenko, G.G. Ugarov, S.N. Kirillova, Yu.V. Lebedeva

Обобщена информация о проводах нового поколения, повышающих надежность работы воздушных линий электропередачи. Составлена классификация проводов по конструктивным признакам и классификация компактных проводов отечественного производства. Рассмотрены конструктивные особенности инновационных типов проводов. Отмечены их преимущества при эксплуатации воздушной линии электропередачи. Проведен анализ проводов по механической прочности и пропускной способности.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, компактные и высокотемпературные провода, гололедно-изморозевые отложения

Надежность электроснабжения потребителей зависит от устойчивой работы воздушных линий электропередачи. На сегодняшний день ПАО «Россети» управляет 2,34 млн километров линий электропередачи. По результатам статистического анализа причин повреждения воздушных линий электропередачи основная доля отключений ВЛ происходит из-за гололедно-ветровых воздействий. Многие районы страны (Камчатка, Урал, Кавказ, Центр, Северо-Запад, Поволжье и т.д.) подверже-

The article summarizes the data relating the new generation of wires characterized for increased strength when used in overhead power transmission lines. We provide a classification of transmission lines by their design characteristics and a classification of compact wiring of domestic production. The design features of innovative types of wires are considered. The focus is made on their advantages when used in operation of aerial power lines. The analysis of transmission lines in terms of mechanical strength and transfer capacity is carried out.

Keywords: overhead transmission lines, compact and high-temperature wires, ice and frost depositions

ны сильному гололедообразованию на проводах и опорах ВЛ, что приводит к авариям в электроэнергетических системах. Особенно тяжелые последствия вызывают «ледяные дожди».

Например, в 2008 году экономический ущерб от гололедных явлений на о. Сахалин составил более 200 млн рублей. В декабре 2010 года большой ущерб был нанесен энергосистемам Центральной России и Поволжья. Только в Московской области из-за «ледяного дождя» было обесточено

86 воздушных линий электропередачи и 27 трансформаторных подстанций, 455 населенных пунктов с населением около 200 тыс. человек остались на неделю без электроснабжения. По той же причине в 2014 году в Татарстане было обесточено 72 населенных пункта. Гололедные отложения местами достигали 70-80 мм [1].

Среднее время ликвидации таких аварий превышает в десятки раз среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами. Поэтому борьба и предотвращение гололедообразования на ВЛ является актуальной проблемой электроэнергетики.

Основным методом борьбы с гололедообразованием в России является плавка гололеда. Например, ФСК ЕЭС в 2018 году провела 67 плавок гололеда на проводах и грозотросах линий электропередачи 330-500 кВ на юге страны. Это на 24 % больше по сравнению с прошлым осенне-зимним периодом 2016-2017 гг. [2]. Чаще всего лед плавился на линиях Северо-Кавказского федерального округа, трассы которых проходят через горные перевалы на высоте около 1000 метров над уровнем моря. Всего в южном регионе плавки гололеда проводились на 104 воздушных линиях электропередачи напряжением 220-500 кВ.

Плавка гололедных отложений ведет к недоотпуску электроэнергии потребителям, снижает рабочий ресурс проводов, увеличивает статью расхода электроэнергии на собственные нужды электросетевых компаний. Согласно [3], для ВЛ сечением 95-300 мм² расчетный расход электроэнергии на плавку гололеда составляет 24-74 кВт·ч/км.

Как показывает мировая практика, снизить риск аварий ВЛ из-за воздействия экстремальных погодных условий возможно путем замены традиционных проводов (АС, АCSR) на провода нового поколения (ПНП). К числу отечественных производителей, освоивших выпуск проводов нового поколения, относятся:

– совместное российско-бельгийское предприятие завод «Сим-Росс – Ламифил» (г. Углич, Ярославской области) [4];

– завод ООО «ЭМ-КАБЕЛЬ», входящий в группу компаний «Оптикэнерго» (г. Саранск, Республика Мордовия) [5];

– завод ОАО «Кирскабель», (г. Кирс, Кировской области), входящий в холдинг ООО «ГД «Ункомтех» [6];

– опытно-конструкторское предприятие ООО «ОКП «ЭЛКА-Кабель» (г. Пермь, Пермский край), входящее в ООО «НПК «Энергия» в партнерстве с ОАО «Камский кабель» [7];

– завод ОАО «Северсталь-Метиз» (г. Череповец Вологодской области), выпускающий пластически обжатые конструкции проводов, разработанные ООО «Энергосервис» [8].

Безопасность работы ВЛ характеризуется механической прочностью и допустимым габаритом линии h_2 [9].

По условию сохранения механической прочности провода длительно допустимый ток $I_{дл.доп.}$ нагревает провод при заданных климатических условиях до максимально допустимой температуры $\vartheta_{м.д.}$ [10]. Максимально допустимая температура провода по условию сохранения прочности по ГОСТ 839-80 для проводов типа АС составляет $\vartheta_{м.д.} = 90^{\circ}\text{C}$.

Согласно ПУЭ-7 [11] для действующих воздушных линий электропередачи наименьшие расстояния от проводов до поверхности земли в ненаселенной и населенной местности определяются при наибольшей стреле провеса проводов f_{\max} , при высшей температуре воздуха ($+40^{\circ}\text{C}$) без учета нагрева провода электрическим током.

Габарит линии определяется из уравнения

$$h_2 = h_n - f_{\max}, \quad (1)$$

где h_n – высота подвеса провода; f_{\max} – максимально допустимая стрела провеса провода ВЛ;

$$f_{\max} = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8\sigma_{+40}} = \frac{G_n l^2}{8T_{\min}}; \quad (2)$$

где G_n (γ_1) – нагрузка от веса провода, Н/м; l – длина пролёта, м; $T_{\min}(\sigma_{+40})$ – тяжение (напряжение) в низшей точке про-

висания провода ВЛ при высшей температуре воздуха, Н.

Допустимый ток $I_{дон}$ по условию со-

хранения нормированных габаритов ВЛ определяется из уравнения теплового баланса по выражению

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{0,6C_0[(273 + \vartheta_{np.дон.})^4 - (273 + \vartheta_{возд.})^4]s + 1.1k_\varphi \sqrt{vd_{np}} \cdot (\vartheta_{np.дон.} - \vartheta_{возд.})}{R_0(1 + \beta\vartheta_{np.дон.})}}, \quad (3)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(см²·К⁴); s – площадь поверхности излучения 1 м провода, см²; k_φ – коэффициент, учитывающий направление ветра; $\vartheta_{np.дон.}$ – допустимая температура провода без гололеда; $\vartheta_{возд.}$ – температура воздуха; v – скорость ветра, м/с; d_{np} – диаметр провода, см; R_0 – сопротивление 1 м провода при $\vartheta_{возд.} = 0^0C$, Ом/м; β – температурный коэффициент сопротивления алюминиевых проволок.

Значение допустимого тока $I_{дон}$ зависит от сечения провода; температуры провода; скорости ветра; модуля упругости провода; удельного сопротивления провода; упругой деформации; температурного коэффициента линейного расширения.

Поэтому современные провода должны обладать максимально высокой электропроводностью и механической прочностью, небольшой погонной массой, устойчивостью к высоким температурам, малым пластическим удлинением, способностью к самодемпфированию, стойкостью к гололедным, и ветровым воздействиям.

При производстве современных типов проводов используют новые конструкции на основе профилированных проволок, инновационных материалов токопроводящей части (ТПЧ) и сердечника.

Для увеличения надежности работы ВЛ в районах с повышенным риском образования гололедно-изморозевых отложений на проводах можно увеличить или механическую прочность, или рабочую температуру, либо уменьшить стрелу провеса.

Поэтому целесообразно применять или компактные провода, или высокотемпературные провода (ВТП) с малой стрелой провеса (HTLS).

Для получения наиболее высоких прочностных характеристик проводов используют комбинацию свойств различных материалов путем скручивания проволок в один провод. Такие провода получили название компактных [12].

Традиционной формой неизолированного провода считается круглая форма. Компактность провода достигается за счет изменения формы проволок токопроводящей части с круглой на трапециевидную, Z-образную или стреловидную (рис. 1).

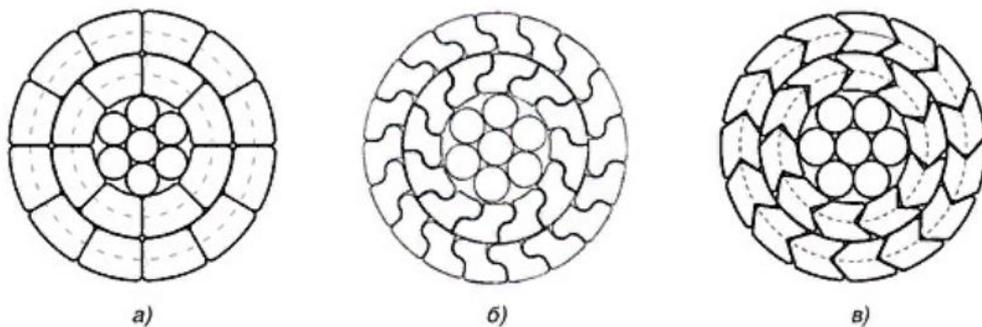


Рис. 1. Нестандартные формы проволок токопроводящей части провода: а – трапециевидная; б – Z-образная; в – стреловидная

При этом увеличивается коэффициент заполнения поперечного сечения с 0,61 – 0,67 (для АС) до 0,88 [13].

При одинаковом с проводом марки АС сечении компактный провод будет иметь меньший внешний диаметр и практически идеально гладкую поверхность, что способствует уменьшению аэродинамической и гололедной нагрузки, а также снижению гололедообразования. Для проволок сердечника в таких проводах используются высокопрочная оцинкованная сталь, алюминиевый сплав или композит.

По данным авторов [14], интенсивность образования гололедных отложений на компактных проводах ниже на 12 %.

Рассмотрим конструктивные особенности компактных проводов отечественного производства.

Компактные провода по нагревостойкости можно разделить на три группы:

- группа 1: компактированные провода с $\vartheta_{м.д.} = 90^0 C$.
- группа 2: компактированные провода с $\vartheta_{м.д.} = 150 – 210^0 C$.
- группа 3: компактированные провода с $\vartheta_{м.д.} = 210^0 C$ и малой стрелой провеса.

Классификация компактных проводов первой группы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация компактных проводов первой группы

Примеры компактных проводов первой группы отечественного производства даны в табл. 1.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики проводов первой группы при равном эффективном сечении с проводом АС.

Данная группа проводов по сравнению с традиционным проводом АС имеет мень-

ший диаметр провода при равном эффективном сечении, гладкую поверхность, большую крутильную жесткость и разрывную прочность провода (табл. 2).

Меньший диаметр и большая крутильная жесткость провода способствуют уменьшению аэродинамической и гололедной нагрузки, а также снижению самой вероятности образования наледи на проводе.

Таблица 1

Конструктивные особенности компактных проводов с $\vartheta_{м.д.} = 90^0 C$

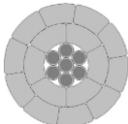
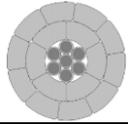
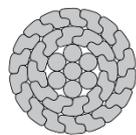
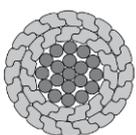
Марка провода	Производитель	Форма ТПЧ	Материал ТПЧ	Материал сердечника
АСку 	Кирскабель	Трапецидальная	Алюминий электротехнический (АТ)	Высокопрочная сталь с цинкоалюминиевым покрытием
АСк2у 	Кирскабель	Трапецидальная	Алюминий электротехнический (АТ)	Высокопрочная сталь с цинкоалюминиевым покрытием
АААС-Z 	Сим-Росс-Ламифил	Z-образная	Термообработанный алюминиевый сплав АВ-Е (Al-Mg-Si)	Алюминиевый сплав АВ-Е(Al-Mg-Si)
ААСRS Z 	Сим-Росс-Ламифил	Z-образная	Термообработанный алюминиевый сплав АВ-Е (Al-Mg-Si)	Высокопрочная оцинкованная сталь. Межпроводочное пространство заполнено смазкой повышенной нагревостойкости

Таблица 2

Характеристика проводов первой группы

Марка провода	Расчетное сечение, мм ²	d _{пр.} , мм	m, кг/км	r ₀ , Ом/км	Предел прочности на разрыв, кН	α, 10 ⁻⁶ град ⁻¹	E, 10 ⁴ Н/мм ²	I _{дон} , А	f _{max} при $\vartheta_{возд} = 40^0 C$
АС240/39	274,6	21,6	952	0,1222	80,895	19,2	8,25	610	7,7
АСку 240/39	274,6	19,6	954	0,121	97,303	18,9	8,25	1002	6,9
АСк2у 240/39	276,7	19,6	954	0,1204	97,303	19,2	8,25	967	6,89
АААС-Z 301	246	21	856	0,1086	99,54	23	5,6	793	7,67
ААСRS Z 251	251	19,1	875	0,1538	124,3	19	7,49	651	7,38

За счет использования в сердечнике высокопрочных стальных проволок повышается разрывная прочность провода и уменьшается стрела провеса провода в полете.

Провода первой группы имеют прочность в 1,2-1,6 раза выше, чем у стандартных сталеалюминевых проводов (рис. 3). Их можно рекомендовать для линий, которые подвергаются большому механическому гололедно-ветровым нагрузкам.

Вторая группа компактных проводов включает высокотемпературные провода, у которых проволоки токопроводящей части изготовлены из алюминидоциркониевых сплавов (Al-Zr типа ТАЛ, ZТАЛ, ХТАЛ и КТАЛ). Применение данных сплавов обеспечивает сохранение механических и электрических характеристик токопроводящей части при нагреве до 150-230 °С.

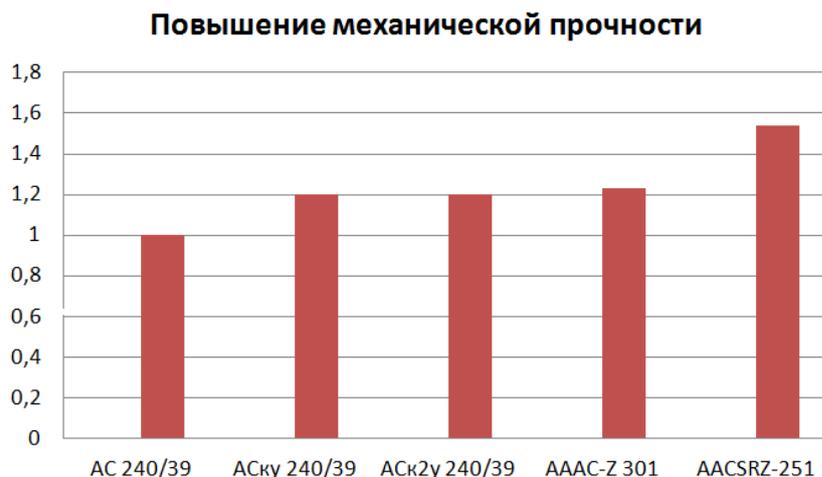


Рис. 3. Сравнение проводов первой группы по пределу прочности на разрыв

Рассмотрим конструктивные особенности второй группы компактных высоко-

температурных проводов с $\vartheta_{м.д.} = 150 - 210^{\circ}C$ (рис. 4 и табл. 3).

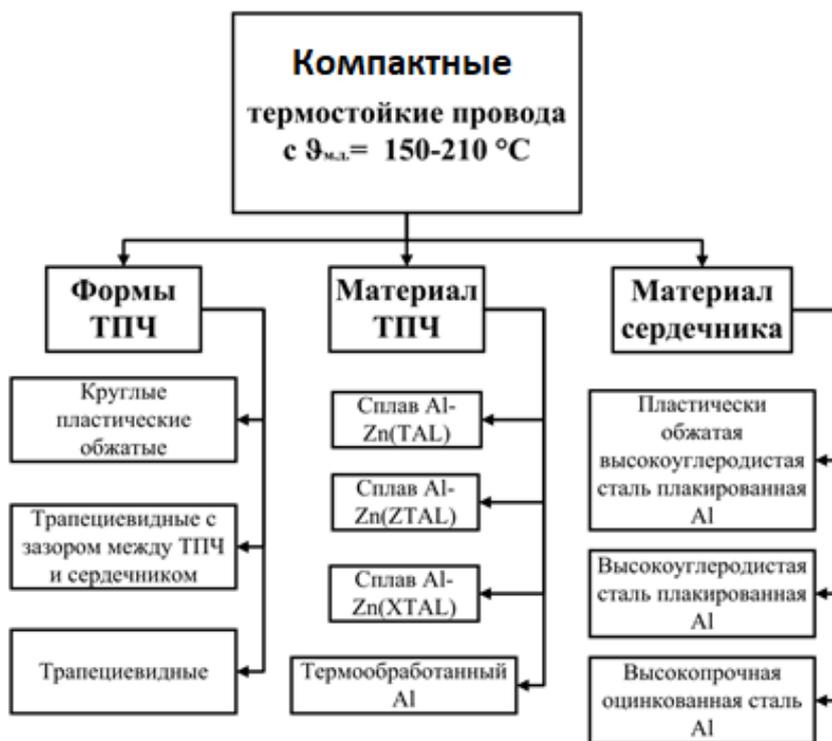
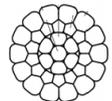
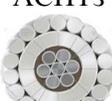


Рис. 4. Классификация компактных проводов второй группы

Использование компактных высоко-температурных проводов при реконструкции существующих ВЛ с целью повышения их нагрузочной способности позволяет уменьшить стрелы провеса при сохранении длин промежуточных пролетов и высоты промежуточных

опор, уменьшить необходимое время на плавку гололеда и затраты, связанные с этим процессом. При работе в области высоких температур провода способны противостоять обледенению без применения средств борьбы с гололедом.

Конструктивные особенности компактных высокотемпературных проводов с $\vartheta_{м.д.} = 150 - 210^{\circ}C$

Марка провода	Производитель	Форма ТПЧ	Материал ТПЧ	Материал сердечника
АСПТ 	«Северсталь-Метиз»	круглые пластически обжатые проволоки	сплав Al-Zr $\vartheta_{м.д.} = 180^{\circ}C$	высокоуглеродистая сталь, плакированная Al
АСВТ 	«Северсталь-Метиз»	круглые пластически обжатые проволоки	сплав Al-Zr $\vartheta_{м.д.} = 180^{\circ}C$	пластически обжатая сталь
АСПТ _к 	Эм-Кабель	трапециевидальная	сплав Al-Zr $\vartheta_{м.д.} = 180^{\circ}C$	высокоуглеродистая сталь, плакированная Al
АСПТ _з 	Эм-Кабель	трапециевидальная; зазор между ТПЧ и сердечником	сплав Al-Zr $\vartheta_{м.д.} = 180^{\circ}C$	высокоуглеродистая сталь, плакированная Al
GZTACSR 	Сим-Росс-Ламифил	трапециевидальная; зазор между ТПЧ и сердечником	сплав Al-Zr $\vartheta_{м.д.} = 210^{\circ}C$	высокопрочная оцинкованная сталь

При одинаковом сечении фазных проводов второй группы по сравнению с проводом АС:

- повышается пропускная способность ВЛ в 1,5-2 раза (рис. 5).
- уменьшаются стрелы провеса (табл. 4).

– повышается механическая прочность в 1,6 – 1,9 раз (рис. 6).

– меньший диаметр провода при равном эффективном сечении способствует снижению массы гололедной муфты до 7 %, что облегчает процесс плавки гололеда (рис. 7).

Повышение пропускной способности проводов второй группы

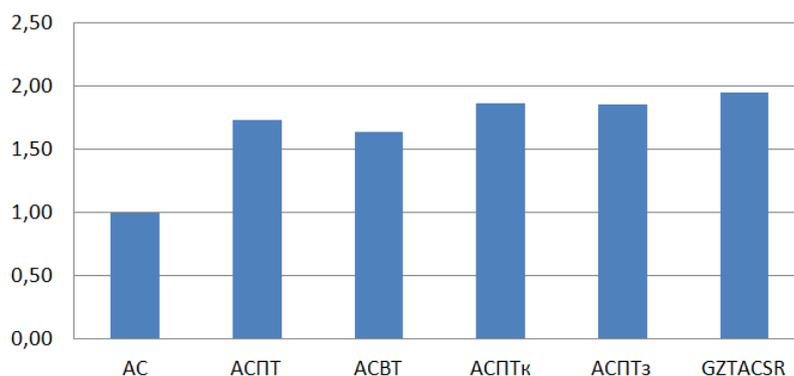


Рис. 5. Повышение пропускной способности проводов второй группы

Стрелы провеса при $\vartheta_{возд} = 40^{\circ}C$, $l = 200$ м; $h_n = 17$ м

Марка провода	АС 240/39	АСПТ 240/39	АСВТ 21/61	АСПТк 240/39	АСПТз 258/37	GZTACSR 240
f_{max} , М	7,7	7,0	7,0	6,3	6,7	6,8



Рис. 6. Увеличение прочности на разрыв проводов второй группы



Рис. 7. Снижение массы гололедной муфты

К третьей группе компактных проводов можно отнести высокотемпературные провода с малой стрелой провеса с $\vartheta_{м.д} = 210^{\circ}C$. Создание данных проводов требует применения материалов, характеризующихся пониженными значениями температурного коэффициента линейного расширения (k_T) [15]. Значения k_T для различных материалов, используемых при

изготовлении проводов ВЛ, приведены в табл. 5.

Классификация компактных проводов отечественного производства третьей группы по конструктивным признакам представлена на рис. 8.

Примеры компактных проводов третьей группы отечественного производства даны в табл. 6, 7.

Таблица 5

Температурный коэффициент линейного расширения

Материал	$k_T, 10^{-6}/^{\circ}C$
Алюминий, сплав АВ-Е	23,0
Высокопрочная сталь марки EST	11,5
Металлокомпозит (Al + Al ₂ O ₃)	6,0
Железоникелевый сплав (Invar)	3,7
Полимеркомпозит	1,6



Рис. 8. Классификация компактных проводов третьей группы

Таблица 6

Конструктивные особенности компактных высокотемпературных проводов с малой стрелой провеса с $\theta_{м.д.} = 210^{\circ}C$

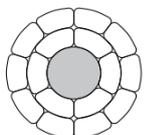
Марка провода	Производитель	Форма ТПЧ	Материал ТПЧ	Материал сердечника
АССС[®] 	Сим-Росс-Ламифил	трапецеидальная	термообработанный алюминий	композитный на основе углеволокна

Таблица 7

Сравнительная характеристика АССС[®] с проводом АС

Марка провода	Расчетное сечение, мм ²	$d_{пр.}$, мм	m , кг/км	r_0 , Ом/км	Предел прочности на разрыв, кН	α , 10^{-6} град ⁻¹	$I_{доп}$, А	f_{max} при $\theta_{возд} = +40^{\circ}C$, $l = 200$ м; $h_n = 17$ м
АССС [®] 235	265	18,29	702	0,1238	98,5	1,61	1039	6,83
АС240/39	274,6	21,6	952	0,1222	80,895	19,2	610	7,7

Прочность композитного сердечника на 25 % выше, чем у стального, а вес на 60 % меньше, что существенно снижает вес провода в целом и облегчает установку провода на имеющиеся опоры, при этом сокращается время модернизации. Он характеризуется также минимальным значением температурного коэффициента линейного расширения $k_T = 1,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Пропускная способность провода увеличивается в 2-3 раза. Новый проводник хорошо показал себя в экстремальных условиях, таких как чрезвычайно низкие или высокие температуры, повышенная влажность, воздействие соленой воды, сильные ветра, вибрация, ультрафиолетовые излучения.

Термостойкие провода с малой стрелой провеса позволяют существенно повысить термический предел работы провода при том же весе и погодных условиях, снизить нагрузку на опоры при обледенении; повысить передаваемую мощность при меньших затратах на производство энергии.

Итак, отечественная промышленность располагает достаточным производственным потенциалом для выпуска инновационных конструкций проводов для воздушных линий высокого напряжения.

Инновационные технологии, применяемые при производстве новых конструкций проводов, в значительной степени снижают нагрузки на опоры и фундаменты, позволяют увеличить длины пролетов, уменьшить коэффициент аэродинамического сопротивления, снизить вероятность пляски и обрыва проводов при воздействии внешних механических нагрузок.

Инновационные конструкции проводов необходимо рассматривать в качестве конкурирующих вариантов при сооружении новых линий в районах с интенсивным гололедообразованием и повышенной ветровой нагрузкой, при прохождении трассы ВЛ по селитебной территории, для больших переходов через водные преграды, горные ущелья и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шевченко Н.Ю.** Повышение эффективности реконструируемых воздушных линий электропередач, подверженных экстремальным метеовоздействиям: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.Ю. Шевченко. Саратов, 2011. 18 с.
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». М., 2017. 156 с.
3. **Железко Ю.С.** Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. М.: Изд-во НЦ «ЭНАС», 2005.
4. **Ермаков А.** Передача энергии по высокотехнологичным проводам / А. Ермаков // Электроэнергия. Передача и распределение, 2012. № 5. С. 54-55.
5. **Зотов Д.** ООО «ЭМ-КАБЕЛЬ» – курсом инноваций / Д. Зотов, Э. Боксимер (мл). // Кабель-news. 2013. № 5. С. 32-34.
6. **Кувшинов А.** Инновационные конструкции проводов для высоковольтных линий электропередачи / А. Кувшинов // Кабель-news. 2012. № 2. С. 30-32.
7. ELKA LINE AC. Неизолированные провода повышенной надежности. Номенклатурный каталог. Материалы выставки «Электрические сети России», декабрь 2014 г.
8. **Колосов С.В.** Новое поколение проводов ВЛ: пластически деформированные провода / С.В. Колосов, В.А. Фокин // Электроэнергия. Передача и распределение, 2014. №1. С. 90 - 47.
9. Повышение эффективности воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ в гололедных районах: монография / Г. Г. Угаров, Н. Ю. Шевченко, Ю. В. Лебедева, А. Г. Сошинов. М.: Перо, 2013. 186 с.
10. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электро-

передачи в гололедных районах / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.Н. Сацук. М.: Изд. Дом МЭИ, 2007. 448 с.

11. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: НЦ ЭНАС, 2011.

12. **Зуев Э.Н.** О классификации инновационных конструкций проводов воздушных ЛЭП / Э.Н. Зуев // Кабель-news. 2013. № 3. С. 18-23.

13. **Зарудский Г.К.** Инновационные провода для воздушных линий электропередачи. Часть 3 / Г.К. Зарудский,

И.А. Платонова, Г.В. Шведов, А.Ю. Крохин // Кабель-news. 2011. № 2. С. 52-54.

14. **Колосов С.В.** Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С.В. Колосов, С.В. Рыжов, В.Е. Сюзин // Опыт, устремленный в будущее: сб. науч. статей ЗАО «Электросетьстройпроект», 2013. С. 26-36.

15. **Френкель В.** Высокотемпературные провода с малой стрелой провеса / В. Френкель // Энергоэксперт. 2010. № 4. С. 66-68.

Шевченко Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент Камышинского технологического института Волгоградского технического университета

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор Камышинского технологического института Волгоградского технического университета

Кириллова Светлана Николаевна – преподаватель Камышинского технологического института Волгоградского технического университета

Лебедева Юлия Витальевна – кандидат технических наук, доцент Камышинского технологического института Волгоградского технического университета

Natalia Yu. Shevchenko – PhD, Associate Professor, Kamishin Technological Institute of Volgograd State Technical University

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Kamishin Technological Institute of Volgograd State Technical University

Svetlana N. Kirillova – Lecturer, Kamishin Technological Institute of Volgograd State Technical University

Yulia V. Lebedeva – PhD, Associate Professor, Kamishin Technological Institute of Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 05.11.18, принята к опубликованию 28.11.18

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГРУППЫ ПАКЕТИРОВАННЫХ МАГНЕТРОНОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.И. Артюхов, А.И. Земцов, С.А. Куркин, А.И. Борисенко

A POWER SUPPLY SYSTEM OF PACKAGED INDUSTRIAL MAGNETRONS GROUP

I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, S.A. Kurkin, A.I. Borisenko

Промышленные электротехнологические установки, использующие энергию СВЧ колебаний, могут иметь в своем составе несколько магнетронных генераторов. В системах с распределенным подводом СВЧ энергии достаточно часто применяют пакетированные магнетроны. Создание системы электропитания группы таких магнетронов является нетривиальной задачей ввиду особенностей характеристик пакетированных магнетронов, технологического разброса их параметров и необходимости подстройки под общий режим работы. В качестве альтернативы индивидуальным источникам питания обосновывается возможность построения системы централизованного электропитания с применением вольтодобавочных элементов.

Ключевые слова: *магнетрон, система электропитания, регулирование анодного тока*

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий [1]. Основные преимущества использования СВЧ нагрева в термических процессах обусловлены особенностями ее поглощения. СВЧ энергия преобразуется в теплоту внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов.

Прогресс в разработке генераторов СВЧ колебаний и хорошие поглощательные свойства многих материалов привели к созданию промышленных установок

Industrial electrotechnical devices using microwave energy may consist of several magnetron generators. Packaged magnetrons are often used in microwave energy distributed supply systems. Creating a power supply system for such magnetron group is an exceptional task due to the packaged magnetron features, technological variation of their parameters, and the need to adapt to the general operation mode. A possibility of building the centralized power system using booster elements is considered as an individual power source alternative.

Keywords: *magnetron, power supply system, anode current control*

конвейерного типа для различных технологических процессов мощностью в сотни киловатт. Большое число СВЧ установок используется, в частности, для термообработки сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, которые обычно содержат много воды и поэтому хорошо поглощают СВЧ энергию.

По информации, содержащейся на сайте китайской компании «Massalfa Microwave», гамма выпускаемой продукции включает более 40 наименований высокотехнологического оборудования с передо-

выми СВЧ технологиями и надежным качеством для многих отраслей промышленности, таких как продукты питания, медицина, химическая промышленность и металлургия в стране и за рубежом [2].

Представление о внешнем виде СВЧ установки конвейерного типа [3] дает рис. 1.

СВЧ колебания создают шесть генераторов мощностью 1,2 кВт, работающих на частоте 2450 МГц. Для обеспечения однородного поля магнетроны расположены в шахматном порядке. Электромагнитные волны посылаются через прямоугольные излучающие волноводы в верхней части туннеля.



Рис. 1. СВЧ установка конвейерного типа для сушки пищевых продуктов

Конвейерная СВЧ установка мощностью 3,2 кВт для термообработки плодов пальмы представлена в [4]. Генерация СВЧ колебаний на частоте 2450 МГц осуществляется четырьмя генераторами по 800 Вт.

СВЧ электротехнологическая установка представляет собой сложную систему, в процессе работы которой необходимо распределить СВЧ энергию, вырабатываемую одним или несколькими СВЧ генераторами согласно заданным требованиям. Выбор способа распределения зависит от целого ряда параметров, которые определяются технологическим процессом обработки исходного материала [5].

Для построения источников СВЧ энергии в настоящее время имеется широкая гамма электронных приборов. По ряду причин наиболее часто применяются магнетроны, которые различаются системами создания магнитного поля [6]. В каталогах фирм-изготовителей электронного оборудования заявлены как пакетированные

магнетроны (со встроенными магнитами), так и магнетроны с электромагнитами. Известны также магнетроны с комбинированной магнитной системой.

Промышленные электротехнологические установки, использующие энергию СВЧ колебаний, могут иметь в своем составе несколько магнетронных генераторов. В системах с распределенным подводом СВЧ энергии достаточно часто применяют пакетированные магнетроны. При этом в целях унификации конструкции производители электротехнологических установок комплектуют каждый СВЧ генератор своим источником питания [7]. С одной стороны, такое решение позволяет оперативно изменять режим работы каждого из СВЧ генераторов, с другой стороны, требует применения соответствующего количества высоковольтных блоков, что не способствует достижению оптимальных массогабаритных и стоимостных показателей. В этой связи представляется актуаль-

ной задача создания системы централизованного электропитания группы пакетированных магнетронов, обладающей возможностью оперативной подстройки режима работы каждого прибора по анодным цепям.

В существующих установках регулировка выходной мощности СВЧ генераторов на магнетронах пакетированного типа осуществляется за счет изменения длительности подачи напряжения на анодную цепь магнетрона. Данный способ регулировки имеет ряд существенных недостатков, один из которых – невозможность дозированной подачи СВЧ энергии на объект обработки. В работах [8, 9] и ряде других показана возможность регулирования выходной мощности пакетированного магнетрона за счет изменения анодного напряжения.

Функционирование пакетированного магнетрона осуществляется с помощью системы электропитания из двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи.

Режим работы магнетрона по анодной цепи определяется точкой пересечения вольт-амперной характеристики (ВАХ) магнетрона и внешней характеристики источника анодного питания [10]. Для анализа работы магнетронного генератора используется набор приближенных магнетронных вольт-амперных характеристик или кривых I-V, как показано на рис. 2. Кривая I-V магнетрона начинается с крутой области, показанной пунктирной линией. Область с небольшим наклоном от оси I, представляющая режим излучения магнетрона, следует за точкой изгиба. В области анодных напряжений, меньших порогового напряжения ($U_a < U_0$), условия синхронизации между носителями заряда и высокочастотным полем не выполняются, поэтому колебания и ток анода не индуцируются. Самовозбуждение магнетрона и внезапное увеличение анодного тока происходят, как только напряжение анода достигает порога. Впоследствии небольшое изменение анодного напряжения U_a приводит к резким изменениям анодного тока I_a , величина которого определяется пропускной способностью катодного излучения.

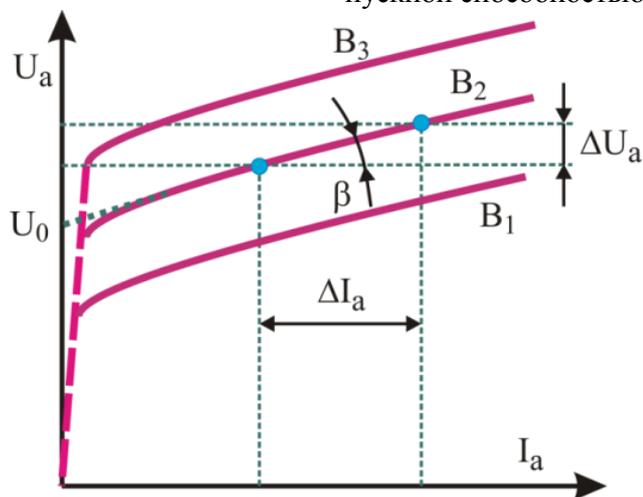


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики магнетрона для различных значений магнитной индукции ($B_1 < B_2 < B_3$)

Важным параметром магнетрона является его динамическое сопротивление, которое определяется по формуле

$$R_{\text{дин}} = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \quad (1)$$

При исследовании установившихся режимов в источниках питания СВЧ установок магнетрон представляется в виде модели, которая состоит из последовательно соединенного идеального диода с пороговым напряжением и резистора, значение которого соответствует динамическому

сопротивлению магнетрона. ВАХ магнетрона при такой кусочно-линейной аппроксимации имеет вид

$$U_a = R_{\text{дин}} \cdot I_a + U_0, \quad (2)$$

где $R_{\text{дин}}, U_0$ – соответственно динамическое сопротивление и пороговое напряжение магнетрона.

Если необходимо учитывать переходные процессы при включении источника питания, то магнетрон представляется в виде четырехполюсника с переменными параметрами [11].

Внешняя характеристика источника анодного питания может быть представлена следующим образом:

$$U_a = E - R_{\text{вн}} \cdot I_a, \quad (3)$$

где $E, R_{\text{вн}}$ – ЭДС и внутреннее сопротивление источника питания соответственно.

Из (2) и (3) получим выражение для определения анодного тока:

$$I_a = \frac{E - U_0}{R_{\text{вн}} + R_{\text{дин}}} \quad (4)$$

Таким образом, требуемое значение анодного тока можно получить за счет изменения ЭДС источника анодного питания или его внутреннего сопротивления. При этом первый способ управления гораздо проще поддается автоматизации, особенно в том случае, когда каждый магнетрон имеет отдельный источник питания анодной цепи.

Типовая схема регулируемого источника питания магнетрона промышленного назначения показана на рис. 3. Сетевое напряжение через фильтр электромагнитной совместимости ЭМС и трехфазный регулятор напряжения ТРН подается на первичную обмотку повышающего трансформатора ТА. К вторичной обмотке трансформатора ТА подключен высоковольтный выпрямитель ВВ, на выходе которого формируется постоянное напряжение U_d для питания анодной цепи магнетрона VL. Анод магнетрона соединен

с заземленным выводом «плюс» выпрямителя, катод подключен к выводу «минус» ВВ. Требуемый режим магнетрона VL устанавливается блоком управления БУ путем изменения напряжения на первичной обмотке трансформатора ТА. Накал катода осуществляется с помощью трансформатора ТН, первичная обмотка которого подключена к сети через регулятор напряжения РН для возможности регулирования тока накала.

Подробный анализ электромагнитных процессов в схеме рис. 3 выполнен в работе [12]. Остановимся, однако, на некоторых технических характеристиках описанного источника применительно к конкретному типу магнетрона.

На рис. 4 показан внешний вид упакованного магнетрона E3328 фирмы Toshiba, на рис. 5 и 6 приведены эксплуатационные характеристики этого магнетрона [13]. Из графиков на рис. 5 видно, что максимальная выходная мощность магнетрона E3328 составляет 3 кВт, при этом анодный ток достигает 950 мА. Пороговое напряжение U_0 можно оценить значением 4500 В, динамическое сопротивление $R_{\text{дин}} - 200$ Ом. График на рис. 6 регламентирует величину напряжения, подаваемого на накал в зависимости от анодного тока. Эту функцию в схеме на рис. 3 выполняет регулятор напряжения РН, в котором должен быть прописан соответствующий алгоритм. Напряжение накала в процессе предварительного нагрева составляет 4,6 В. Затем при выводе на максимальную мощность это напряжение должно снижаться до 2,2 В. Время предварительного нагрева составляет 10 секунд. Эксплуатация магнетрона E3328 требует двух систем охлаждения. Водяное охлаждение применяется для анода, принудительное воздушное – для блока, где размещается фильтр для защиты от радиопомех.

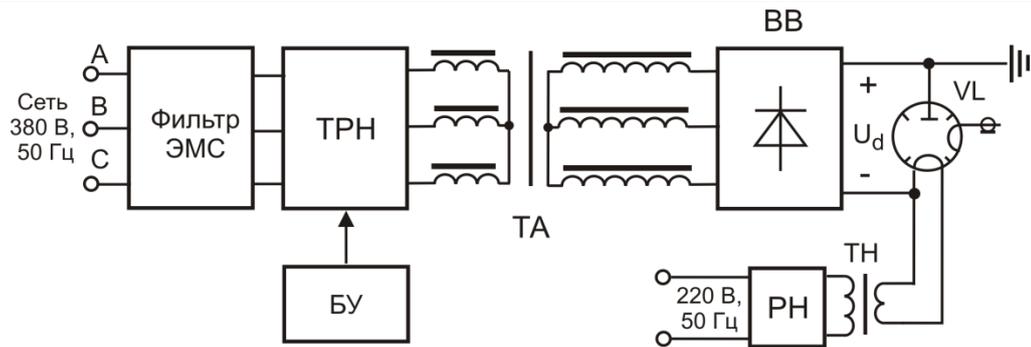


Рис. 3. Типовая схема регулируемого источника питания магнетрона

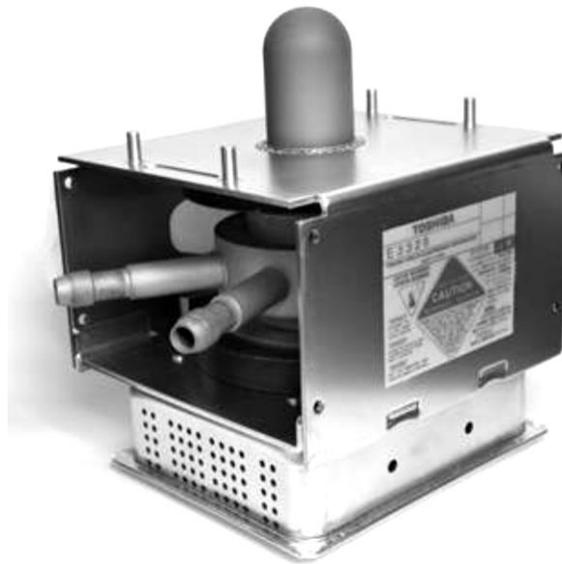


Рис. 4. Внешний вид магнетрона E3328

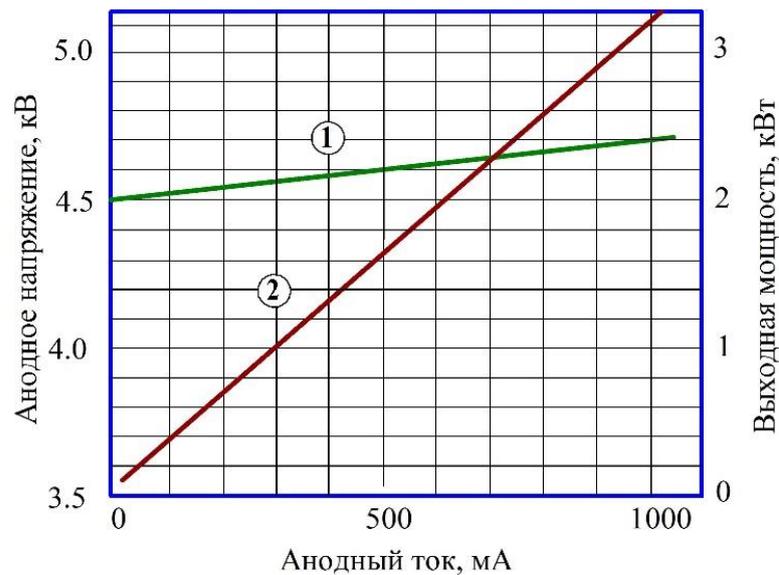


Рис. 5. Зависимость анодного напряжения (1) и выходной мощности (2) магнетрона E3328 от анодного тока

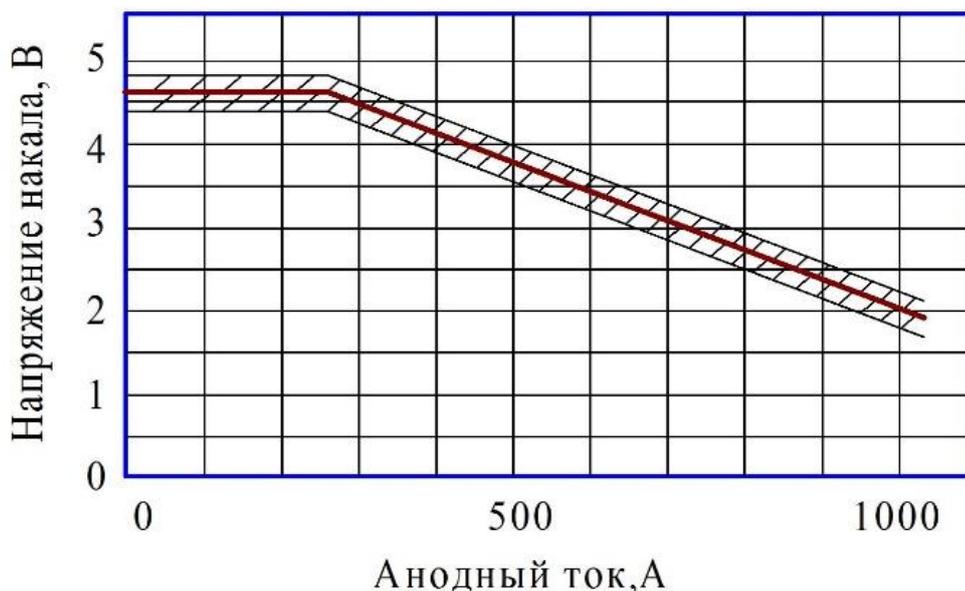


Рис. 6. График снижения напряжения накала при увеличении анодного тока

Основной вклад в массогабаритные показатели схемы рис. 3 вносит повышающий трансформатор. При необходимости запитать магнетрон мощностью 3 кВт его масса будет составлять десятки килограмм. В случае, когда надо обеспечить электропитание группы магнетронов промышленного назначения, применение индивидуальных источников увеличивает массу оборудования в соответствующее число раз.

В [14] был предложен подход к построению системы централизованного питания анодных цепей магнетронов с применением вольтодобавочных элементов. Такой подход позволяет существенно улучшить массогабаритные и стоимостные показатели оборудования по сравнению с индивидуальными источниками питания.

На рис. 7 показана схема, которой реализует идею централизованного питания группы магнетронов. В системе имеется базовый источник анодного напряжения, который включает в себя фильтр электромагнитной совместимости ЭМС, повышающий трансформатор ТА и высоковольтный выпрямитель ВВ, на выходе которого формируется постоянное напряжение U_d для централизованного питания анодных цепей магнетронов $VL_1 \dots VL_N$. Аноды магнетронов соединены с заземленным выводом «плюс» выпрямителя, катоды через

вольтодобавочные элементы $ВД_1 \dots ВД_N$ подключены к выводу «минус» ВВ. Требуемый режим магнетронов $VL_1 \dots VL_N$ устанавливается блоками управления $БУ_1 \dots БУ_N$ путем изменения напряжений на соответствующих вольтодобавочных элементах $ВД_1 \dots ВД_N$. Накал катодов осуществляется аналогично схеме рис. 3.

Напряжение на анодной цепи каждого из магнетронов VL_k формируется как сумма напряжений на выходе высоковольтного выпрямителя и вольтодобавки

$$U_a = U_d + \Delta U_k. \quad (5)$$

При этом для указанных напряжений справедливы формулы

$$U_d = E - R_{вн} \cdot \sum_{k=1}^N I_{a,k}, \quad (6)$$

$$\Delta U_k = \Delta E_k - R_{вд,k} \cdot I_{a,k}, \quad (7)$$

где ΔE_k , $R_{вд,k}$ – ЭДС и внутреннее сопротивление k -го вольтодобавочного элемента соответственно.

Для вывода основных соотношений, характеризующих централизованный источник анодного питания, воспользуемся расчетной схемой, которая показана рис. 8.

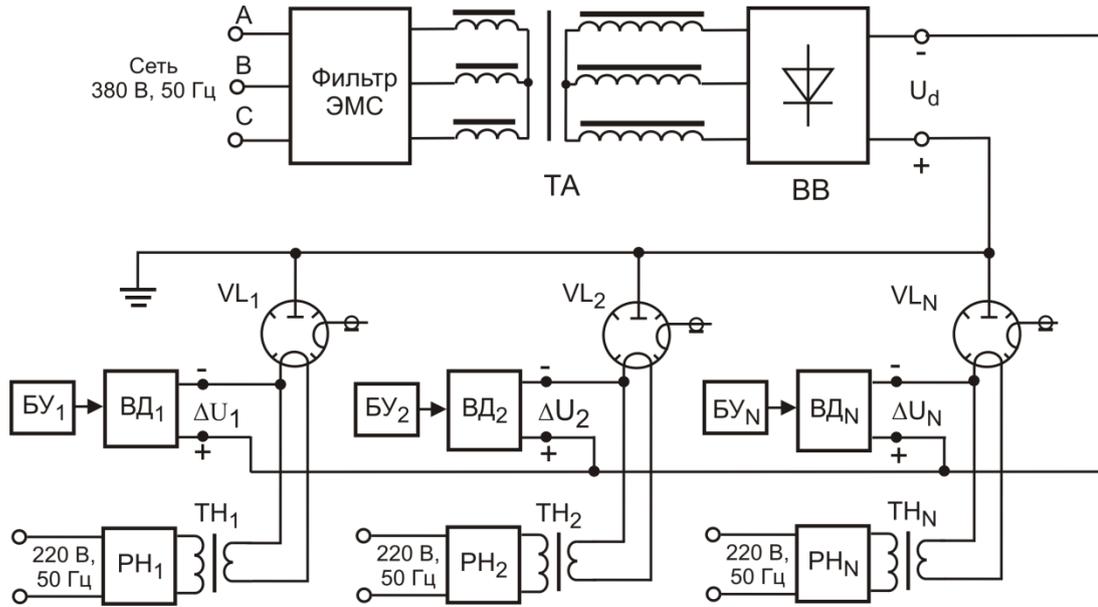


Рис. 7. Схема источника питания группы магнетронов

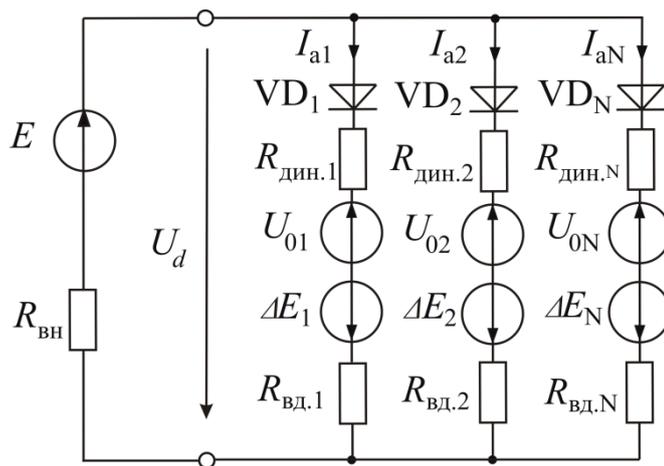


Рис. 8. Расчетная схема анодного питания группы магнетронов с вольтодобавочными источниками

Выходное напряжение высоковольтного выпрямителя, которое является общим

для всех N каналов электропитания, определяется выражением

$$U_d = \frac{E \cdot R_{вн}^{-1} + \sum_{k=1}^N (U_{0k} - \Delta E_k) \cdot (R_{дин.k} + R_{вд.k})^{-1}}{R_{вн}^{-1} + \sum_{k=1}^N (R_{дин.k} + R_{вд.k})^{-1}}, \quad (8)$$

где $R_{дин.k}$, $U_{0.k}$ – динамическое сопротивление и пороговое напряжение k-го магнетрона соответственно.

Анодный ток каждого из магнетронов можно найти по формуле

$$I_{ак} = \frac{U_d + \Delta E_k - U_{0k}}{R_{вд.k} + R_{дин.k}}. \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) позволяют рассчитать анодные токи магнетронов только в установившемся режиме. Для исследова-

ния динамических режимов необходима модель, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Численное решение таких систем производится с помощью современных программных продуктов.

Базовый источник анодного напряжения в схеме на рис. 3 выполнен нерегулируемым, поэтому величина ЭДС этого источника зависит от напряжения в питающей сети и определяется формулой:

$$E = \frac{3\sqrt{6}}{k\pi} \cdot U_{\phi}, \quad (10)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение питающей сети; k – коэффициент трансформации.

Вольтодобавочные элементы должны быть рассчитаны на такое изменение выходного напряжения ΔU_k , которое обеспечивает стабилизацию анодного тока соответствующего магнетрона в заданном диапазоне при всех возможных отклонениях напряжения в сети от номинального значения.

Действующий стандарт на качество электрической энергии допускает отклонения напряжения в сети в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения. Это, согласно (10), приводит к соответствующим

отклонениям ЭДС E базового источника питания. Поэтому максимальная величина ЭДС ΔE_k вольтодобавочных элементов должна быть такой, чтобы при минимально допустимой величине напряжения в сети имелась возможность стабилизировать анодный ток на максимальном значении заданного диапазона его изменения.

Заметим, что в схеме на рис. 7 повышающий трансформатор имеет мощность примерно в N раз, превышающую мощность одного трансформатора в схеме рис. 3. Однако известно, что масса, габариты и стоимость одного трансформатора такой же мощности, как суммарная мощность N трансформаторов, будут в $\sqrt[4]{N}$ раз меньше. Например, трансформатор в схеме рис. 7 для централизованного электропитания шести магнетронов конвейерной установки будет иметь массу на 56 % меньше, чем шесть трансформаторов индивидуальных источников электропитания. При этом из состава электрооборудования исключаются трехфазные регуляторы переменного напряжения, которые, будучи выполненными на тиристорах с импульсно-фазовым управлением, негативно влияют на сеть за счет искажения формы входного тока и потребления реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский. Саратов: Изд-во «Научная книга», 2011. 560 с.
2. Massalfa Microwave // <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.
3. **Methlouthi A.** Microwave Applicator with Conveyor Belt System/ A. Methlouthi, O. Rouaud, L. Boillereaux // Proceedings of the COMSOL Conference. Paris, 2010. https://www.comsol.fi/paper/download/63600/methlouthi_paper.pdf
4. **Puangsawan K.** Design of microwave heating continuous belt system for palm fruit / K. Puangsawan, C. Tongurai, M. Chongcheawchamnan // 2015 Asia-Pacific

Microwave Conference (APMC) Pr. 1-3 DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.

5. **Артюхов И. И.** Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 3(34). С. 149-154.

6. **Артюхов И. И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: СГТУ, 2000. 48 с.

7. Breakdowns' Diagnosis of A New Character Three-Phase High Voltage Power Supply for Industrial Microwave Generators with $N=2$ Magnetrons per Phase / R. Batit, M. Chraygane, M. Ferfra at al. // International

Journal of Electrical and Computer Engineering (JECE). 2016. Vol. 6. No. 3. Pp. 1248-1259.

8. **Surducun V.** Variable power, short microwave pulses generation using a CW magnetron / V. Surducun, E. Surducun, R. Ciupa // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2011. Vol. 11. Iss. 2. Pp. 49-54. DOI: 10.4316/AECE.2011.02008.

9. **Artyukhov I.I.** Simulation of power supply packaged magnetron for industrial applications / I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, A.G. Soshinov // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878968.

10. **Okress E.** Microwave Power Engineering / E. Okress // Vol.1. New York: Acad. Press, 1968.

11. Modeling and Simulation of a Low Power Magnetron as an Element of Electrical

System // Artem I. Zemtsov, Ivan I. Artyukhov, Sergei F. Stepanov et al. // 28th International Conference Radioelektronika 2018. DOI:

10.1109/RADIOELEK.2018.8376358.

12. **Артюхов И.И.** Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 33-38.

13. TOSHIBA Industrial Magnetron E3328. http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/E3328_E.pdf

14. **Артюхов И.И.** Особенности построения регулируемого источника для централизованного питания анодных цепей группы пакетированных магнетронов / И.И. Артюхов, Е.С. Гордеев, А.И. Земцов // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 57-60.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Земцов Артем Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани, докторант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Куркин Семен Андреевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Борисенко Александр Игоревич – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Artyukhov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem I. Zemtsov – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Part of Samara State Technical University in Syzran, Doctoral Candidate of the Department of Power Supply and Electrotechnologies at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Semen A. Kurkin – Dr.Sc., Head: Department of Power Supply and Electrotechnologies at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander I. Borisenko – Master student Department of Power Supply and Electrotechnologies at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.11.18, принята к опубликованию 18.11.18

ЕМКОСТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко

CAPACITIVE NEUTRAL GROUNDING OF POWER TRANSFORMERS AGAINST SPACE WEATHER DISTURBANCES

V.V. Vakhnina, A.A. Kuvshinov, A.N. Chernenko

Аннотация. Рассмотрена типовая схема выдачи электроэнергии от удаленной электростанции на шины мощной электрической сети с емкостным заземлением нейтралей силовых трансформаторов. Показано, что режим нейтралей при емкостном заземлении определяется степенью несимметрии междуфазных напряжений. Разработана схема замещения нулевой последовательности электропередачи с учетом параметров нулевой последовательности оборудования, в том числе и емкостного сопротивления конденсаторных батарей в нейтральных точках силовых трансформаторов. Предложен количественный критерий для выбора параметров конденсаторных батарей емкостного заземления нейтралей силовых трансформаторов исключающий возможность возникновения резонансных явлений.

Ключевые слова: силовой трансформатор, геоиндуцированный ток, конденсаторная батарея, емкостное заземление нейтралей

Аварийные ситуации в электрических сетях непредсказуемы и могут быть вызваны многими факторами: отказом оборудования, неправильными и несогласованными действиями обслуживающего персонала, а также различными природными (геомагнитные бури, вызванные возмущениями космической погоды) и техноген-

A typical scheme of electricity supply from a remote power plant to the high energy electric bus network with capacitive neutral grounding of power transformers is considered. It is shown that the neutral mode with capacitive grounding is determined by the asymmetry rate of voltage between the phases. A scheme has been developed for replacing the zero sequence of power transmission with regard to parameters of the zero sequence of the equipment, including capacitive resistance of capacitor banks in the neutral points of power transformers. A quantitative criterion applied to select the parameters of capacitor banks for capacitive neutral grounding of power transformers, which excludes the possibility of the resonance phenomena, is proposed.

Keywords: power transformer, geomagnetically induced currents, capacitor bank, capacitance neutral grounding

ными воздействиями. Во время возмущений космической погоды между заземленными нейтральными силовыми трансформаторами возникает ЭДС величиной до нескольких киловольт, вызывающая протекание в фазных проводах линий электропередачи (ЛЭП) и обмотках высокого напряжения квазипостоянного геоиндуци-

рованного тока (ГИТ) [1, 2].

Частота ГИТ не превышает 0,1 Гц и во много раз меньше номинальной частоты (50 Гц) напряжения электрической сети. Основное воздействие ГИТ на электрическую сеть заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов, приводящему к многократному возрастанию несинусоидальных токов намагничивания. Это одинаково опасно как для силовых трансформаторов, поскольку возникает дополнительный нагрев обмоток, магнитопровода, масла, конструктивных элементов, так и для режима электрической сети, поскольку увеличивается потребление реактивной мощности, снижается пропускная способность, ухудшается качество электроэнергии.

В зарубежной практике для защиты силовых трансформаторов используют

включение в нейтраль конденсаторной батареи, блокирующей возможность протекания ГИТ по обмоткам высокого напряжения. Однако такое техническое решение связано с возможностью возникновения негативных побочных явлений, в частности резонансных. В этой связи актуальной является задача определения параметров емкостного заземления, при которых невозможно возникновение резонансных явлений.

На рис. 1 представлена типовая схема выдачи электроэнергии от удаленной электростанции (представлена эквивалентным генератором Г) через силовые трансформаторы Т₁, Т₂ и линию электропередачи ЛЭП (одно- или двухцепную) на шины мощной электрической сети, напряжение и частота которой являются величинами постоянными $U=const, f=const$.

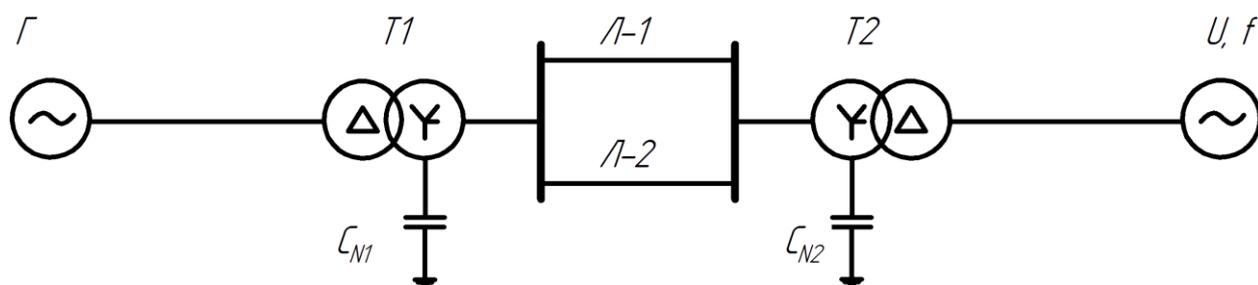


Рис. 1. Расчетная схема электропередачи с емкостным заземлением нейтралей силовых трансформаторов

Конденсаторные батареи C_{N1}, C_{N2} в нейтралях силовых трансформаторов Т₁, Т₂ обеспечивают защиту обмоток высокого напряжения от протекания квазипостоянных токов в период возмущений космической погоды и соответственно магнитных систем от насыщения.

Режим нейтралей силовых трансформаторов Т₁, Т₂ при емкостном заземлении определяется степенью несимметрии междуфазных напряжений. Согласно нормам качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (ГОСТ 32144-2013 [3]) несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями:

– коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности:

$$K_{U(2)} = \frac{U_{(2)}}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

– коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности:

$$K_{U(0)} = \frac{U_{(0)}}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $U_{(2)}$ – действующее значение междуфазного напряжения обратной последовательности основной частоты; $U_{(0)}$ – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты; $U_{НОМ}$ – номинальное междуфазное напряжение.

Согласно ГОСТ 32144-2013 нормально допустимые значения коэффициентов несимметрии 2 %, а предельно допустимые значения 4 %. При этом напряжение об-

ратной последовательности не оказывает влияния на режим нейтрали силовых трансформаторов T_1, T_2 . Напряжение нулевой последовательности $U_{(0)}$ будет определять величину напряжения на нейтралях силовых трансформаторов T_1, T_2 относительно «земли» и соответственно напряжение на конденсаторных батареях C_{N1}, C_{N2} .

На рис. 2 представлена схема замещения нулевой последовательности рассматриваемой электрической системы, составленная для случая возникновения несимметрии напряжений в начале линий электропередачи Л-1, Л-2 и позволяющая рассчитать напряжение на конденсаторных батареях C_{N1}, C_{N2} в нормальном режиме работы.

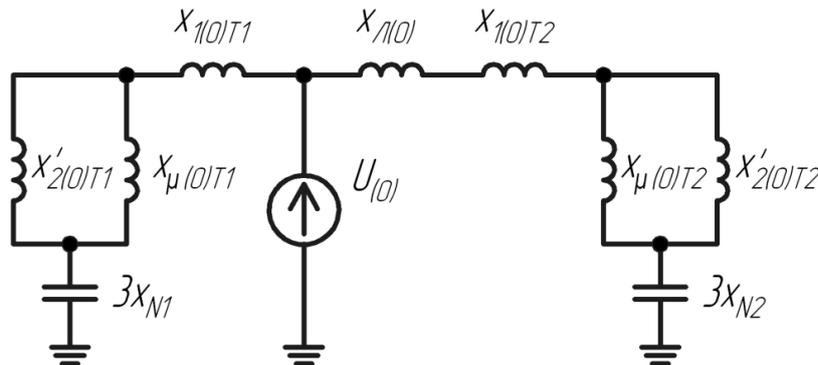


Рис. 2. Схема замещения нулевой последовательности при несимметрии напряжений в начале линии

На схеме замещения учтены следующие параметры:

$U_{(0)}$ – источник напряжения нулевой последовательности;

$x_{1(0)T1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток силового трансформатора T_1 , соединенных в звезду с емкостным заземлением нейтрали;

$x'_{2(0)T1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток, соединенных в треугольник, силового трансформатора T_1 , приведенное в обмотке 1;

$x_{μ(0)T1}, x_{μ(0)T2}$ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 по отношению к токам нулевой последовательности;

$x_{1(0)T2}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток силового трансформатора T_2 , соединенных в звезду с емкостным заземлением нейтрали;

$x'_{2(0)T2}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток, соединенных в треугольник, силового трансформатора T_2 , приведенное обмотке 1;

$$x_{N1} = \frac{1}{\omega C_{N1}}, x_{N2} = \frac{1}{\omega C_{N2}} \text{ – емкостное}$$

сопротивление конденсаторных батарей C_{N1}, C_{N2} на основной частоте, включенных в нейтрали силовых трансформаторов T_1, T_2 .

При составлении схемы замещения, изображенной на рис. 2, учитывались следующие обстоятельства:

- по отношению к токам нулевой последовательности конденсаторная батарея и три фазы обмоток, соединенных в звезду, оказываются включенными последовательно;

- через конденсаторную батарею протекают токи нулевой последовательности трех фаз, что учитывается введением утроенных сопротивлений x_{N1}, x_{N2} .

Необходимо отметить, что $x_{μ(0)} \gg x_{2(0)}$ для силовых трансформаторов любого конструктивного исполнения, даже для трехстержневых трансформаторов, у которых магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются вне магнитопровода. Поэтому $x_{μ(0)} \parallel x_{2(0)} \cong x_{2(0)}$, а схема замещения существенно упрощается к виду, изображенному на рис. 3.

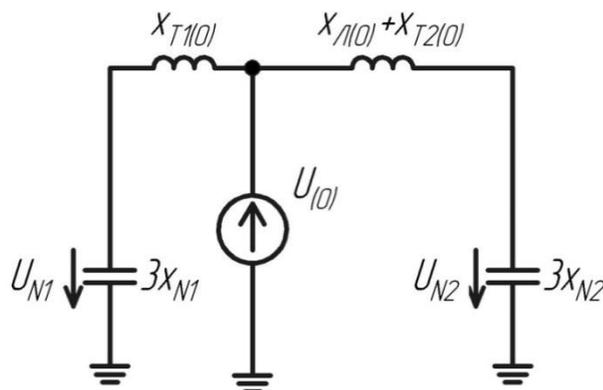


Рис. 3. Упрощенная схема замещения нулевой последовательности

На схеме замещения (рис. 3) символами $x_{T1(0)} \cong (x_{1(0)T1} + x'_{2(0)T1})$ и $x_{T2(0)} \cong (x_{1(0)T2} + x'_{2(0)T2})$ обозначены сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов T_1 и T_2 соответственно. Например, для двухобмоточного трехфазного трехстержневого трансформатора сопротивление нулевой последовательности $x_{T(0)} \cong (0,85 \div 0,9) \cdot x_{(1)}$ от сопротивления прямой последовательности, то есть фактически от сопротивления короткого замыкания $x_K = x_{(1)}$.

Сопротивление нулевой последовательности двухцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленным стальным грозозащитным тросом обычно принимают

$$x_{l(0)} \cong 4,7x_{l(1)} \cong 4,7(x_0 l),$$

где $x_{l(1)}$ – сопротивление прямой последовательности; x_0 – погонное индуктивное сопротивление линии; l – длина воздушной линии электропередачи.

При работе линии электропередачи в одноцепном режиме сопротивление нулевой последовательности уменьшится до значения

$$x_{l(0)} \cong 3x_{l(1)}$$

сопротивления нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии с заземленными стальными грозозащитными тросами.

Упрощенная схема замещения, изображенная на рис. 3, позволяет определить напряжения U_{N1} , U_{N2} на конденсаторных

батареях C_{N1} , C_{N2} и соответственно нейтралей силовых трансформаторов T_1 , T_2 при возникновении несимметрии напряжений линии электропередачи

$$U_{N1} = \frac{3x_{N1}}{3x_{N1} - x_{T1(0)}} U_{(0)}, \quad (3)$$

$$U_{N2} = \frac{3x_{N2}}{3x_{N2} - (x_{T2(0)} + x_{L(0)})} U_{(0)}. \quad (4)$$

Величина напряжения нулевой последовательности $U_{(0)}$, определяемая выражением (2), может достигать в сетях 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ значений 8,2 кВ; 13,2 кВ и 20 кВ соответственно.

Как видно из выражений (3), (4), напряжения на конденсаторных батареях C_{N1} , C_{N2} может многократно превысить напряжение нулевой последовательности $U_{(0)}$, теоретически достигая бесконечно большой величины вследствие возможного резонанса напряжений. В частности, $U_{N1} = \infty$ при $x_{N1} = x_{T1}/3$ и $U_{N2} = \infty$ при $x_{N2} = (x_{T2(0)} + x_{L(0)})/3$. В этой связи емкость конденсаторных батарей C_{N1} , C_{N2} должна выбираться с учетом ограничения напряжения нейтралей силовых трансформаторов T_1 , T_2 , например, на уровне не превышающем напряжения нулевой последовательности.

Если ввести коэффициенты напряжения нейтрали как отношение напряжений:

$$K_{N1} = \frac{U_{N1}}{U_{(0)}}, \quad (5)$$

$$K_{N2} = \frac{U_{N2}}{U_{(0)}}, \quad (6)$$

то емкостное заземление нейтралей силовых трансформаторов T_1, T_2 можно считать эффективным в условиях несимметрии фазных напряжений линии при

$$K_{N1} \leq 0,1, \quad (7)$$

$$K_{N2} \leq 0,1. \quad (8)$$

Условие (7) выполняется при $x_{N1} \leq 0,033 \cdot x_{T1(0)}$, а условие (8) выполняется при $x_{N2} \leq 0,033 \cdot (x_{T2(0)} + x_{Л(0)})$.

При включении в нейтрали силовых трансформаторов T_1, T_2 одинаковых конденсаторных батарей, то есть $C_{N1} = C_{N2} = C_N$, емкость последней должна выбираться по условию (7). В этом случае автоматически выполняется и условие (8).

При выполнении условия (7) резонансная частота f_{P1} контура $x_{T1(0)} - x_{N1}$ определяется величиной

$$f_{P1} \leq f \cdot \sqrt{0,033} \cong 9,1 \text{ Гц}$$

и, как видно, находится в субгармонической области (здесь $f = 50$ Гц).

Резонансная частота f_{P2} контура $(x_{Л(0)} + x_{T2(0)}) - x_{N2}$ при $C_{N1} = C_{N2}$ определяется

$$f_{P2} = f_{P1} \cdot \sqrt{x_{T1(0)} / (x_{Л(0)} + x_{T2(0)})}$$

соотношением индуктивных сопротивлений нулевой последовательности силовых трансформаторов T_1, T_2 и линии электропередачи Л-1, Л-2, причем $f_{P2} < f_{P1}$.

Таким образом, при емкостном заземлении нейтрали обмоток высокого напряжения силового трансформатора на конденсаторную батарею в нормальном установившемся режиме воздействуют:

– напряжение нулевой последовательности основной частоты

вследствии несимметрии фазных напряжений на выводах обмоток высокого напряжения силового трансформатора. При предельно допустимой величине коэффициента несимметрии по нулевой последовательности, равной 4 %, напряжение нулевой последовательности достигает 8,2 кВ в сетях 220 кВ; 13,2 кВ в сетях 330 кВ и 20 кВ в сетях 500 кВ;

– напряжение высших гармоник нулевой последовательности, т. е. гармоник, кратных трем (3-я, 6-я и т. д. гармоники). Предельно допустимая величина коэффициента несинусоидальности в сетях (110 ÷ 330) кВ составляет 3 %. Например, если среди высших гармоник доминирует 3-я гармоника, то напряжение этой гармоники может достигнуть 6,6 кВ в сетях 220 кВ; 9,9 кВ в сетях 330 кВ и 16,5 кВ в сетях 500 кВ.

Для обеспечения эффективного заземления нейтрали как в нормальном, так и в аварийных режимах, вызванных несимметричными короткими замыканиями емкостное сопротивление конденсаторной батареи (x_N) необходимо выбирать с учетом сопротивления нулевой последовательности защищаемого силового трансформатора ($x_{T(0)}$), а именно $x_N \leq (0,033 \div 0,1) \cdot x_{T(0)}$.

Мощность конденсаторной батареи вполне соизмерима с номинальной мощностью защищаемого силового трансформатора. Например, при $x_N / x_{T(0)} \cong 0,1$ мощность конденсаторной батареи должна составлять ≈ 32 % от мощности силового трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boteler D.H. Effects of geomagnetically induced currents in the BC Hydro 500 kV system / D.H. Boteler, R.M. Shier, T. Watanabe, R.E. Horita // IEEE Transactions on Power Delivery. 1989. Vol. 4. Issue 1. P. 818-823.

2. Pirjola R. Effects of interactions between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power

transmission system / R. Pirjola // Earth, Planets and Space. 2008. Vol. 60. Issue 7. P. 743-751.

3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 16 с.

Вахнина Вера Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Кувшинов Алексей Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Черненко Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Vera V. Vakhnina – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Power and Electrical Engineering of Togliatti State University

Aleksey A. Kuvshinov – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power and Electrical Engineering, Togliatti State University

Aleksey N. Chernenko – PhD, Associate Professor of the Department of Electric Power and Electrical Engineering, Togliatti State University

Статья поступила в редакцию 08.11.18, принята к опубликованию 28.11.18



ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.533.3

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПОЛЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛАХ

Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин

ADVANCED TECHNOLOGIES FOR HIGHLY EFFICIENT FIELD RESOURCES OF ELECTRONS IN SILICON CRYSTALS

R.K. Yafarov, V.Ya. Shanigin

Разработана технология получения полевых многоострийных источников электронов с использованием атомной структуры кристаллов кремния и явления самоорганизации наноразмерных островковых углеродных покрытий, осажденных из микроволновой плазмы паров этанола. Установлено, что плотности автоэмиссионных токов в таких источниках электронов более чем на порядок превосходят плотности токов с эмиттерных решеток на пластинах кремния, полученных с использованием традиционных высокоразрешающих литографических микроэлектронных технологий. При высокодозном облучении углеродом полученных многоострийных кремниевых катодных структур обнаружено повышение содержания алмазоподобных фаз в области микровыступов. Показано, что имплантация углерода в пластины кремния с предварительно структурированной поверхностью увеличивает величину максимальной плотности автоэмиссионного тока более чем на два порядка.

Ключевые слова: плазменная микрообработка, морфология, наноструктурирование поверхности, автоэмиссия

A technology for the development of field multicusp electron sources using atomic structure of silicon crystals, and the self-organization phenomenon of nanosize insular carbon coatings precipitated from the microwave plasma of ethanol vapor is developed. It is established that the density of self-emission currents in such sources of electrons significantly surpass the density of currents from emitter lattices on the silicon plates received using traditional high-resolution lithographic microelectronic technologies. Using carbon for high-dose radiation of the received multicusp silicon cathode structures we determined an increase in diamond like phases in the area of microelevations. It is shown that implantation of carbon in silicon plates with previously structured surfaces increases the maximum density of self-emission currents by more than two orders.

Keywords: plasma processing, morphology, nanosize, surface, self-emission

Одним из наиболее перспективных материалов для полевых источников электронов является кристаллический кремний. В первую очередь, это обусловлено развитой технологической базой, обеспечивающей создание на кристаллах кремния микроструктур с высокой поверхностной плотностью.

Недостатком полевых источников электронов на основе кремния является низкая плотность автоэмиссионного тока, который, как правило, находится в интервале 50-150 мкА/см². Так, в работе [1] сотрудников Массачусетского технологического института для плотного массива эмиттеров в виде высокоаспектных пиков из кремния *p*-типа, созданных с помощью микротехнологии, получены значения максимальной плотности автоэмиссионного тока $J = 145 \text{ мкА/см}^2$ при напряженности поля анода $E = 32 \text{ В/мкм}$. Такие плотности тока удовлетворяют требованиям использования чисто кремниевых автоэмиссионных катодов в области FED (field emission displays – дисплеи с полевыми эмиттерами) [2]. Однако этого недостаточно для создания, например, вакуумных полевых транзисторов с высокой выходной мощностью. Кроме того, получение высокоаспектных эмиттеров, а также использование различных конструкторско-технологических решений, направленных на повышение фактора усиления поля β путем уменьшения радиусов эмитирующих острий, диаметров отверстий в управляющих электродах или создания нанолезвийных планарных структур, приводит к усложнению технологии и сопровождается, как правило, снижением надежности и увеличением себестоимости автоэмиссионных устройств.

Для острийных кремниевых автокатодов при максимальной плотности тока 150 мкА/см² и типичном расстоянии между остриями 3-4 мкм [3] поверхностная плотность эмитирующих выступов находится в интервале $(6-9) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Для снижения нагрузки на каждый эмитирующий выступ и увеличения максимальной плотности тока при той же токовой нагрузке на острие целесообразно увеличивать по-

верхностную плотность эмиссионных центров. При увеличении поверхностной плотности острий до $10^7 - 10^9 \text{ см}^{-2}$ период их расположения должен быть меньше 1 мкм. С точки зрения использования современных литографических микроэлектронных технологий создание таких многоострийных матриц представляется вполне реализуемой задачей. Однако это приведет к неоправданному их удорожанию. Решение проблемы может быть достигнуто разработкой новых нелитографических технологий создания многоострийных кремниевых катодных структур.

Следует отметить, что по законам статистики большое количество острий уменьшает флуктуацию общего тока, которая для обозначенных концентраций эмиссионных центров не превысит 1 %.

Цель работы – разработка технологий, обеспечивающих повышение плотности автоэмиссионных токов катодных матриц на основе кристаллического кремния.

Использование атомной структуры кристаллов кремния для получения многоострийных катодных матриц с плотностью острий $10^7 - 10^9 \text{ см}^{-2}$. Получение многоострийных полевых источников электронов с поверхностной плотностью острий $10^7 - 10^9 \text{ см}^{-2}$ осуществлялось в одном технологическом цикле. Процесс включал следующие операции: ионно-физическое травление для получения атомно-чистых поверхностей кристаллов кремния, последующее осаждение на них субнаноразмерных островковых углеродных масочных покрытий и затем высокоанизотропное травление для получения на поверхности наноразмерных столбчатых кремниевых выступов. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли, соответственно, 250 Вт и 875 Гс. В качестве рабочего газа для плазменного удаления естественного оксидного покрытия на кремнии использовался аргон. Давление газа и смещение на подложкодержателе в процессах сухого травления составляли, соответственно, 0,1 Па и 100 В.

Осаждение субнаноразмерных углеродных островковых масочных покрытий осуществлялось в СВЧ плазме при температуре подложки 250 °С и давлении паров этанола около 0,05 Па [4]. Потенциал смещения на подложкодержателе в процессе осаждения составлял 100 В. Высокоанизотропное травление пластин кремния с углеродным масочным покрытием осуществлялось при положительном смещении на подложкодержателе с использованием хладона-14 при давлении менее 0,1 Па.

В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния Si (100) различных типов проводимости с удельным сопротивлением 0,01-10 Ом·см и жесткостью 0,1 Н/м. Поле сканирования составляло 3×3 мкм. Обработка результа-

тов измерений производилась с использованием программного обеспечения АСМ.

Исследования автоэмиссионных свойств проводились в условиях высокого вакуума (10^{-5} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Диаметр рабочей поверхности анода, изготовленного из углеродного материала МПГ-6, составлял 3 мм.

На рис. 1 приведено СЭМ-изображение кремниевых нановыступов, полученных после высокоанизотропного СВЧ плазмохимического травления в хладоне-14 с самоорганизованным углеродным масочным покрытием, осажденным в течение 7 с.

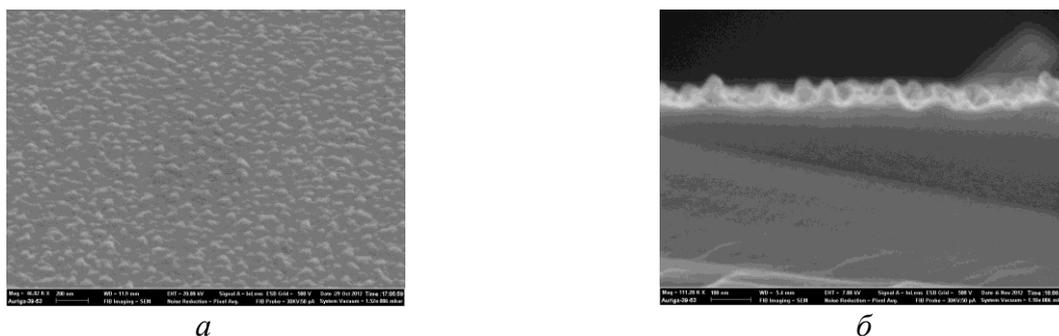


Рис. 1. СЭМ-изображения пространственных наноструктур после травления пластин кремния в хладоне-14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий: *а* – вид под углом 63°, *б* – изображение на сколе пластины

Установлено, что в оптимальных режимах высокоанизотропного масочного травления поверхностная плотность кремниевых выступов находится на уровне $(3-5) \cdot 10^9$ см⁻² (рис. 2). Это на 2-3 порядка больше, чем при получении высокоаспектных кремниевых эмиттеров с использованием традиционных литографических технологий [2,3]. Для кристаллов кремния *n*-типа получены плотности автоэмиссионных токов до 5,7 мА/см² при пороге начала автоэмиссии 28 В/мкм. Среднее расстояние между выступами высотой около 18 нм составляет 133 нм при оптимальной длительности высокоанизотропного трав-

ления 30 мин. Для кристаллов кремния *p*-типа минимум напряженности поля возбуждения автоэмиссии, равный 32 В/мкм, достигается при длительности масочного травления 20 мин. Получены плотности автоэмиссионных токов до 8 мА/см² при среднем расстоянии между выступами высотой 16 нм около 160 нм. Увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов по сравнению с высокоаспектными пиками на кремнии, изготовленными с использованием литографических микротехнологий, составило около двух порядков.

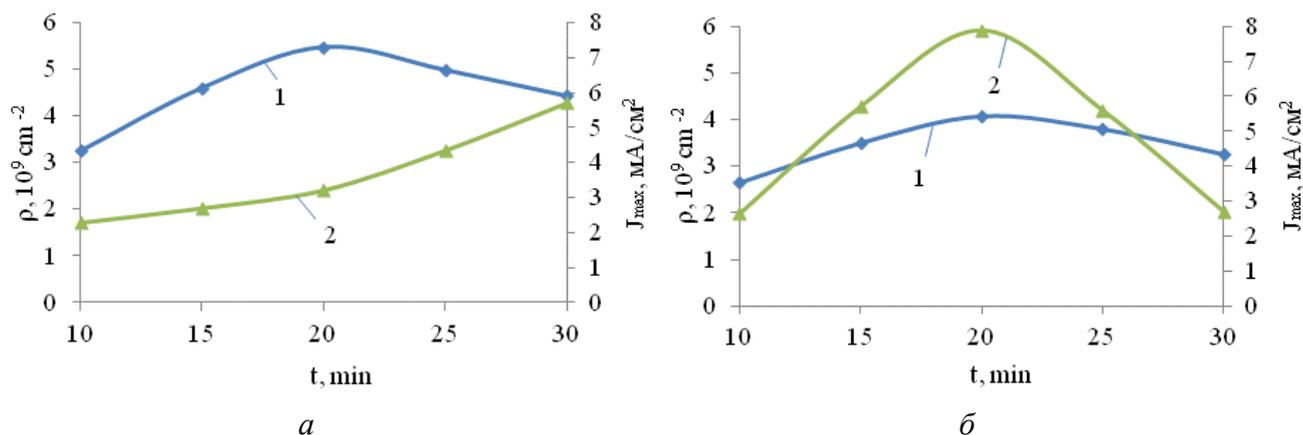


Рис. 2. Зависимости поверхностных плотностей выступов (1) и плотностей максимальных токов автоэмиссии (2) от длительности масочного травления кремния (100) n- (а) и р- типов в плазме хладона-14 (б)

Влияние высокодозной имплантации углерода на фазовый состав и автоэмиссионные свойства кристаллов кремния. Имплантация ионов углерода проводилась на установке с импульсным источником ионов при ускоряющем напряжении 80 кВ и дозах в диапазоне $1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Структурирование поверхности кремния осуществлялось осаждением островковых углеродных масочных покрытий в микроволновой плазме паров этанола на кристаллы кремния с естественным оксидным покрытием с последующим высокоанизотропным плазмохимическим травлением в плазме хладона-14 по методике, изложенной в работе [4]. Для анализа фазового состава ионно-имплантированных кремниевых пластин использован метод конфокальной рамановской микроскопии/спектроскопии. Спектры рассеяния света в диапазоне рамановских сдвигов $150-3000 \text{ см}^{-1}$ с разрешением $1,7 \text{ см}^{-1}$ регистрировались охлаждаемой ПЗС-камерой при возбуждении твердотельным лазером на длине волны 473 нм. Излучение фокусировалось $100\times$ объективом с числовой апертурой $NA = 0.95$. Это обеспечивало размер фокусного пятна $\sim 0.6 \text{ мкм}$, доста-

точного для локальности исследования особенностей рельефа поверхности.

На рис. 3 приведены спектры рамановского рассеяния образцов кремния, облученных ионами C^+ с дозами $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при 80 кВ. Видно, что облучение, как и следует ожидать, приводит к аморфизации приповерхностного слоя кремния (появляются полосы рассеяния, связанные с наличием аморфного слоя Si). Имплантированный углерод проявляется в виде широких полос рассеяния при 1350 см^{-1} и 1585 см^{-1} , интенсивность которых возрастает с увеличением дозы C^+ . Положение линий хорошо совпадает с положением известных полос G и D рамановского рассеяния на sp^2 и sp^3 - связях в аморфном углероде [5]. Часть атомов углерода связывается с кремнием и дает широкую полосу рассеяния при 740 см^{-1} , параметры которой несущественно зависят от дозы C^+ . С увеличением дозы имплантированных ионов уменьшается доля аморфного кремния и увеличивается доля углеродных фаз. Изменения углеродосодержащего фазового состава более интенсивно происходят в выступах на поверхности кремния (рис.3б).

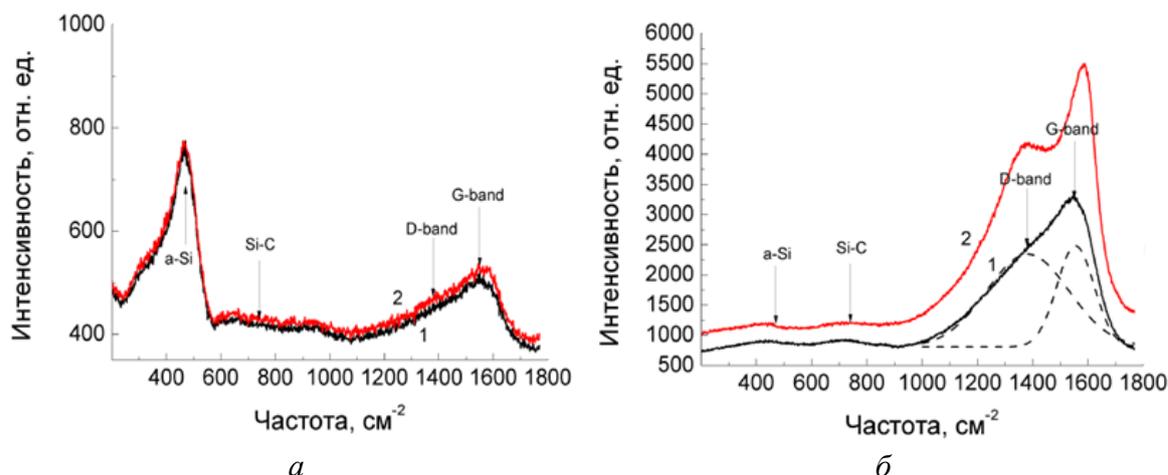


Рис. 3. Спектры рамановского рассеяния образцов кремния, облученных ионами C^+ с дозами $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (а) и $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (б). Различные кривые соответствуют разным точкам поверхности: 1 – вне выступа; 2 – в выступе. Штриховыми линиями показано разложение одного экспериментального спектра на гауссовы линии

Для получения количественной зависимости соотношения sp^3 и sp^2 -связей от дозы углерода проведено разложение «углеродной» полосы рамановского рассеяния на гауссовы компоненты, соответствующие полосам G и D. Относительный вклад полос G и D определялся исходя из соотношения их интегральных интенсивностей. Установлено, что соотношение алмазоподобной и графитовой фаз, образующихся в приповерхностной области кристаллического кремния, зависит как от дозы облучения, так и от морфологических характеристик поверхности. С увеличением дозы наблюдается тенденция относительного роста D-линии рамановского рассеяния.

Особенно сильные изменения происходят в выступах на поверхности кремния, где доля алмазоподобной фазы увеличивается по сравнению с плоской поверхностью на величину порядка 20 %. Для ровных участков имплантированной поверхности кремния четкой зависимости в изменении соотношения D и G линий от дозы не просматривается (доля алмазоподобной фазы вне микровыступов составляет 60-63 %). Фазовый состав имплантированных C^+ слоев кремния, как и следовало

ожидать, не зависит от типа электропроводности полупроводника. Наиболее значимым результатом является возрастание доли алмазоподобной фазы при дозе $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, которое составляет более 80 %. При этом происходит обострение линий D и G. Это свидетельствует об упорядочении структур соответствующих фаз.

На рис. 4, 5 приведены зависимости от дозы облучения ионами углерода автоэмиссионных характеристик на исходных «гладких» и предварительно поверхностно структурированных пластинах кремния различных типов проводимости (на вставке приведены значения максимальных плотностей автоэмиссионных токов на «гладком» (1) и поверхностно структурированном кремнии (2) в отсутствие имплантации углерода).

Порог напряженности поля автоэмиссии на предварительно структурированных поверхностях кремния p-типа с увеличением дозы облучения слабо увеличивается и для всех доз облучения он меньше, по сравнению с эмиссией с изначально «гладких» пластин (рис.4а). Для пластин кремния n-типа, напротив, с увеличением дозы облучения он достаточно быстро уменьшается (рис. 5а).

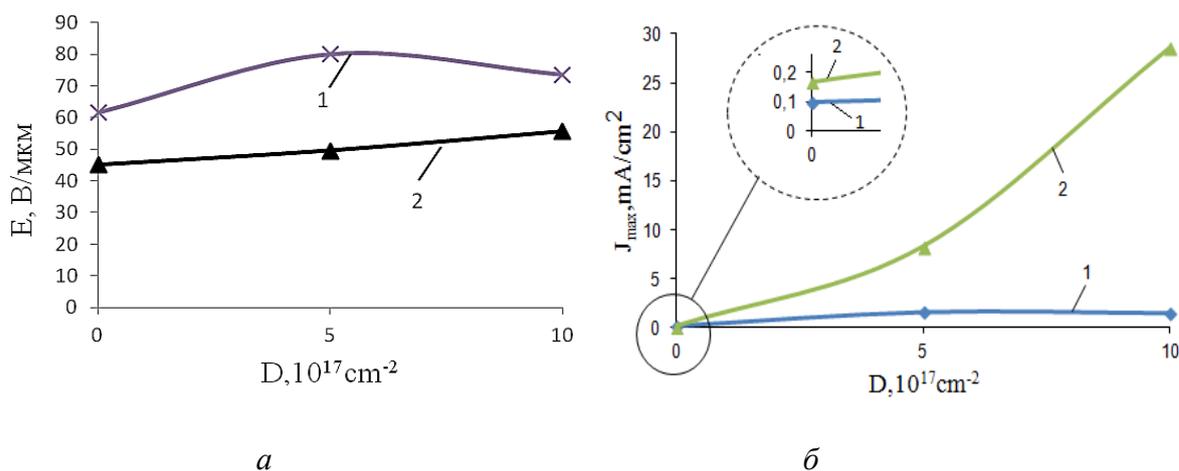


Рис. 4. Зависимости от дозы облучения ионами углерода порогов (а) и максимальных плотностей токов (б) полевой эмиссии электронов на исходных («гладких») (1) и поверхностно структурированных (2) пластинах кремния (100) р-типа

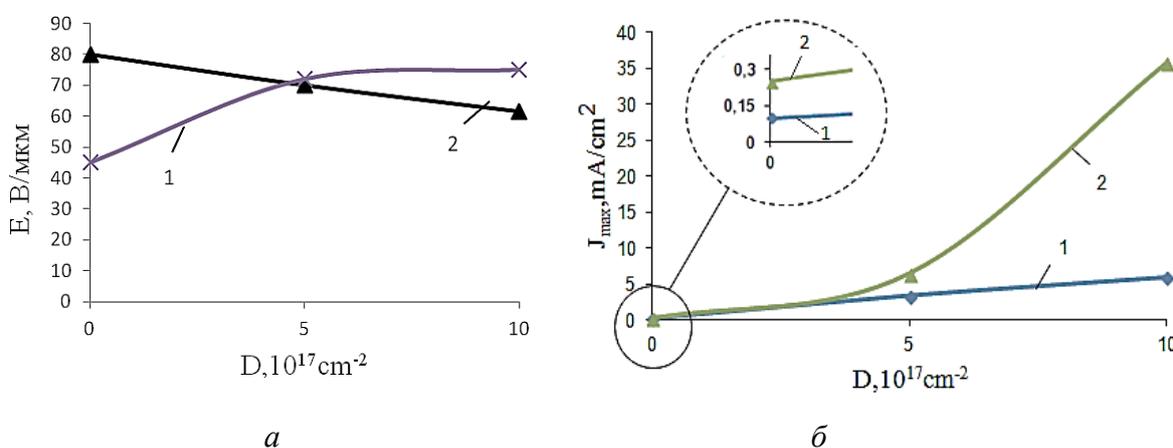


Рис. 5. Зависимости от дозы облучения ионами углерода порогов (а) и максимальных плотностей токов (б) полевой эмиссии электронов на исходных («гладких») (1) и поверхностно структурированных (2) пластинах кремния (100) n-типа

Характер зависимостей максимальных плотностей автоэмиссионных токов на «гладких» и поверхностно структурированных пластинах кремния (100) обоих типов проводимостей от дозы облучения имеет одинаковый вид. Одинаковая высокодозная ионная имплантация углерода в пластины кремния обоих типов проводимостей с предварительно структурированными поверхностями, и приводит к практически одинаковым морфологическим характеристикам поверхностей ($h \approx 7-10$ нм, $\rho \approx (3-5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), но для пластин кремния n-типа она оказывается более эффективной. При дозе облучения $1 \cdot 10^{18}$

см^{-2} для пластин кремния n-типа максимальные плотности автоэмиссионных токов на 25-30 % больше, чем для пластин р-типа. Для кристаллов кремния обоих типов проводимостей увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов составляет, по сравнению с аналогичными необлученными пластинами, более двух порядков. Очевидно, что эти изменения связаны со структурно-фазовыми превращениями и, в частности, увеличением с ростом дозы облучения относительного содержания графитоподобного и алмазоподобного углерода за счет фаз a-Si и a-SiC, а также изменением соотно-

шения концентраций связей sp^3 и sp^2 в пользу первых с признаками кристаллизации в микровыступах. рельефа поверхности. Их формирование, как показали результаты структурно-фазовых исследований при высокодозном облучении, так же как нелинейное увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов, не зависит от типа проводимости кремниевых кристаллов.

При высокодозном облучении углеродом поверхностная плотность микровыступов на пластинах кремния не зависит от исходной морфологии и составляет $(3-5) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Однако исходная морфология пластин кремния сильно влияет на модификацию фазового состава приповерх-

ностного слоя и их автоэмиссионные свойства. Так, для пластин кремния р-типа с первоначально структурированной поверхностью увеличение максимальной плотности тока по отношению к облученным ионами углерода с той же дозой кристаллов кремния с исходной неструктурированной поверхностью составляет более одного, а по отношению к необлученным кристаллам кремния р-типа электропроводности, более двух порядков величины. Аналогичные изменения автоэмиссионных свойств происходят при высокодозной имплантации углерода на пластинах кремния n-типа с предварительно структурированными поверхностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Velásquez-García L. F.** Uniform high-current cathodes using massive arrays of Si field emitters individually controlled by vertical Si ungated FETs / L. F. Velásquez-García Guerrero, Y. Niu, A.I. Akinwande // Part 2: Device fabrication and characterization, IEEE Transactions in Electron Devices 58 (2011). P. 1783.

2. **Fei Zhao Jian-hua Deng.** Structures and Field Emission Characteristics of Ion Irradiated Silicon Nanowire Arrays / Fei Zhao Jian-hua Deng, Dan-dan Zhao, Ke-fan Chen, Guo-an Cheng, and Rui-ting Zheng // Journal of Nanoscience and Nanotechnology 10 (2010). P. 1-5.

3. **Betsui K.** Fabrication and characteristics of Si Field Emitter Arrays: Fourth Int. / K. Betsui // Vacuum Microelectronics Conf. Nagahama, Japan, 1991. Technical Digest. P. 26–29.

4. **Yafarov R. K.** Surface Nanostructuring in the Carbon–Silicon (100) System Upon Microwave Plasma Treatment / R. K. Yafarov, V. Ya. Shanygin // Semiconductors, 2017, Vol. 51, No. 4. P. 531–535.

5. **Ding X.L.** Photoluminescence and bonding structure evolution of amorphous carbon films with laser intensity / X.L. Ding, Q.S. Li, X.H. Kong // Physica B: Physics of Condensed Matter, Volume 404, Issue 14-15, P. 1920-1923.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Шаныгин Виталий Яковлевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., Professor. Head: Laboratory of Submicron Electron-Ion Technology, Saratov branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

Vitaly Ya. Shanigin – PhD, Research Fellow at the Laboratory of Submicron Electron-Ion Technology, Saratov branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

Статья поступила в редакцию 15.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАНАРНО-ТОРЦЕВОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ НА АВТОЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТОДНЫХ МАТРИЦ

Р.К. Яфаров, Д.В. Нефедов

DENSITY IMPACT OF PLANAR-END STRUCTURING ON SELF-EMISSION CHARACTERISTICS OF THE MATRIX CATHODE

R.K. Yafarov, D.V. Nefedov

Предложена конструкция и разработана технология планарного структурирования поверхности автокатодов путем создания планарно-торцевых автоэмиссионных структур на пассивных (диэлектрических) и активных (кремниевых) подложках. Одновременно с улучшением автоэмиссионных характеристик разработанная технология позволяет интегрировать автоэмиссионные структуры на основе алмазграфитовых пленочных покрытий с приборами, изготовленными по традиционным микроэлектронным технологиям. Показано, что для улучшения автоэмиссионных характеристик планарно-торцевых пленочных структур необходимо увеличивать эффективную длину эмитирующего лезвия путем увеличения концентрации «окон» на единицу площади и уменьшения их размера.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, планарно-торцевые структуры, наноуглеродный композит, плазмохимическое травление

В последнее время большое значение уделяется изучению эмиссионных свойств различных углеродных структур, особенно в связи с необходимостью создания высокопоточных автоэмиссионных источников электронных пучков для ЛБВ, плоских панелей и для других приложений [1-4]. Известные автоэмиссионные структуры острейного и лезвийного типов не удовле-

A design and technology for planar structuring of surfaces to field radiating cathodes by creating planar-end autoemission structures on passive (dielectric) and active (silicon) substrates is presented. Additionally to improvement of autoemission characteristics, the developed technology allows for integrating the autoemission structures based on diamond-graphite film coatings with devices manufactured according to traditional microelectronic technologies. It is shown that in order to improve the field emission characteristics of planar-end film structures, it is necessary to increase the effective length of the emitting blade by increasing the concentration of "windows" per unit area and reducing their size.

Keywords: field emission, planar-end structures, nanocarbon composite, plasma-chemical etching

творяют ряду требований [1, 2]. В острейных автокатадах эмиссия идет в основном с острей, разогрев которых приводит к взрывной эмиссии и не позволяет получать большие интегральные значения тока и долговечные катоды. Лезвийные автокатады не позволяют получать большие токи.

При создании электровакуумных приборов с ультракоротким временем готов-

ности требуется получение высоких значений автоэмиссионных (АЭ) токов с достаточно малой площади поверхности автокатада. Плотность АЭ тока зависит от концентрации эмиссионных центров (ЭЦ). Как показывает практика, на эмитирующей поверхности она не должна быть бесконечно большой, так как эффективность эмиссии будет снижаться из-за взаимного экранирования ЭЦ. В связи с этим в работе предложены и исследованы конструкции тонкопленочных планарно-торцевых эмиссионных структур с различными размерами и поверхностной плотностью, изготовленные на основе алмазографитовых пленочных структур.

Процесс создания структур заключался в послойном осаждении с использованием СВЧ плазмы всех функциональных слоев. На подложку, путем разложения в СВЧ плазме паров тетраэтилортосиликата (ТЭОС) осаждалась пленка нестехиометрической окиси кремния (SiO_x) толщиной 0,5 мкм. Далее, также в СВЧ плазме, из паров этанола осаждалась углеродная пленка толщиной 70-100 нм, которая зарастивалась слоем диэлектрика, аналогичного по составу и толщине первому слою. Формирование маски, через которую производилось травление тонкопленочной структуры, производилось термовакuumным испарением металла или с использованием фотолитографических методов. Электрон-

ная микроскопия структур производилась на электронном микроскопе Auriga.

Исследования автоэмиссионных свойств осуществлялись в условиях высокого вакуума (10^{-6} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Диаметр рабочей поверхности анода, изготовленного из углеродного материала МПГ-6, составлял 3 мм. За порог начала автоэмиссии принималась напряженность внешнего электрического поля, при которой плотность автоэмиссионного тока составляла 10 мкА/см^2 .

Планарно-торцевые автоэмиссионные структуры с окнами размером 250×250 мкм. Структура была выполнена на стеклянной подложке, на которую осаждались вышеуказанные функциональные слои, после чего на поверхности всей структуры, методом термовакuumного распыления металла, формировалась никелевая маска с размером окон 250×250 мкм (рис. 1). После этого структура подвергалась плазмохимическому травлению в среде CF_4 с целью формирования «колодцев» в областях, не закрытых никелевой маской, таким образом, чтобы из стенок «колодцев» выступало углеродное лезвие. Травление углеродного слоя производилось в плазме кислорода. Формирование углеродного лезвия осуществлялось в ходе изотропного травления в плазме CF_4 при давлении 1 Па.

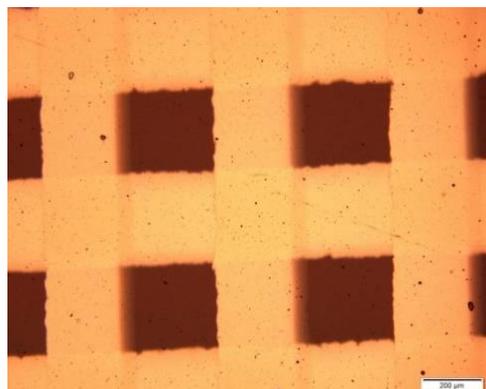
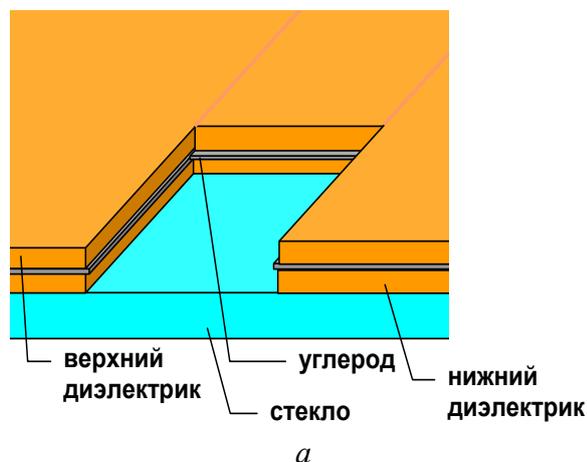


Рис. 1. Схематическое изображение торцевой эмиссионной структуры (а) и вид сверху на реальную исследуемую структуру (б)

При измерении АЭ характеристик данных планарно-торцевых структур было установлено, что порог начала эмиссии составляет 15 В/мкм, максимальная плотность АЭ тока 13 мА/см².

Электронно-микроскопические исследования торцов эмитирующих углеродных пленок показали высокую неровность их краев. Для улучшения однородности эмитирующего слоя была проведена обработка структур в плазме аргона. Это привело к

удалению наиболее выступающих частей углеродного лезвия (рис. 2) и позволило увеличить максимальную плотность АЭ тока до 21 мА/см². При этом порог начала эмиссии возрос до 21 В/мкм, что подтверждает удаление ряда эмиссионных выступов, которые, по всей вероятности, первыми вступали в работу и первыми же выходили из строя с катастрофическим разрушением прилегающих областей.

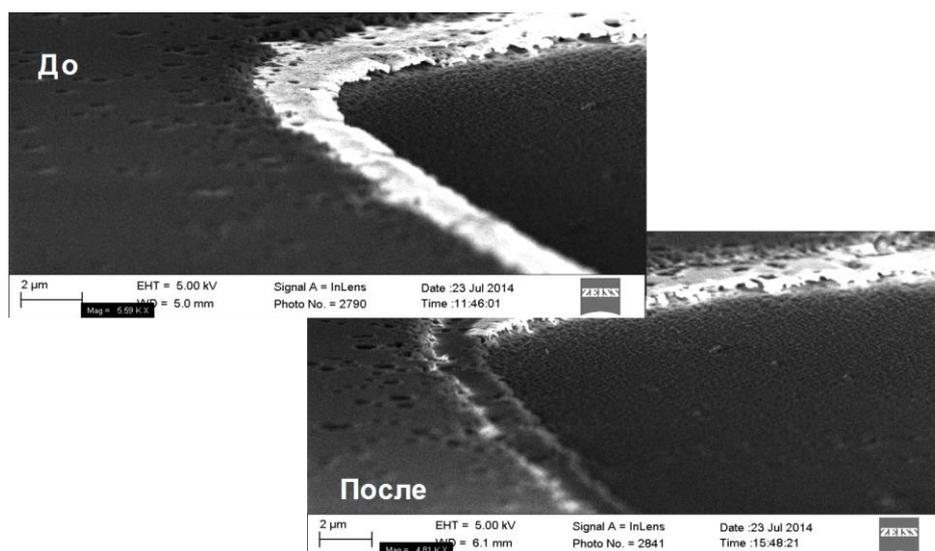


Рис. 2. Электронная микроскопия единичного окна планарно-торцевой структуры до и после обработки углеродного лезвия в плазме аргона

Планарно-торцевые эмиссионные структуры с окнами диаметром 2 мкм. Для увеличения эффективной длины углеродного лезвия были сформированы структуры с окнами диаметром 2 мкм (рис. 3). Электронная микроскопия скола структуры окна показала, что изначально полученная структура также имеет крайне изрезанный характер лезвия (рис. 4). Измеренные АЭ характеристики имели следующие значения: порог начала эмиссии 10 В/мкм, максимальная плотность тока 20 мА/см², что очень близко к структурам с окнами 250*250 мкм. Обработка углеродного лезвия в плазме аргона привела к выравниванию края углеродного лезвия и увеличению порога начала эмиссии до 15 В/мкм и максимальной плотности тока до 30 мА/см².

Для интеграции элементов полупроводниковой и вакуумно-плазменной микроэлектроники изучена возможность создания планарно-торцевых АЭ структур на

монокристаллическом кремнии. Планарно-торцевые структуры изготавливались на основе слоистой кремний-углеродной пленочной структуры, аналогичной рассмотренной выше. На поверхности структуры проводилась фотолитография для формирования резистивной маски, представляющей собой окна диаметром 2 мкм. Через сформированную маску для получения углеродного лезвия, выступающего из окружающего диэлектрика, проводились процессы травления SiO_x. Для увеличения скорости процесса верхний слой SiO_x травился с использованием жидкостного химического травления (ЖХТ) в растворе HF:NH₄F:H₂O (1:5:5) и последующего до-травливания в плазме кислорода. Травление нижнего SiO_x для одних образцов проводилось с помощью ЖХТ+O₂, в другой группе образцов производилось плазмохимическое травление (ПХТ) нижнего слоя SiO_x в плазме CF₄.

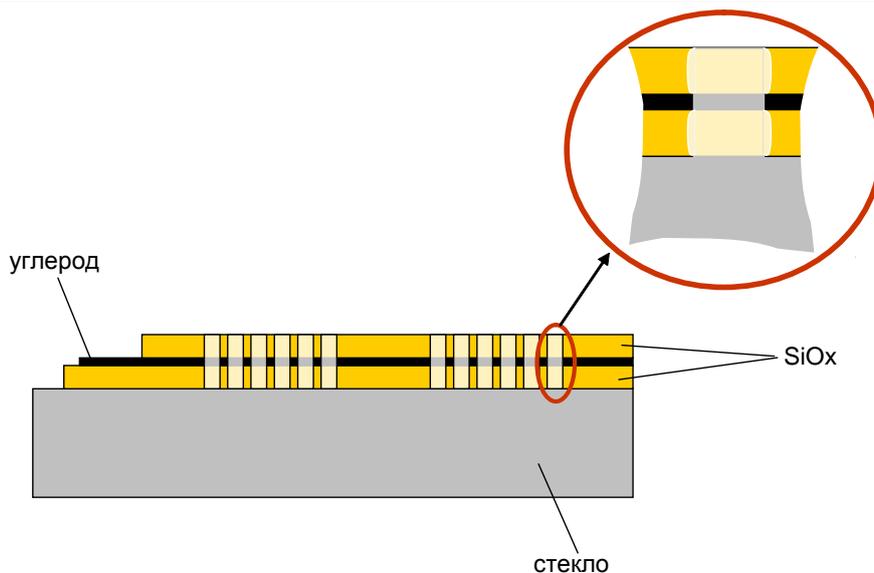


Рис. 3. Схематическое изображение планарно-торцевой структуры на стекле с окнами диаметром 2 мкм

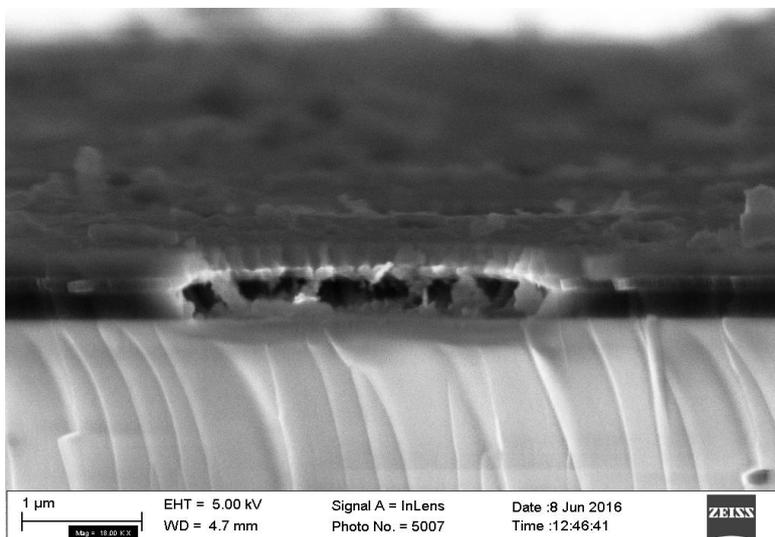


Рис. 4. Электронная микроскопия скола планарно-торцевой структуры с окнами диаметром 2 мкм после обработки углеродного лезвия в плазме аргона

При измерении АЭ характеристик было установлено, что способ травления структуры оказывает существенное влияние на параметры эмиссии (см. таблицу 1). При использовании сухого травления нижнего

диэлектрического слоя порог начала автоэмиссии уменьшается с 51,6 до 43,5 В/мкм, а максимальная плотность автоэмиссионного тока увеличивается более, чем в два раза: с 11,07 до 23,47 мА/см².

Влияние способов травления диэлектрика на автоэмиссионные характеристики планарно-торцевых эмиссионных структур

Травление верхнего SiO _x	Травление нижнего SiO _x	E, В/мкм	J _{макс} , мА/см ²
ЖХТ+O ₂	ЖХТ+O ₂	51,63	11,07
ЖХТ+O ₂	CF ₄	43,50	23,47

По результатам электронной микроскопии скола в области окна было установлено, что профиль подтравки верхнего SiO_x под фоторезистом для обоих вариантов изготовления структур идентичен и указывает на анизотропный характер травления пленки SiO_x , а профиль травления нижнего слоя SiO_x сильно отличается (рис. 5). Для структур, полностью протравленных с помощью ЖХТ, наблюдается деформация структуры в результате чрезмерного жидкостного подтравки под ниж-

ний слой диэлектрика и обвала напряженной слоистой структуры по направлению к подложке с вероятным разрывом углеродной пленки. В группе образцов, где травление нижнего слоя SiO_x проводилось в плазме хладона, конечная структура имеет принципиально иной вид. Во-первых, углеродное лезвие имеет менее изрезанный характер, во-вторых, нижний слой SiO_x протравлен вместе с подложкой, в-третьих, отсутствует обвал структуры с разрывом углерода.

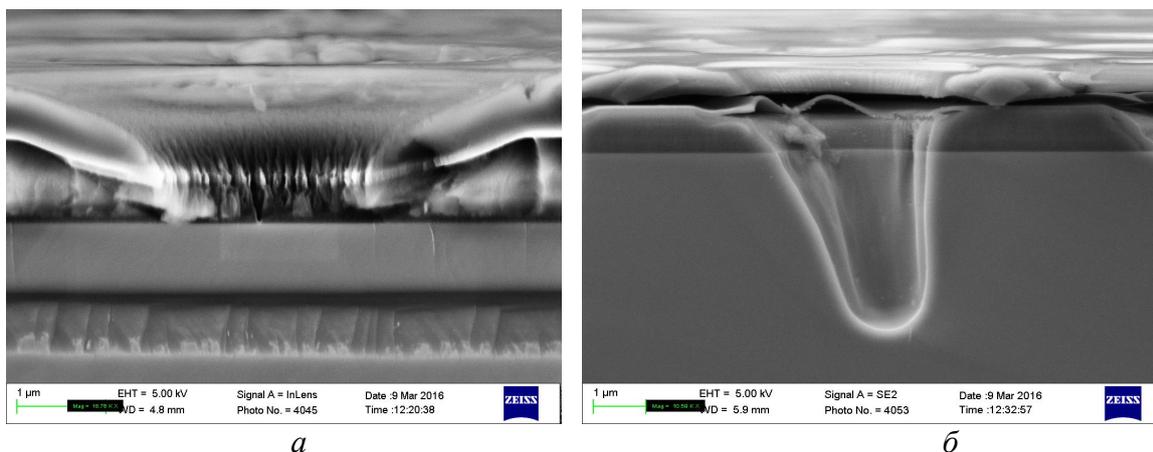


Рис. 5. Электронная микроскопия скола планарно-торцевой структуры на кремнии с окнами диаметром 2 мкм: *а* – структура с ЖХТ верхнего и нижнего SiO_x , *б* – структура с ЖХТ верхнего и ПХТ нижнего SiO_x

Итак, разработана технология создания планарно-торцевых автоэмиссионных структур на основе алмазграфитовых пленочных структур на пассивных (диэлектрических) и активных (кремниевых) подложках, позволяющих интегрировать автоэмиссионные структуры с приборами, изготовленными по традиционным микроэлектронным технологиям. Показано, что для улучшения автоэмиссионных характеристик планарно-торцевых пленочных структур необходимо увеличивать эффективную длину эмиттирующего лезвия пу-

тем увеличения концентрации «окон» на единицу площади и уменьшения их размера. Повышение стабильности автоэмиссии планарно-торцевых структур может быть достигнуто за счет улучшения однородности края углеродного лезвия посредством его обработки в плазме аргона. Для изготовления планарно-торцевых автоэмиссионных устройств с нанокompозитными алмазграфитовыми эмиттерами желательно использовать только сухие методы травления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fursey G.N.** Field emission in vacuum micro-electronics / G.N. Fursey. Kluwer Academic Plenum Publishers, NY.: Springer, 2005. 205 p.

2. Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследование в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах. Внедрение в производство / под ред. Н.А. Бушуева. М.: Радиотехника, 2016. 480 с.

3. **Егоров Н.В.** Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы / Н.В. Егоров, Е.П. Шешин. М.: Интеллект, 2011. 704 с.

4. **Проскуровский Д.И.** Эмиссионная электроника / Д.И. Проскуровский. Томск: Изд-во ТГУ, 2010. 288 с.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., Professor. Head: Laboratory of Submicron Electron-Ion Technology, Saratov branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

Нефедов Денис Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Denis V. Nefedov – PhD, Research Fellow at the Laboratory of Submicron Electron-Ion Technology, Saratov branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

Статья поступила в редакцию 15.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА СТРУКТУРУ ЛЕЗВИЙ АВТОЭМИССИОННЫХ ТАНТАЛОВЫХ
ШАЙБ КОМБИНИРОВАННЫХ КАТОДОВ ПРИБОРОВ М-ТИПА**

**О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, И.В. Белова, А.Я. Зоркин,
Е.Н. Горбунова**

**EFFECT OF ELECTRO-THERMAL PROCESSES ON THE BLADES
STRUCTURE OF AUTOEMISSION TANTALUM WASHERS OF
COMBINED CATHODES IN M-TYPE DEVICES**

**O.D. Tishchenko, A.A. Tishchenko, I.V. Belova, A.Ya. Zorkin,
E.N. Gorbunova**

Проведены исследования влияния электротермических процессов, таких как, тренировка катодов в приборах и работа прибора в номинальном режиме, на структуру лезвий автоэмиссионных танталовых шайб. Установлено, что возможной причиной нестабильной работы и малых сроков службы приборов М-типа на основе комбинированных катодов является то, что в начале их работы происходит расслоение кромок на лезвия шириной 0,1–0,5 мкм, которое создает автоэлектронную эмиссию в начале каждого импульса.

Ключевые слова: катод, автоэлектронная эмиссия, танталовые шайбы, РЭМ.

В настоящее время электровакуумные приборы (ЭВП) СВЧ находят широкое применение и удерживают лидирующее положение во многих областях науки и техники. Это связано с тем, что малая величина мощности излучения современных полупроводниковых приборов, низкая температурная и радиационная устойчивость, определяемая свойствами самих полупроводниковых материалов и р-п переходов, существенно сужают область их

The influence of electrothermal processes, such as dynamic tests, cathode training in devices and operation of the device in the nominal mode, on the structure of the blades of autoemission tantalum washers is studied. It is established that a possible reason for unstable operation and small terms of service of devices based on the composite cathode is separation of the edges on the blade width of 0.1–0.5 μm , which creates autoelectronic emission at the starting point of each pulse.

Keywords: cathode, field emission properties, tantalum washers, SEM

применения. К достоинствам электровакуумных приборов следует отнести длительный срок службы и достаточно высокую надёжность в работе [1].

При разработке конструкции катодного узла электровакуумного СВЧ прибора необходимо учитывать все особенности работы прибора и условий его эксплуатации [2-6].

Сейчас в импульсных СВЧ приборах М типа сантиметровой и длинноволновой

части миллиметрового диапазонов широкое применение нашли холодные вторично-эмиссионные катоды. Для запуска такого катода существует ряд технических решений. К таким решениям можно отнести: применение лезвийных автоэммиттеров (АЭК).

Для обеспечения мгновенной готовности и включения с первого импульса прибора прямой волны М типа малой мощности применяется конструкция катода (рис. 1), рабочая поверхность которого выполняется в виде чередующихся вторично-эмиссионных и автоэмиссионных шайб. В качестве вторичного эмиттера применяется импрегнированный алюминатный катод, представляющий собой пористый вольфрам, пропитанный алюминатом бария и кальция ($3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), в качестве материала автокатаода используется сверхтонкая (4 мкм) танталовая фольга [7].

Однако основной проблемой применения комбинированных автоэмиссионных катодах является их нестабильность. Под нестабильностью АЭК понимают изменения тока АЭК во времени при постоянном напряжении, носящие монотонный характер, статистические изменения, большие флуктуации тока, значительные низкочастотные шумы; недолговечность, внезапное прекращение эмиссии вследствие пробоя и оплавления, то есть сильного затупления острий [8].

Для исследования влияния электротермических процессов (таких как, проведение испытаний, тренировки катодах в приборах и работа прибора в номинальном режиме) на структуру лезвий автоэмиссионных танталовых шайб были подготовлены образцы комбинированного автоэмиссионного катода, типовая конструкция которых представлена на рис. 1.

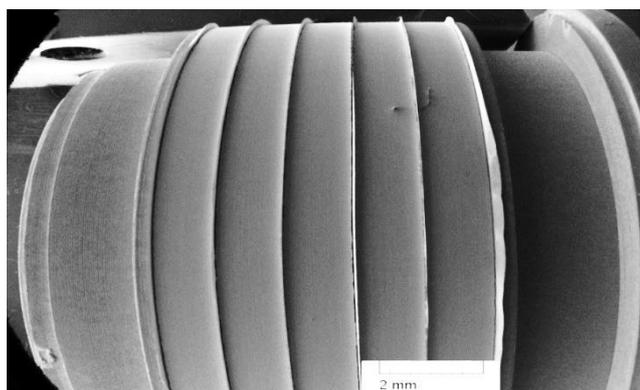


Рис. 1. Типовая конструкция образцов комбинированных автоэмиссионных катодах

Для проведения исследований методом РЭМ образцы были демонтированы из приборов М типа после тренировки и испытания катода в приборах (рис. 2), после работы прибора в номинальном режиме в течение 50 ч (рис. 3) и 100 ч (рис. 4).

Из рис. 2 видно, что после тренировки и испытания катода в приборе М типа наблюдается эффект самоорганизации лезвий танталовых шайб на острия шириной 0,1-0,5 мкм, которые создают автоэлектронную эмиссию в начале каждого импульса и обеспечивают тем самым мгновенную

готовность прибора. Возможными причинами расслоения кромок могут являться и термические напряжения, и образование канавок за счет ионного распыления при ионной фокусировке в центре кромки.

Возможной причиной образования выступов шириной менее 1 мкм (исходная танталовая фольга, полученная прокаткой, имеет вытянутые зерна размером несколько микрометров) по краям кромок может быть самосогласованное магнетронное распыление в парах материала катода.

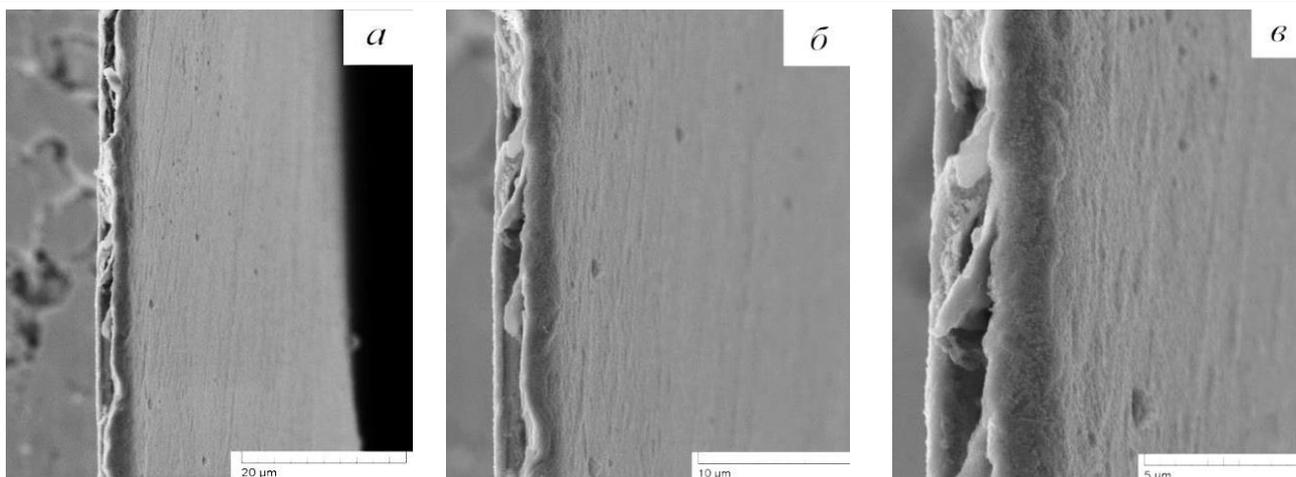


Рис. 2. РЭМ изображения лезвий автоэмиссионных танталовых шайб комбинированных катодов после тренировки и испытания катода в приборах М-типа: *а* – увеличение $\times 5000$, *б* – увеличение $\times 10000$, *в* – увеличение $\times 20000$

РЭМ исследования образцов катодов после работы прибора в номинальном режиме в течение 50 ч (рис. 3) показывает, что на кромках имеются локальные зоны их оплавления, которые при последующей работе прибора (от 100 ч и более) прогрессируют и приводят к затуплению и отслоению острий (рис. 4).

Температура плавления тантала 2996°C [7], но в работающем приборе средняя температура поверхности катода не достигает 1100°C , а локальные температуры –

более 1800°C , что недостаточно для плавления чистого тантала.

Поэтому наличие локального оплавления кромок может быть только при наличии на поверхности оксидов тантала, вероятнее всего Ta_2O_5 с температурой плавления $1785\text{--}1872^{\circ}\text{C}$ в зависимости от его модификации. Данное предположение подтверждается результатами (таблица) исследования химического состава лезвия автоэмиссионного танталового комбинированного катода (рис. 5).

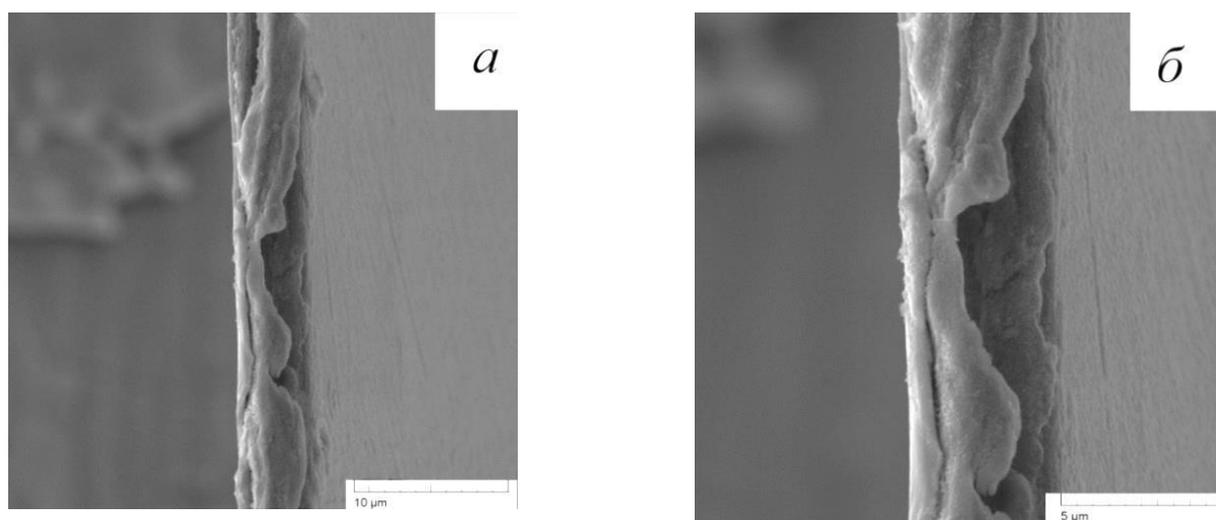


Рис. 3. РЭМ изображения лезвий автоэмиссионных танталовых шайб комбинированных катодов после работы прибора в номинальном режиме в течение 50 ч: *а* – увеличение $\times 10000$, *б* – увеличение $\times 20000$

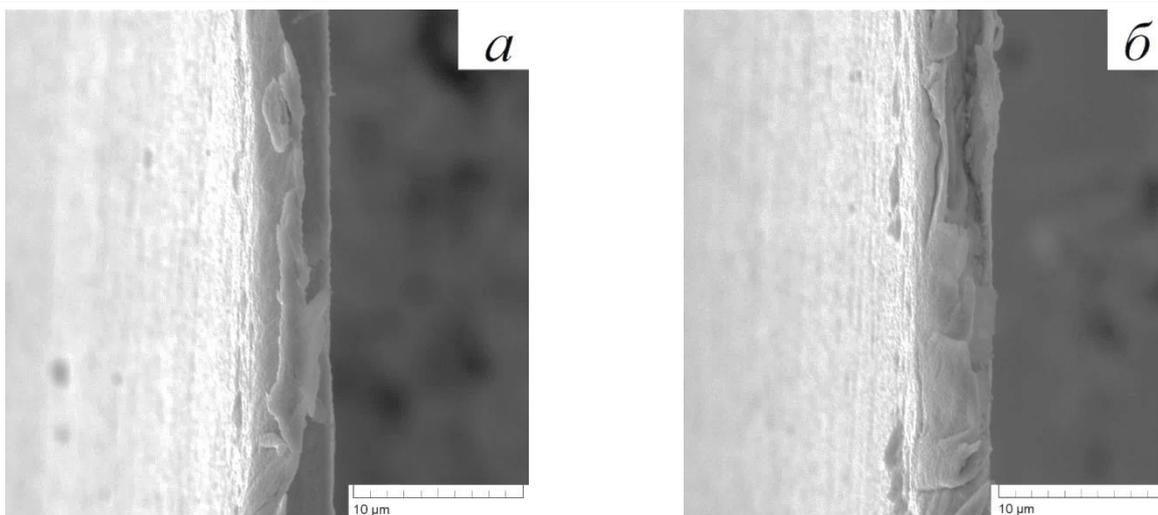


Рис. 4. РЭМ изображения лезвий автоэмиссионных танталовых шайб комбинированных катодов после работы прибора в номинальном режиме в течение 100 час.: *а* – затупление острий, *б* – расслоение острий

Химический состав лезвия автоэмиссионного танталового комбинированного катода
(в атомных процентах)

Спектр	O	Ba	Ta	W
1	35.00	17.48	43.31	4.21
2	34.53	17.47	39.16	8.84

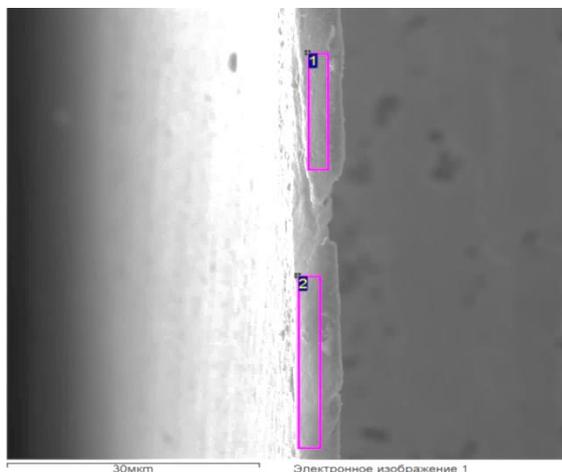


Рис. 5. Увеличенный участок лезвия автоэмиссионной танталовой шайбы комбинированного катода, в котором определялся химический состав (таблица 1): 1 – спектр № 1, 2 – спектр № 2

Итак, возможной причиной нестабильной работы и малых сроков службы данных приборов с данным катодом является то, что в начале их работы происходит расслоение кромок на лезвия шириной 0,1–0,5 мкм, которое создает автоэлектронную эмиссию в начале каждого импульса и обеспечивает тем самым мгновенную го-

товность прибора. Однако эти лезвия могут быть не устойчивы к интенсивной электронной и ионной бомбардировке и микроразрядам, которые могут после нескольких сотен часов работы приводить к оплавлению и разрушению этих лезвий, что снижает автоэлектронную эмиссию,

ухудшает стабильность работы прибора и приводит к пропуску импульсов.

Для предотвращения процессов расслоения и оплавления кромок возможно формирование кромок на рабочей поверхности

вторично-эмиссионных втулок. Работа таких кромок может быть более стабильной из-за наличия эффекта их самоаострения, что делает их особенно устойчивыми к воздействию микроразрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. М.: Радиотехника, 2005. 352 с.

2. Пат. 2149478, Российская федерация, МПК H01J 1/148 (2000.01), H01J 9/04 (2000.01), H01J 19/02 (2000.01), H01J 23/04 (2000.01). Термоэмиссионный катод / Аристова И.Я., Батрак И.К., Бесов А. В., Морозов В. В., Каландаришвили А.Г., Скорлыгин В.В., Шумская С.В.; заявитель и патентообладатель: Аристова И.Я., Батрак И.К., Бесов А. В., Морозов В. В., Каландаришвили А.Г., Скорлыгин В.В., Шумская С.В.; заявл. 13.04.1999. Оpubл.: 20.05.2000 Бюл. № 14. 6 с.

3. Пат. 2187860, Российская федерация, МПК H01J 1/30 (2000.01), H01J 19/24 (2000.01). Автоэмиссионный катод и электронный прибор на его основе / Галдецкий А.В., Мухуров Н.И.; заявитель и патентообладатель: Галдецкий А.В., Мухуров Н.И.; заявл. 01.07.1997; Оpubл.: 20.08.2002 Бюл. № 23.

4. **Ли И.П.** Стратегия развития катодной техники в современных условиях на примере ОАО «Плутон» / И.П. Ли, С. В. Калущин, С. В. Комиссарчик // Материалы XXI Научно-технической конференции по

вакуумной науке и технике, 2014. С. 209-214.

5. **Ли И. П.** Некоторые особенности конструирования катодных узлов для магнетронов импульсного действия с повышенной надежностью и сроком службы / И.П. Ли, Н.Е. Леденцова, В.С. Поляков, А.Д. Силаев // Наукоемкие технологии, 2014, Т. 15, № 11, С. 32-38.

6. Пат. 2380784, Российская Федерация, МПК H01J 25/00 (2006.01). Магнетрон с безнакальным запуском / Ли И.П., Дюбуа Б.Ч., Каширина Н.В., Комиссарчик С.В., Лифанов Н.Д., Зыбин М.Н.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Плутон» № 2008142022/09; заявл. 24.10.2008; оpubл. 27.01.2010, Бюл. № 3. 11 с.

7. **Тищенко А.А.** Формирование кромок автоэмиссионных шайб комбинированного катода маломощного усилителя прямой волны М типа / А.А. Тищенко, О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин // Вопросы электротехнологии. 2016 № 3. С. 16-20.

8. **Елинсон М.И.** Ненакаливаемые катоды / М. И. Елинсон, Г. А. Кудинцева и др. М.: Сов. радио, 1974. 336 с.

Тищенко Ольга Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тищенко Артем Александрович – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga D. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem A. Tishchenko – Postgraduate, Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander Ya. Zorkin – Dr.Sc., Professor. Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Белова Ирина Всеволодовна – ведущий технолог ОАО Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» НПЦ-5, Саратов

Irina V. Belova – Senior Manufacturing Engineer, ОАО Mints Radiotechnical Institute, NPC -5, Saratov

Горбунова Елена Николаевна – преподаватель Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. в г. Петровске

Elena N. Gorbunova – Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University, branch in Petrovsk

Статья поступила в редакцию 17.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

УДК 621.341.572

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРАХ НА НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ ВЫХОДНОЙ СИСТЕМЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Е.Е. Миргородская, В.А. Колчев, Н.П. Митяшин, М.А. Фурсаев, Е.Д. Карнаухов

THE INFLUENCE OF VOLTAGE RATE ERRORS IN MULTILEVEL INVERTERS ON THE SYMMETRY OF THE OUTPUT VOLTAGE SYSTEM

E.E. Mirgorodskaya, V.A. Kolchev, N.P. Mityashin, M.A. Fursaev, E.D. Karnaukhov

При рассмотрении трехфазных многоуровневых автономных инверторов напряжения (МАИН) необходимо учитывать влияние точности реализации параметров кривой выходного напряжения на такие показатели качества генерируемой электроэнергии, как стабильность выходного напряжения и коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности. Приводятся результаты анализа указанной проблемы для трехфазных инверторов, построенных на базе однофазных МАИН.

Ключевые слова: многоуровневые инверторы напряжение, стабилизация напряжения уровня, спектр, показатели качества кривой выходного напряжения, чувствительность

When considering three-phase multi-level autonomous voltage inverters (MAIV), a particular focus is to be made on the influence of accuracy of the output voltage curve parameters on such indicators of generated electricity quality as output voltage stability and asymmetry coefficients in reverse and zero sequences. This paper presents the results of analysis of the given problem for three-phase inverters built on the basis of single-phase MAIV (hereinafter referred to as composite MAIV).

Keywords: multilevel voltage inverters, stabilization of voltage level, spectrum, quality indicators of the output voltage curve, sensitivity

При рассмотрении влияния точности реализации уровней напряжения на величину выходного напряжения трехфазных инверторов на основе соединения однофазных многоуровневых автономных инверторов напряжения (МАИН), следует учитывать способ получения уровней в различных фазах и соответствующих им участках кривых. В частности, возможны следующие варианты формирования уровней:

- использование отдельного для каждой фазы источника данного уровня напряжения;
- использование общего для всех фаз источника данного уровня напряжения.

В последнем случае при возникновении погрешности реализации некоторого уровня λ_i соответствующие изменения происходят во всех трех фазах. Это приведет к изменению действующего значения напряжения всех трех фаз. Но в силу симметрии расположения носителей данного уровня λ_i в кривой напряжения эти изменения будут равными по величине и не приведут к изменениям фазовых соотношений между кривыми напряжений фаз. Таким образом, влияя на величину выходного напряжения инвертора, возникновение погрешности $\Delta\lambda_i$ не приводит к несимметрии трехфазной системы напряжений.

В случае использования отдельных источников напряжений уровней для каждой фазы возникновение погрешности в реализации некоторого уровня в одной из фаз указанное изменение напряжения, очевидно, вызовет появление несимметрии трехфазной системы напряжений.

Аналізу чувствительности величины коэффициента несимметрии по обратной последовательности трехфазной системы напряжений к изменению величины уровней в составных на базе однофазных МАИН посвящена настоящая работа.

Метод исследования. В [1] при исследовании многоуровневых инверторов напряжения были введены функции-носители уровней напряжения S_i и V_i . По-

скольку в настоящей работе мы рассматриваем шестиуровневый инвертор напряжения, функции S_i задаются на периоде $[0, 2\pi]$ оси электрического угла θ следующим образом:

$$S_i(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}) \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases},$$

где $i = \overline{1, 24}$.

Здесь значения углов θ_i являются границами интервалов, внутри которых кривая первой фазы выходного напряжения сохраняет постоянное значение. Для трехфазных инверторов эти значения целесообразно считать равноотстоящими, то есть положить

$$\theta_i = (i-1) \frac{\pi}{12}, \quad (i = \overline{1, 24}).$$

Квазиоптимальным с точки зрения минимизации суммарного коэффициента гармонических составляющих выходной кривой инвертора K_U является следующий набор значений уровней напряжения первой фазы на интервалах $[\theta_i, \theta_{i+1})$:

$$L_i = L \cdot \sin\left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}\right), \quad (i = \overline{1, 24}).$$

В дальнейшем значения L_i , полученные при $L = 1$, обозначим через λ_i . При этом для квазиоптимальной кривой очевидны следующие равенства:

$$\lambda_{13-j} = \lambda_j; \lambda_{12+j} = -\lambda_j; \lambda_{25-j} = \lambda_j; \quad (j = \overline{1, 6}).$$

Отсюда следует целесообразность введения шести функций V_j по формулам $V_j(\theta) = S_j(\theta) + S_{13-j}(\theta) - S_{12+j}(\theta) - S_{25-j}(\theta)$, $(j = \overline{1, 6})$.

Каждая из этих функций отлична от нуля на тех промежутках оси θ , на которых напряжение первой фазы инвертора принимает одно из значений $+\lambda_j$ или $-\lambda_j$ для соответствующего значения индекса j . С их помощью напряжение первой фазы может быть выражено следующим образом:

$$u_1(\theta) = \sum_{j=1}^6 \lambda_j \cdot V_j(\theta).$$

Две другие фазы имеют аналогичные выражения:

$$u_2(\theta) = \sum_{j=1}^6 \lambda_j \cdot V_{s(j)}(\theta),$$

$$u_3(\theta) = \sum_{j=1}^6 \lambda_j \cdot V_{t(j)}(\theta).$$

где $s(j)$ и $t(j)$ – перестановки индексов, соответствующие сдвигам этих напряжений на углы $-\frac{2\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3}$ соответственно.

Аналогичные разложения для межфазных напряжений имеют следующий вид:

$$u_{12} = \sum_{i=1}^6 \Lambda_i \cdot F_i(\theta),$$

$$u_{23} = \sum_{i=1}^6 \Lambda_i \cdot F_{s(i)}(\theta),$$

$$u_{31} = \sum_{i=1}^6 \Lambda_i \cdot F_{t(i)}(\theta).$$

Здесь $\Lambda_i, (i = \overline{1,6})$ – значения уровней межфазных напряжений, связанные с

уровнями $\lambda_j, (j = \overline{1,6})$ фазных напряжений так

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \lambda_3 - \lambda_2; \\ \Lambda_2 &= \lambda_4 - \lambda_1; \\ \Lambda_3 &= \lambda_5 + \lambda_1; \\ \Lambda_4 &= \lambda_2 + \lambda_6; \\ \Lambda_5 &= \lambda_3 + \lambda_6; \\ \Lambda_6 &= \lambda_4 + \lambda_5. \end{aligned} \quad (1)$$

Функции-носители $F_i(\theta)$ рассчитываются по формулам

$$F_i(\theta) = S_{i+2}(\theta) + S_{15-i}(\theta) - S_{i+14}(\theta) - S_{27-i}(\theta), \quad (2)$$

причем здесь

$$S_{25}(\theta) = S_1(\theta); S_{26}(\theta) = S_2(\theta).$$

Функции $S_j(\theta), V_j(\theta)$ и $F_j(\theta)$ обладают свойством ортогональности, состоящем в следующем:

$$\int_0^{2\pi} S_j(\theta) \cdot S_i(\theta) d\theta = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j, \\ \frac{\pi}{12} & \text{при } i = j, \end{cases} \quad (3)$$

$$\int_0^{2\pi} V_j(\theta) \cdot V_i(\theta) d\theta = \int_0^{2\pi} F_i(\theta) \cdot F_j(\theta) d\theta = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j, \\ \frac{\pi}{3} & \text{при } i = j. \end{cases} \quad (4)$$

Это позволяет, в частности, легко рассчитать действующие значения фазных и линейных напряжений и оценить предельные отклонения напряжений уровней от номинальных значений с точки зрения допустимого значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности.

При равноотстоящих углах коммутаций действующие значения напряжений равны:

– для фазных напряжений

$$U_1 = U_2 = U_3 = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \lambda_i^2}, \quad (5)$$

– для межфазных напряжений

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Lambda_i^2}. \quad (6)$$

Чувствительность действующих значений напряжений к точности задания напряжений уровней. Чувствительность действующих значений напряжений многоуровневого инвертора к погрешности реализации квазиоптимальных значений напряжений уровней может быть оценена с помощью полного дифференциала

$$\Delta U \cong \sum_{i=1}^6 \frac{\partial U}{\partial \lambda_i} d\lambda_i. \quad (7)$$

Здесь ΔU – оценка погрешности реализации рассматриваемого фазного или межфазного напряжения, $d\lambda_i$ – погрешность реализации уровня λ_i .

Дифференцируя равенства (5) и (6) и используя формулы (1) – (4), находим для фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_k}{\partial \lambda_i} &= \frac{1}{6} \cdot \frac{\lambda_i}{U_k}, \quad (k=1,2,3), \\ \frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_1} &= \frac{1}{6U_{12}} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_1} (\Lambda_3^2 + \Lambda_2^2) = \frac{1}{3U_{12}} \cdot (2\lambda_1 + \lambda_5 - \lambda_4), \\ \frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_2} &= \frac{1}{6U_{12}} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_1} (\Lambda_4^2 + \Lambda_1^2) = \frac{1}{3U_{12}} \cdot (2\lambda_2 + \lambda_6 - \lambda_3), \\ \frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_3} &= \frac{1}{6U_{12}} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_1} (\Lambda_5^2 + \Lambda_1^2) = \frac{1}{3U_{12}} \cdot (2\lambda_3 + \lambda_6 - \lambda_2), \\ \frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_4} &= \frac{1}{6U_{12}} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_1} (\Lambda_6^2 + \Lambda_2^2) = \frac{1}{3U_{12}} \cdot (2\lambda_4 + \lambda_5 - \lambda_1), \\ \frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_5} &= \frac{1}{6U_{12}} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_1} (\Lambda_6^2 + \Lambda_3^2) = \frac{1}{3U_{12}} \cdot (2\lambda_5 + \lambda_4 + \lambda_1), \\ \frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_6} &= \frac{1}{6U_{12}} \cdot \frac{\partial}{\partial \lambda_1} (\Lambda_4^2 + \Lambda_5^2) = \frac{1}{3U_{12}} \cdot (2\lambda_6 + \lambda_2 + \lambda_3). \end{aligned} \tag{8}$$

Для межфазных напряжений U_{23} и U_{31} производные $\frac{\partial U_{23}}{\partial \lambda_i}$ и $\frac{\partial U_{31}}{\partial \lambda_i}$ имеют такие же выражения.

Квазиоптимальные значения уровней λ_i, Λ_i , производных $\frac{\partial U_k}{\partial \lambda_i}$ и $\frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_i}$ приведены в таблице.

Номинальные значения уровней фазных λ_i и межфазных напряжений Λ_i , коэффициенты чувствительности фазных $\frac{\partial U_k}{\partial \lambda_i}$ и межфазных напряжений $\frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_i}$ к погрешностям реализации уровней фазных напряжений λ_i , абсолютные $\lambda_{i,дон}$ и относительные $\delta \lambda_{i,дон}$ значения допустимых погрешностей реализации уровней λ_i

i	λ_i, B	Λ_i, B	$\frac{\partial U_k}{\partial \lambda_i}$	$\frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_i}$	$\Delta \lambda_{i,дон}$	$\delta \lambda_{i,дон}, \%$
1	0,130	0,226	0,031	0,106	0,184	140
2	0,383	0,663	0,090	0,312	0,063	16,4
3	0,609	1,054	0,143	0,497	0,039	6,4
4	0,793	1,374	0,187	0,648	0,030	3,8
5	0,924	1,600	0,218	0,754	0,028	2,8
6	0,991	1,717	0,234	0,809	0,024	2,4

Определение допустимых погрешностей реализации уровней, соответствующих максимально допустимому коэффициенту несимметрии по обратной последовательности. В соответствии с

ГОСТ 32144-2013 максимально допустимое значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности трехфазной системы напряжения K_{2U} равно 2 %, то есть отношение действующего значения

основной гармонике напряжения обратной последовательности U_{on} к действующему значению напряжения прямой последовательности U_{nn} не должно превышать 0,02:

$$\frac{U_{on}}{U_{nn}} = 0,02.$$

Для величины U_{on} в [3] приведена приближенная формула

$$U_{on} = 0,62 \cdot (U_{нб} - U_{нм}). \quad (9)$$

где $U_{нб}$ и $U_{нм}$ – наибольшее и наименьшее действующие значения из трех межфазных напряжений основной гармонике.

Для шестиуровневого МАИН в силу высокого качества кривой выходного напряжения в этой формуле вместо действующих значений напряжения основной гармонике можно использовать действующие значения соответствующих межфазных напряжений.

Пусть

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_n}$$

есть допустимое значение стабилизации межфазных напряжений. Здесь U_n – номинальное значение межфазного напряжения, а ΔU – допустимое абсолютное значение отклонения напряжения от номинального.

Тогда в наихудшем случае при раздельной по фазам стабилизации напряжений

$$U_{нб} = U_n + \Delta U_{\max},$$

$$U_{нм} = U_n - \Delta U_{\max},$$

где $\Delta U_{\max} = \delta U \cdot U_n$.

С учетом сделанных допущений из формулы (9) получим

$$U_{on} = 1,24 \delta U U_n.$$

В [3] для коэффициента несимметрии по обратной последовательности приведена приближенная формула

$$K_{2U} = \frac{U_{on}}{U_n} \cdot 100\%.$$

Подставляя сюда максимально допустимое значение коэффициента $K_{2U} = 2\%$ и значение U_{on} из (9), находим для максимально допустимого значения δU

$$\delta U_{\max} = 0,016.$$

Отсюда следует, что максимальное отклонение межфазного напряжения относительного значения не нарушает требования по коэффициенту несимметрии по обратной последовательности, равное 1,6 %, то есть

$$\Delta U \leq 0,016 \cdot U_n.$$

С учетом номинального действующего значения межфазного напряжения, равно 1,224 В, находим, что $\Delta U_{\max} = 0,0196 В$.

Теперь, воспользовавшись формулой (7) и значением производных $\frac{\partial U_{12}}{\partial \lambda_i}$ из таблицы, найдем допустимые погрешности реализации каждого уровня $\Delta \lambda_i$

$$\Delta \lambda_{i,\text{доп}} = \frac{\Delta U_{\max}}{\partial U_{12} / \partial \lambda_i}.$$

Рассчитанные абсолютные значения допустимых погрешностей реализации уровней λ_i и относительные по отношению к номинальным значениям λ_i , рассчитанные по формуле

$$\delta \lambda_{i,\text{доп}} = \frac{\Delta \lambda_{i,\text{доп}}}{\lambda_i} \cdot 100\%,$$

приведены в последних двух столбцах таблицы.

Выводы. 1. Точность реализации уровней напряжений составных шестиуровневых МАИН при применении общих для всех фаз источников не влияет на величину коэффициента несимметрии выходной системы напряжений по обратной последовательности.

2. При применении раздельных для каждой фазы стабилизированных источников для реализации уровней напряжения необходимо обеспечить не более чем 2.5-процентную стабилизацию напряжений 6 и 5 уровней, не более чем 3.5%-ю стабилизацию 3 и 4 уровней.

3. Точность реализации 1 и 2 уровней практически не оказывает влияния на величину коэффициента несимметрии по обратной последовательности.

1. Стабилизация параметров выходного напряжения многоуровневых инверторов / Е.Е. Миргородская, В.А. Колчев, Н.П. Митяшин, Е.Д. Карнаухов // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 70-79.

2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах

электроснабжения общего назначения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 10 с.

3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999.01.01. М.: Изд-во стандартов, 1998. 32 с.

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Колчев Вадим Александрович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фурсаев Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Карнаухов Евгений Дмитриевич – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina E. Mirgorodskaya – PhD, Associate Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim A. Kolchev – Undergraduate, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikita P. Mityashin – Dr.Sc., Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mikhail A. Fursaev – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnics and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Evgeny D. Karnaukhov – Postgraduate, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС УПРОЧНЕНИЯ
ОТВЕРЖДЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ
В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ****И.В. Злобина****EFFECT OF ULTRASOUND ON HARDENING THE CURED CARBON
FIBER-REINFORCED PLASTIC IN THE MICROWAVE
ELECTROMAGNETIC FIELD****I.V. Zlobina**

Выполнены экспериментальные исследования изменения прочностных характеристик образцов из квазиизотропного углепластика после кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии в рабочей зоне $20 \cdot 10^4$ - $17 \cdot 10^4$ мкВт/см², совмещенного с возбуждением в образце продольных ультразвуковых колебаний частотой 22-23 кГц малой амплитуды. Установлено, что совмещенное воздействие высоко- и сверхвысокочастотных волновых процессов вызывает повышение модуля упругости материала на 29 % по сравнению с контрольными образцами, при этом наблюдается увеличение данного параметра по сравнению с СВЧ обработкой без ультразвука на (8-13) %. Наибольший эффект заключается в снижении дисперсий напряжений межслоевого сдвига и модуля упругости в 5-8 раз по сравнению с СВЧ обработкой без ультразвука.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, отверждение, СВЧ электромагнитное поле, плотность потока энергии, ультразвук, волновые процессы, межслоевой сдвиг, прочность, модуль упругости, дисперсия параметров

Experimental studies of changes in the strength characteristics of samples from quasi-isotropic carbon fiber after short-term exposure to microwave electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz with energy flux density in the working area of 20×10^4 - 17×10^4 mW/cm², combined with excitation in the sample of longitudinal ultrasonic vibrations with a frequency of 22-23 kHz of small amplitude. It is found that the combined effect of high- and ultrahigh-frequency wave processes causes an increase in the elastic modulus of the material by 29 % compared to the control samples, while there is an increase in this parameter compared to microwave treatment without ultrasound by (8-13) %. The greatest effect is to reduce the stress dispersion of interlayer shear and modulus of elasticity by 5-8 times compared to microwave treatment without ultrasound.

Keywords: polymer composite materials, curing, microwave electromagnetic field, energy flux density, ultrasound, wave processes, interlayer shear, strength, modulus of elasticity, dispersion of parameters.

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных углеродными, арамидными и стеклянными волокнами, относится к одному из приоритетных направлений совершенствования конструкций различных технических систем, особенно воздушно-космических аппаратов, автомобильного и водного транспорта. Особенно перспективным является применение изделий из углепластиков, изготовленных по различным технологиям. При этом общими особенностями технологических процессов, использующихся в производстве полимерных композиционных материалов (ПКМ), являются синтез армирующих волокон, изготовление из них тканей различного плетения, пропитка связующим, послойная выкладка и формование изделия с последующим отверждением. В связи с высокой прочностью и малым удельным весом применение углепластиков и других ПКМ будет расширяться в ближайшей и отдаленной перспективе [1, 2]. При проектировании и применении изделий из ПКМ необходимо учитывать, что они отличаются высокой анизотропией свойств, в частности, предельные напряжения межслоевого сдвига могут быть в два и более раз меньше, чем при растяжении-сжатии. Это вызывает необходимость проведения конструкторско-технологических мероприятий по повышению прочности изделий из ПКМ [3, 4]. Одним из эффективных путей увеличения прочности изделий из ПКМ и, в частности, углепластиков, технологическими методами является их модифицирование в СВЧ электромагнитном поле. Физические основы модифицирования полимерных материалов на стадии отверждения путем СВЧ диэлектрического нагрева достаточно хорошо изучены и разработаны [5-7]. Получены положительные результаты упрочняющего модифицирования в СВЧ электромагнитном поле окончательно изготовленных изделий из отвержденных угле- и стеклопластиков [8-10]. Тем не менее важность проблемы упрочнения изделий из ПКМ особенно с целью снижения их материалоемкости в связи остающейся

высокой стоимостью качественных углепластиков делает актуальным продолжение исследований в данном направлении и изыскание новых способов повышения эффективности упрочнения.

Известен положительный эффект ультразвука при его воздействии на различные материалы, заключающийся в повышении производительности и качества размерной обработки, высококачественной сварке термопластов, снятии термических напряжений в сложнопрофильных изделиях из термопластов и др. [11]. Отмечено положительное влияние ультразвука на повышение эффективности СВЧ диэлектрического нагрева жидких сред, а именно продуктов питания, за счет ускорения теплообмена и снижения затрат микроволновой энергии примерно на 20 % [12]. Однако эффект взаимодействия высокочастотных (ультразвук) и сверхвысокочастотных (СВЧ электромагнитное поле) волновых процессов не изучен и нуждается в обосновании его практического применения, что можно считать оправданным в силу следующих соображений.

Использование обработки СВЧ электромагнитным полем в сочетании с ультразвуковым силовым воздействием на рациональной подводимой мощности применительно к окончательно изготовленному изделию позволит снивелировать результаты влияния на структуру и прочность материала финишных операций формообразования, повысить стабильность всего технологического процесса вследствие сохранения достаточно сложных, но отработанных химических технологий получения исходных компонентов, управлять прочностью изделий любой конструктивной сложности.

Целью наших исследований явилось получение экспериментальных данных о влиянии ультразвуковых колебаний, сообщаемых изделию в отвержденном состоянии, на его упрочнение в СВЧ электромагнитном поле.

Для осуществления способа использовали технологическую СВЧ установку типа «Жук-2-02» производства ООО «Агро-

ЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.) с частотой излучения 2450 МГц и мощностью магнетрона 1200 Вт и экспериментальный ультразвуковой генератор (рис. 1) мощностью (100-400) Вт, подключенный к пьезокерамическому ультразвуковому преобразователю с расчетной резонансной частотой 22 кГц. Схема генератора позволяла осуществлять путем программирования с ноутбука тонкую регулировку частоты выходного напряжения с шагом 10 Гц в

диапазоне 20-60 кГц. Это позволяло осуществлять настройку в резонанс системы «волновод – углепластиковый образец», имеющей низкую добротность. В преобразователе использована пьезокерамика марки ЦТС-19 диаметром 52 мм. Активная и пассивная накладки выполнены соответственно из титанового сплава ВТ-3-1 и стали 40Х. Длина преобразователя равнялась длине волны ультразвуковых колебаний на данной частоте.



Рис. 1. Ультразвуковой генератор с программируемой частотой выходного напряжения

К активной накладке подсоединяли волновод из алюминиевого сплава Д16Т длиной в половину длины волны (120 мм) и диаметром 20 мм. Перед излучающим рупором установки «Жук-2-02» на волноводе, расположенном вне ближней зоны излучения, закрепляли образцы в виде балок длиной 70 мм и сечением 10×5 мм из квазиизотропного полимерного композиционного материала, армированного углеродными волокнами. Резонансная частота полученной колебательной системы составляла 21300 Гц. Амплитуда колебаний волновода равнялась 10-12 мкм, образца – 2-4 мкм. Осуществляли СВЧ обработку образцов с одновременным воздействием ультразвука и без ультразвука. Плотность потока энергии СВЧ электромагнитного поля регулировали установкой дистанции

между плоскостью раскрытия рупора и поверхностью образца в диапазоне 100-250 мм. Время обработки устанавливали равным 1 и 2 минутам. Проводили испытания обработанных образцов в сравнении с контрольными на межслоевой сдвиг, наиболее часто использующиеся для оценки эксплуатационных характеристик слоистых угле- и стеклопластиков. Использовали установку, оснащенную тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения. Сигналы с датчиков передавались через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) в компьютер. Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки по специальной заложенной в установке программе LabVIEW (г. Орел) позволила получить графики нагрузки (из-

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

гибающего момента) в динамике до разрушения образца. Расстояние между опорами оснастки, на которую устанавливали испытуемый образец, составляло 60 мм. С экрана монитора установки считывали значения нагружающего момента. Измерения останавливали после потери образцом целостности. Предельную нагрузку определяли как среднюю величину по нескольким значениям нагружающего момента согласно полученному графику от момента прекращения стабильного нарастания его величины до момента спада на 15 %. Внутренние напряжения вычисляли по стандартной, принятой в сопротивлении материалов, методике через нагружающую

силу и момент сопротивления поперечного сечения образца-балки. Одновременно измеряли изгибную деформацию образцов и по полученным данным изгибающей нагрузки вычисляли модуль упругости при межслоевом сдвиге. Лучшими показателями считали максимальные разрушающие напряжения и максимальный модуль упругости. Дополнительно оценивали дисперсию указанных параметров в партии из пяти образцов, обрабатываемых при одинаковых условиях.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1 – 3 и на рис. 2.

Таблица 1

Средние значения напряжений межслоевого сдвига σ [Н/мм²] в образцах в зависимости от метода, режимов СВЧ обработки и времени воздействия

Параметр	Контрольный	ППЭ 20x10 ⁴ мкВт/см ²	ППЭ 17x10 ⁴ мкВт/см ²	ППЭ 17x10 ⁴ мкВт/см ² с ультра- звуком
σ , МПа	94,7	174,8	170,4	168,0
$\Delta\sigma$	1	1,85	1,8	1,77

Таблица 2

Средние значения модуля упругости E [Н/мм²] в образцах в зависимости от метода, режимов СВЧ обработки и времени воздействия

Параметр	Контрольный	ППЭ 20x10 ⁴ мкВт/см ²	ППЭ 17x10 ⁴ мкВт/см ²	ППЭ 17x10 ⁴ мкВт/см ² с ультра- звуком
E , ГПа	2,8	3,4	3,2	3,6
ΔE	1	1,2	1,14	1,29

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что ультразвуковое воздействие практически не влияет на напряжения межслоевого сдвига. В целом обеспечивается повышение прочности по сравнению с контрольными образцами на (77 – 85) %. Более значимое отличие можно заметить при рассмотрении модуля упругости при межслоевом сдвиге: при СВЧ обработке с одновременным воздействием ультразвука увеличение данного

параметра составляет 29 %, что на (8 – 13) % превышает эффективность отдельной СВЧ обработки в зависимости от режимов.

Однако основной эффект, достигаемый при совмещенной СВЧ и ультразвуковой обработке заключается в снижении разброса (дисперсии) значений предельных напряжений и модуля упругости при межслоевом сдвиге (табл. 3).

Дисперсии напряжений изгиба и модуля упругости при изгибе контрольных и обработанных образцов

Дисперсия	Контроль-ный	ППЭ 20×10^4 мкВт/см ²	ППЭ 17×10^4 мкВт/см ²	ППЭ 17×10^4 мкВт/см ² с ультразвуком
σ^2	0,04	0,0035	0,0023	0,0004
E^2	0,054	0,0003	0,007	0,0009

Видно, что по сравнению с контрольными образцами дисперсии предельных напряжений и модуля упругости в образцах, подвергнутых СВЧ обработке, снижаются на порядок. Дисперсии указанных параметров в образцах, прошедших совмещенную СВЧ и ультразвуковую обработку снижены еще дополнительно в 5-8 раз.

Внешний вид образцов после испытаний также свидетельствует об изменении характера разрушения после совмещенного воздействия микроволнового излучения и ультразвука. Контрольный образец в процессе деформаций разрушился (рис. 2 а). При этом его предельные напряжения и модуль упругости значительно меньше, чем у обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов.



Рис. 2. Внешний вид образцов из квазиизотропного углепластика: контрольный: $\sigma = 94,7$ МПа, $E = 2823$ МПа (а); ППЭ 20×10^4 мкВт/см², $\sigma = 174,8$ МПа, $E = 3440$ МПа (б); ППЭ 17×10^4 мкВт/см², $\sigma = 170,4$ МПа, $E = 3190$ МПа (в); обработанный с ультразвуком: ППЭ 17×10^4 мкВт/см², $f = 21300$ Гц, $A = 2-4$ мкм, $\sigma = 168,0$ МПа, $E = 3605$ МПа (г)

Образцы, прошедшие обработку (рис. 2 б, в), в процессе испытаний разделяются на продольные слои. При этом они характеризуются большими значениями предельных напряжений и модуля упругости. Но, по-видимому, для них характерно повышение твердости и хрупкости матри-

цы, что и проявляется в расслоении. Образец, прошедший совмещенную ультразвуковую и СВЧ обработку (рис. 2 г), имеет вид в целом сходный с контрольным образцом: сохранена прямолинейность формы и полного расслоения не произошло. При этом наблюдается отмеченное выше

существенное увеличения модуля упругости по сравнению с обычной обработкой в СВЧ электромагнитном поле. По-видимому, высокочастотные волновые механические процессы в матрице способствуют релаксации дополнительных термических напряжений, образованию дополнительных связей с волокнами и сшивок, что сохраняет целостность материала и его упругопластические свойства.

Таким образом, экспериментально установлено, что обработка окончательно сформированных образцов армированного углеродными волокнами полимерного композиционного материала в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц на дистанции при плотности потока энергии $17 \cdot 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут с одно-

временным воздействием ультразвуковых колебаний частотой 21300 Гц и амплитудой 2-4 мкм обеспечивает по сравнению со способами обычной микроволновой обработки увеличение модуля упругости при межслоевом сдвиге на (8-13) % в зависимости от режимов СВЧ воздействия при одновременном снижении дисперсии значений напряжений и модуля упругости в 5-8 раз.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кошкин Р.П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.

2. **Мирный М.** Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (дата последнего обращения 15.10.2018 г.).

3. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // Вестник Российской академии наук, 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.

4. **Злобина И.В.** Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструкционных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

5. **Архангельский Ю. С.** Справочная книга по СВЧ электротермии: справочник / Ю. С. Архангельский. Саратов : Научная книга, 2011. 560 с.

6. **Коломейцев В.А.** Экспериментальные исследования уровня неравномерно-

сти нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы/ 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.

7. **Estel L.** Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications/ 2004. № 11. P. 33.

8. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. P. 25-30.

9. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // Solid State Phenomena. 2016. V. 870, P. 101-106.

10. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multi-level hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / I.V. Zlobina,

N.V. Bekrenev, G.K. Muldasheva, // AIP Publishing, vol. 1783, 10 November 2016, 020236-1 – 020236-4.

11. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

12. Пат. RU № 2355136, МПК H05B6/64. Способ повышения эффективности микроволновых печей.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.11.18, принята к опубликованию 28.11.18

УДК 621.793.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

О.А. Маркелова, А.В. Лясникова

RESEARCH OF ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES OF FORMING COATINGS WITH PREDICTED PORISTITY

O.A. Markelova, A.V. Lyasnikova

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований зависимости структурно-морфологических характеристик и пористости покрытий от технологических режимов плазменного напыления. Показано влияние тока дуги плазматрона на формирование макро- и микропор, а также наноканалов в пористом покрытии.

Ключевые слова: плазменное напыление, электротехнологический процесс, пористое покрытие

The results of complex experimental studies of the dependence of the structural-morphological characteristics and porosity of the coatings on the technological regimes of plasma spraying are presented. The effect of the plasmatron arc current on the formation of macro- and micropores, as well as nanochannels in a porous coating, is shown.

Keywords: plasma spraying, electrotechnological process, porous coating

Развитие современной техники характеризуется применением новых конструкционных материалов и покрытий. Всеоб-

щее признание получила технология плазменного напыления, которая позволяет формировать на различных поверхностях

пористые металлические и неметаллические покрытия [1-3].

Однако к настоящему времени в недостаточной мере изучены режимы нанесения плазмонапыленных покрытий с параметрами пористости, позволяющими импрегнировать их структуру жидкими веществами (смазочными материалами, маслами, эмульсиями, лекарственными веществами и т.д.) с определенной скоростью их высвобождения. Данная функция представляется важной для прецизионных пар трения (золотники, подшипники скольжения) с минимальными зазорами порядка нескольких мкм, не позволяющими гарантированно разместить в них смазочные материалы. Мало изучены закономерности влияния режимов напыления на параметры структуры, обеспечивающие указанные возможности.

С другой стороны, известно, что плазмонапыленное покрытие представлено открытыми и закрытыми порами сложной конфигурации [4, 5], но зависимость распределения пор по размерам, а также количество макро-, микропор и каналов от режимов плазменного напыления изучены недостаточно.

Целью работы является определение технологических режимов электроплазменного напыления, обеспечивающих необходимую пористость формируемого покрытия, в том числе наличие макро-, микропор и каналов.

Образцы для экспериментального исследования изготавливались из титанового сплава марки ВТ16 в виде пластин размерами 10×10×2 мм и цилиндров высотой 10 мм и диаметром 5 мм.

Перед процессом плазменного напыления образцы подвергались очистке в УЗ-ванне ПБС-ГАЛС при частоте 18±2 кГц в водном растворе при температуре 35-40 °С в течение 3 мин и последующей воздушно-абразивной обработке на аппарате АСОЗ 1.2 МЕГА порошком электрокорунда дисперсностью до 300 мкм в течение 5 мин.

Покрытие формировалось методом электроплазменного напыления на полуавтоматической установке УПН-28 из подслоя порошка титана толщиной до 40 мкм и слоя порошка гидроксиапатита толщиной до 50 мкм, технологические параметры процесса приведены в таблице.

Группы образцов и экспериментальные режимы плазменного напыления покрытий

Номера групп образцов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>I</i> титана, А	350								
<i>I</i> гидроксиапатита, А	300	300	300	350	350	350	400	400	400
Дистанция напыления, мм	150	100	50	150	100	50	150	100	50

В качестве транспортирующего и плазмообразующего газов применялся аргон, при расходе 19-20 л/мин и 2-3 л/мин соответственно. Величина напряжения электроплазменной дуги *U* составляла 30±5 В, дисперсность порошка гидроксиапатита 70-90 мкм; дисперсность порошка титана 100-150 мкм.

Измерение морфологии поверхности были проведены с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA 2 LMU, производство фирмы Tescan, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350.

Типичный вид покрытий, полученных при различных токах дуги плазмотрона (при дистанции напыления 50 мм), представлен на рис. 1. Покрытия, сформированные при токе дуги 300 А, представлены округлыми частицами размером до 35 мкм с наличием пор диаметром до 7 мкм. Вследствие малых токов и недостаточной температуры плазменной струи у частиц отмечается расплавление только внешних оболочек и малое проплавление ядра, что и способствует формированию округлых частиц (рис. 1 а).

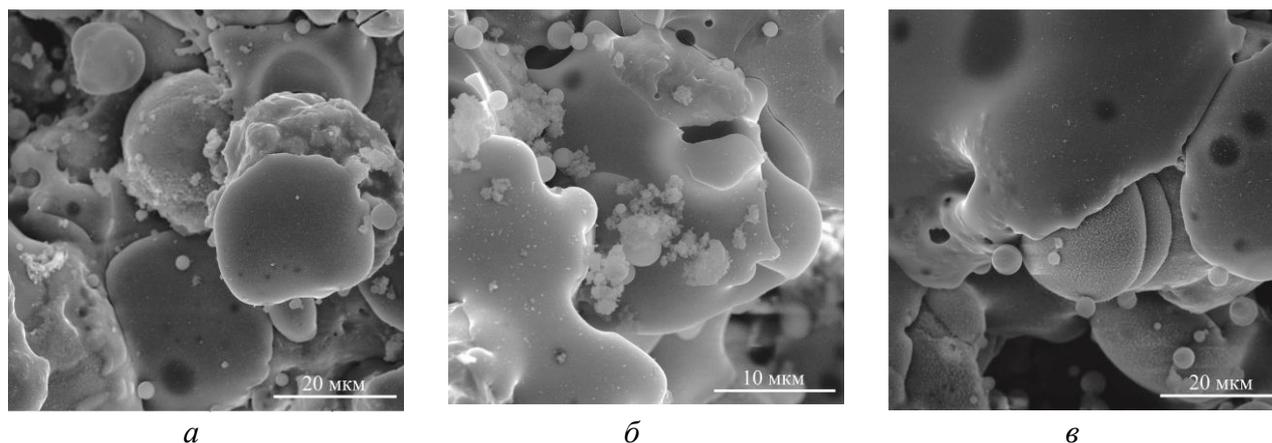


Рис. 1. СЭМ микроскопия образцов с плазмонапыленным покрытием, полученным при различных технологических режимах: *а* – $I = 300$ А; *б* – $I = 350$ А; *в* – $I = 400$ А

Покрытие, сформированное при токе дуги плазмотрона 350 А, характеризуется наличием множества мелких частиц сложной округлой с игольчатыми краями формы размером 5-10 мкм (рис. 1 *б*), что связано с более медленным затвердеванием и охлаждением частиц порошка, разогретых до температуры плавления.

В покрытиях, сформированных при токе дуги 400 А, прослеживается плотная упаковка частиц между собой в следствие

высокого нагрева и полного проплавления, размер отдельных образований до 50 мкм. При этом в покрытии обнаруживаются поры размерами 1-5 мкм (рис. 1 *в*).

Для контроля размеров микро- и нанопор и каналов использовался анализатор для определения площади удельной поверхности NOVA2000е.

На рис. 2 показана зависимость общей пористости покрытия от тока дуги и дистанции напыления.

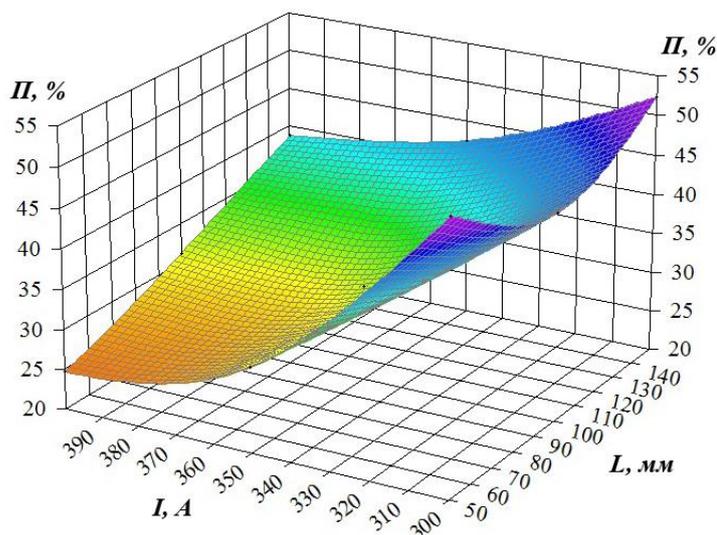


Рис. 2. Зависимость общей пористости (Π) плазмонапыленного покрытия от тока дуги I и дистанции напыления L

Основываясь на полученных экспериментальных данных и используя основные положения теории статистической обработки данных, выведем уравнения для

определения необходимого тока дуги плазмотрона в зависимости от заданных значений общей пористости покрытия при фиксированной дистанции напыления (1):

$$I = 3571,93 - 1373,27 \ln L - \frac{33210,9}{\Pi} + 137,275(\ln L)^2 + \frac{108285,21}{\Pi^2} + \frac{7981,19 \ln L}{\Pi} \quad (1)$$

где I – ток дуги плазмотрона, А; Π – общая пористость, %; L – дистанция напыления порошка, мкм.

При фиксированной дистанции напыления и увеличении тока дуги относитель-

ное количество пор, имеющих диаметр менее 2 мкм, возрастает в среднем в пять раз (рис. 3). Данный факт можно объяснить перегревом напыляемых частиц и растрескиванием их при остывании и затвердевании, благодаря чему в частице формируются микропоры, которые из-за хаотического появления трещин в большинстве случаев связаны между собой.

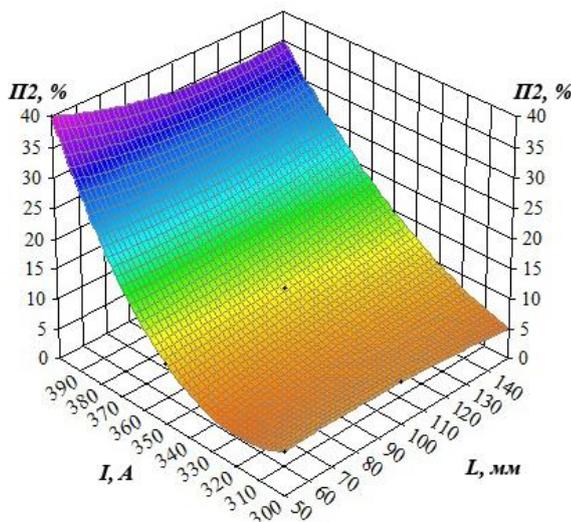


Рис. 3. Зависимость относительного количества пор электроплазменного покрытия диаметром менее 2 мкм (Π_2) от тока дуги I при различных дистанциях напыления L

Относительное количество пор электроплазменного покрытия диаметром 3-40 мкм изменяется не линейно (рис. 4). Так, своего максимума оно достигает при токе 350 А (около 50 %), а при токе 400 А снижается до значений 45 %. Данное явление связано со скоростью остывания

частиц в процессе транспортировки их на подложку и степень прогрева частиц в плазменной струе. При токе дуги 300 А показатель пористости принимает экстремальные значения, что может критически сказаться на прочности плазмонапыленных покрытий.

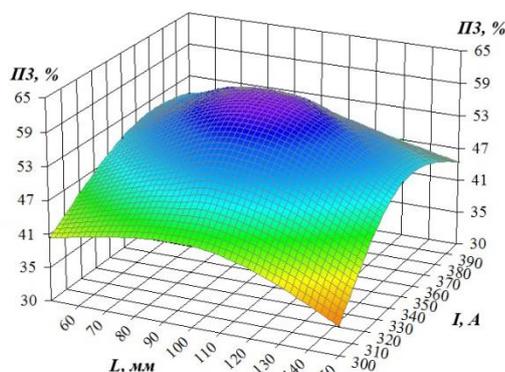


Рис. 4. Зависимость относительного количества пор электроплазменного покрытия диаметром 3-40 мкм (Π_3) от тока дуги I при различных дистанциях напыления L

Тенденцию к уменьшению относительного количества пор диаметром более 40 мкм при увеличении тока дуги проявляют все типы покрытий, полученные при различ-

ных дистанциях напыления (рис. 5), что связано с полным проплавлением частиц и их перегревом в процессе напыления.

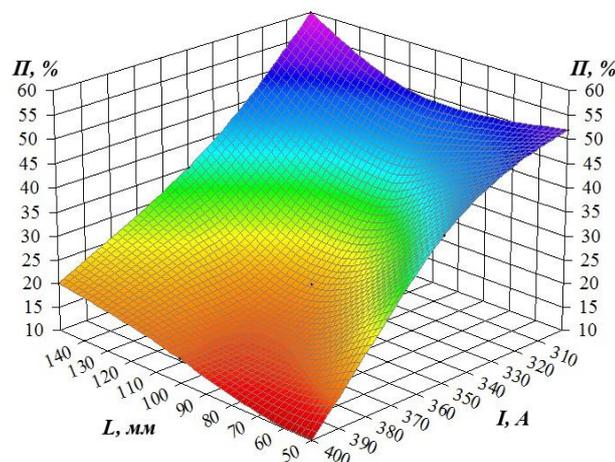


Рис. 5. Зависимость относительного количества пор электроплазменного покрытия диаметром более 40 мкм (P) от тока дуги (I) при различных дистанциях напыления (L)

Покрытия, полученные при различных режимах плазменного напыления, имеют в своем составе открытые и макропоры, формирование которых происходит преимущественно при малых токах дуги (300 А). Также имеются мезо- и микропоры, образованные внутри частиц, уходящие в глубину покрытия и формируемые преимущественно при высоких значениях тока дуги (400 А). Среднюю пористость показывают покрытия, полученные при токе дуги 350 А. Такие покрытия имеют

в своем составе как макропоры (до 50 %), так и микро- и нанопоры (до 15 %). Таким образом, изменяя режимы электроплазменного напыления, в частности ток дуги и дистанцию напыления, можно добиться формирования покрытия, обладающего прогнозируемым значением пористости, в том числе наличием макро-, микро-, нанопор и каналов. Полученное покрытие может быть использовано как емкость для хранения жидких веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vardelle A.** A Perspective on Plasma Spray Technology / A. Vardelle, C. Moreau, N.J. Themelis, C. Chazelas // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. Vol. 35. Iss. 3. P. 491-509.
2. **Fauchais P.L.** Thermal Spray Fundamentals / P.L. Fauchais, V.R. Heberlein, M.I. Boulos. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2014. XXVIII. 1566 p.
3. **Ruzbarsky J.** Plasma and Thermal Spraying / J. Ruzbarsky, A. Panda.

- Springer, 2017. 110 p.
4. **Лясников В.Н.** Плазменное напыление: монография / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. 624 с.
5. **Lyasnikova A.V.** Mathematical Modeling of Stress in Plasma Coatings Used in Medicine / A.V. Lyasnikova, V.M. Taran, O.A. Markelova, O.A. Dudareva, I.P. Grishina // Biomedical Engineering, 2013. Vol. 47. No 3. P. 142-145.

Маркелова Ольга Анатольевна – ассистент кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Лясникова Александра Владимировна – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga A. Markelova – Assistant Lecturer, Department of Material Physics and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexandra V. Lyasnikova – Dr.Sc., Associate Professor, Head: Department of Material Physics and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.11.18, принята к опубликованию 28.11.18



ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 620.179.14

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ФЕРРОМОДУЛЯЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В.С. Безкорвайный, О.В. Тарасенко, В.В. Яковенко, Ю.В. Креселюк

MATHEMATICAL MODELING OF SOLITON PERTURBATIONS OF THE CORE OF A CHARGED DISLOCATION IN n-TYPE SEMICONDUCTOR

V. S. Beskorovainy, O.V. Tarasenko, V.V. Yakovenko, Yu.V. Kreselyuk

Предложен и численно реализован метод оптимизации длины сердечников феррозондов при измерении магнитных полей индуцированных намагниченными ферромагнитными телами при различном расстоянии между источниками помех и феррозондом. Метод основан на применении модифицированной теоремы К.М. Поливанова о взаимности, на основании которой производится расчёт разности магнитного поля в сердечниках феррозонда, индуцированного источником.

Ключевые слова: феррозонд, сердечник, ферромагнитное поле, магнитная система, магнитный потенциал, теорема о взаимности, оптимизация

Магнитные датчики на основе феррозондов применяются при неразрушающем контроле ферромагнитных изделий для обнаружения дефектов несплошности, в коэрцитиметрах, в устройстве контроля намагниченности деталей, в измерительных преобразователях устройств контроля частоты вращения зубчатых колес, в устройствах определения целостности деталей трансмиссии, в приборах обнаруже-

A method for optimizing the length of cores of flux-probes in measuring magnetic fields has been proposed and implemented numerically. The method is based on the use of the modified K.M. Polivanov reciprocity theorem, on basis of which the calculation of the magnetic field difference in the core of the fluxgate, the induced source.

Keywords: ferroprobe, core, ferromagnetic field, magnetic system, magnetic potential, reciprocity theorem, optimization.

ния ферромагнитных тел и включений в немагнитных средах и т.п. [1, 2].

Характерным для всех магнитных датчиков является то, что они состоят из магниточувствительного измерительного преобразователя, которым является ферромодуляционный преобразователь, и источника магнитного поля, которым является намагниченное ферромагнитное тело или его локальный участок. Магнитные

ИЗМЕРЕНИЯ

поля рассеяния при этом являются существенно неоднородными. Обычно в практике магнитного контроля полагается, что ферромодуляционный датчик (феррозонд) измеряет магнитное поле в «точке» пространства или рассчитывается среднее значение напряженности по длине сердечника. При этом не учитываются соотношения геометрических размеров магнитной системы датчика, источника магнитного поля и расстояния между ними, что не позволяет определить оптимальные размеры датчика по критерию максимальной чувствительности. В настоящей работе предлагается метод, позволяющий определить напряженность в сердечниках датчика, индуцированную намагниченным ферромагнитным телом, с учетом геометрических параметров магнитной системы

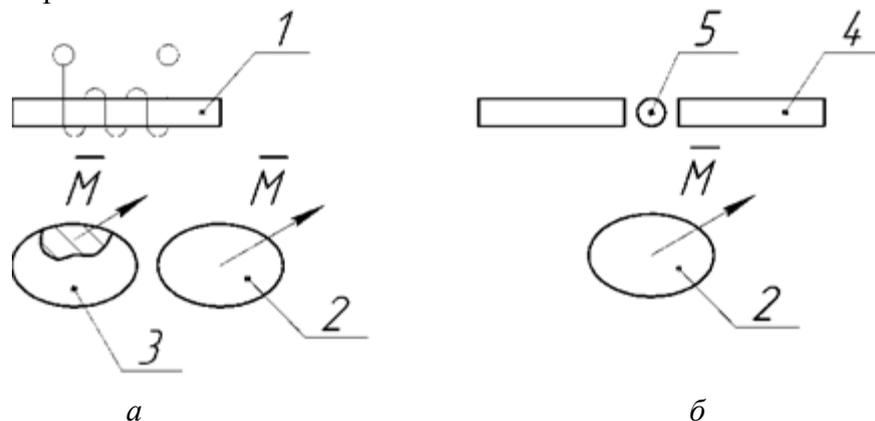


Рис. 1. Магнитная система датчика: *а* – без дополнительного магнитопровода, *б* – с дополнительным магнитопроводом; 1 – полуэлемент феррозонда; 2 – ФТ; 3 – ФТ с локально намагниченным участком; 4 – дополнительный магнитопровод (концентратор); 5 – феррозонд

На рис. 1 *а* приведена схема магнитной системы датчика, которая содержит полуэлемент феррозонда 1, намагниченное ФТ 2 или ФТ с локально намагниченным участком 3. Магнитная система датчика с дополнительным магнитопроводом приведена на рис. 1 *б*. Между двумя ферромагнитными стержнями 4 расположен магниточувствительный элемент 5, которым может быть или феррозонд или датчик Холла. Датчик с такой магнитной системой используется в приборах обнаружения ферромагнитных тел в немагнитных средах. Дополнительный магнитопровод может иметь различную геометрическую

датчика, геометрических размеров ферромагнитного тела и его намагниченности, их взаимного положения в пространстве. Предлагаемый метод основан на теореме о взаимности К.М. Поливанова [1] при некоторой её модификации.

Целью работы является разработка метода расчета магнитной напряженности в сердечниках датчика, индуцированной полностью или частично намагниченным ФТ при различном размещении датчика и источника магнитного поля в пространстве.

Магнитная система датчика и его математическая модель. Упрощенная схема магнитной системы датчика, поясняющая принцип его действия, показана на рис. 1.

форму, в том числе и кольцевую форму с разрезом.

Анализ магнитной системы датчика производится для предельно упрощенной её конструкции, состоящей из одного стержня прямоугольного сечения и ФТ, представляющего собой параллелепипед (рис. 2).

Расчет магнитного поля производится путем использования теоремы о взаимности [3], которая выражается формулой для расчета магнитного потока в сердечнике датчика

$$\Phi = \frac{\mu_0}{i\omega} \int \bar{H} \bar{M} dV, \quad (1)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля, создаваемая обмоткой с током $i\omega$, расположенной на сердечнике полуэлемента; \vec{M} – вектор намагниченности в объеме ФТ; V – объем ФТ.

Для расчета напряженности магнитного поля в сердечниках датчика H_ϕ можно использовать следующее соотношение:

$$H_\phi = \frac{1}{M'_n V_\phi} \int \vec{H} \vec{M} dV. \quad (2)$$

Здесь V_ϕ – объем сердечника датчика; \vec{H}' – вектор напряженности поля, созда-

ваемый сердечником, имеющего намагниченность \vec{M} .

Формулу (2) можно преобразовать к следующему виду:

$$H_\phi = \frac{1}{M'_n V_\phi} \iiint \phi' M_n dS, \quad (3)$$

где ϕ' – скалярный магнитный потенциал поля, создаваемый сердечником; M_n – нормальная составляющая вектора намагниченности на поверхности ФТ; M'_n – нормальная составляющая вектора намагниченности феррозонда.

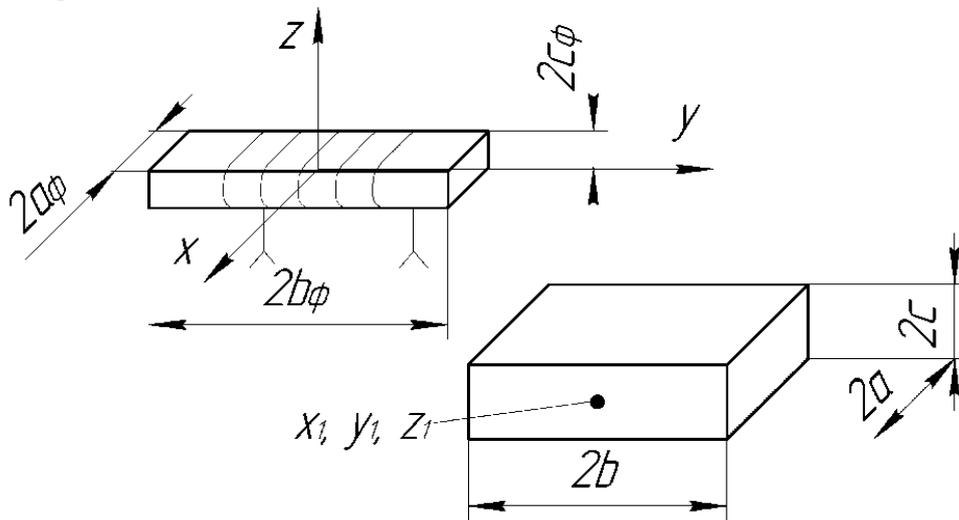


Рис. 2. Упрощенная конструкция датчика

Формула (3) упрощает расчет, так как выполняются операции со скалярными функциями. Для расчета скалярного потенциала,

создаваемого сердечником с обмоткой, используется формула [4], которая получена путем аппроксимации поля сердечника:

$$\begin{aligned} \phi' = \frac{\mu_\phi \cdot i\omega \cdot b_\phi \cdot M'_n}{4\pi \cdot c_\phi} \left[\ln \frac{x - a_\phi + \sqrt{(x - a_\phi)^2 + (y - b_\phi)^2 + (z - 0,15c_\phi)^2}}{x + a_\phi + \sqrt{(x + a_\phi)^2 + (y - b_\phi)^2 + (z - 0,15c_\phi)^2}} - \right. \\ \left. - \ln \frac{x - a_\phi + \sqrt{(x - a_\phi)^2 + (y + b_\phi)^2 + (z - 0,15c_\phi)^2}}{x + a_\phi + \sqrt{(x + a_\phi)^2 + (y - b_\phi)^2 + (z - 0,15c_\phi)^2}} \right] = \frac{\mu_\phi \cdot i\omega \cdot b_\phi \cdot M'_n}{4\pi \cdot c_\phi} F, \end{aligned} \quad (4)$$

где i – ток в обмотке феррозонда; w – количество витков; μ_ϕ – магнитная проницаемость сердечника феррозонда.

Формулу (3) можно переписать так:

$$H = \frac{1}{\mu_\phi i\omega S_\phi} \iiint \phi' M_n dS,$$

или с учетом (1), (3) и (4)

$$H = \iiint FM_n dS \quad (5)$$

Согласно обозначениям, приведенным на рис. 1, расчет напряженности магнитного поля, индуцированного в сердечнике феррозонда, рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 H = & \frac{b_\phi}{4\pi \cdot c_\phi \cdot S_\phi} \left[\int_{z_0-c}^{z_0+c} \int_{x_0+a}^{x_0+a} \ln \frac{x-a_\phi + \sqrt{(x-a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi-b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}}{x+a_\phi + \sqrt{(x+a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi-b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}} dx dz - \right. \\
 & - \int_{z_0-c}^{z_0+c} \int_{x_0+a}^{x_0+a} \ln \frac{x-a_\phi + \sqrt{(x-a_\phi)^2 + (y_0+b_\phi-b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}}{x+a_\phi + \sqrt{(x+a_\phi)^2 + (y_0+b_\phi-b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}} dx dz - \\
 & - \int_{z_0-c}^{z_0+c} \int_{x_0+a}^{x_0+a} \ln \frac{x-a_\phi + \sqrt{(x-a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi+b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}}{x+a_\phi + \sqrt{(x+a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi+b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}} dx dz + \\
 & \left. + \int_{z_0-c}^{z_0+c} \int_{x_0+a}^{x_0+a} \ln \frac{x-a_\phi + \sqrt{(x-a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi+b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}}{x+a_\phi + \sqrt{(x+a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi+b)^2 + (z-0,15c_\phi)^2}} dx dz \right] M(x, y, z).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Упрощенный вариант при малых значениях $4ac$ имеет вид

$$\begin{aligned}
 H = & \frac{b_\phi}{4\pi \cdot c_\phi \cdot S_\phi} \left[\ln \frac{x_0-a_\phi + \sqrt{(x_0-a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi-b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}}{x_0+a_\phi + \sqrt{(x_0+a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi-b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}} 4ac - \right. \\
 & - \ln \frac{x_0-a_\phi + \sqrt{(x_0-a_\phi)^2 + (y_0+b_\phi-b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}}{x_0+a_\phi + \sqrt{(x_0+a_\phi)^2 + (y_0+b_\phi-b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}} 4ac - \\
 & - \ln \frac{x_0-a_\phi + \sqrt{(x_0-a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi+b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}}{x_0+a_\phi + \sqrt{(x_0+a_\phi)^2 + (y_0-b_\phi+b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}} 4ac + \\
 & \left. + \ln \frac{x_0-a_\phi + \sqrt{(x_0-a_\phi)^2 + (y_0+b_\phi+b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}}{x_0+a_\phi + \sqrt{(x_0+a_\phi)^2 + (y_0+b_\phi+b)^2 + (z_0-0,15c_\phi)^2}} 4ac \right],
 \end{aligned} \tag{7}$$

или

$$H = \int_{-c}^c \int_{-a}^a F_1 M_n dx dz + \int_{-c}^c \int_{-a}^a F_2 M_n dx dz, \tag{8}$$

где

$$\begin{aligned}
 F_{1,(2)} = & \frac{b_\phi}{4\pi \cdot c_\phi \cdot S_\phi} \left[\ln \frac{x-x_1-a_\phi + \sqrt{(x-x_1-a_\phi)^2 + (y-y_1-b_\phi \mp b)^2 + (z-z_1-c_\phi)^2}}{x+x_1+a_\phi + \sqrt{(x-x_1+a_\phi)^2 + (y-y_1-b_\phi \mp b)^2 + (z-z_1-c_\phi)^2}} - \right. \\
 & - \ln \frac{x-x_1-a_\phi + \sqrt{(x-x_1-a_\phi)^2 + (y-y_1+b_\phi \mp b)^2 + (z-z_1-c_\phi)^2}}{x+x_1+a_\phi + \sqrt{(x-x_1+a_\phi)^2 + (y-y_1+b_\phi \mp b)^2 + (z-z_1-c_\phi)^2}}
 \end{aligned}$$

Математически зависимость (8) позволяет произвести расчет напряженности магнитного поля в стержневом сердечнике феррозонда при любой намагниченной конфигурации ФТ.

Что касается величины M_n , то она определяется следующим образом.

Магнитное поле, создаваемое ФТ, имеет место при остаточной намагниченности ФТ, созданной внешним источником поля, за счет приложенного поля Земли или приложенного поля внешнего источника. Магнитное поле ФТ описывается следующими соотношениями:

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0; \operatorname{rot} \bar{H} = 0; M = (\mu - 1)H, \\ M \approx \mu H.$$

В приложенном поле зависимость между нормальной составляющей намагниченности и напряженностью внешнего поля считается равной

$$M = (\mu - 1)H_0 \approx \mu H_0, \quad (9)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника; H_0 – напряженность магнитного поля.

Для остаточного поля используется следующая аппроксимация «спинки» кривой намагничиваемости:

$$M_n = M_r + \mu_p H, \quad (10)$$

$$H_n = -\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -\frac{1}{4\pi} \iint M_n \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_P - \bar{R}_Q|} \right) dS - \frac{M_n}{2} \quad (12)$$

Для приложенного поля (5) преобразуется в следующее интегральное уравнение

$$\frac{1}{\mu} M_n(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \iint M_n(P) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_P - \bar{R}_Q|} \right) dS' = 2H_{on}(Q), \quad (13)$$

где $\lambda = \frac{\mu}{\mu + 2}$.

Для остаточной намагниченности

$$M_n(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \iint M_n(P) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_P - \bar{R}_Q|} \right) dS' = \frac{2\lambda}{\mu} M_{on}. \quad (14)$$

В прямоугольной системе координат уравнения (13) и (14) имеют вид

$$\frac{1}{\mu} M_n(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \iint M_n \left[n_x \frac{(x_Q - x_P)dS}{R_{PQ}^{3/2}} + n_y \frac{(y_Q - y_P)dS}{R_{PQ}^{3/2}} + n_z \frac{(z_Q - z_P)dS}{R_{PQ}^{3/2}} + \frac{2\pi}{S} \right] = 2H_{n0}(Q), \quad (15)$$

здесь n_x, n_y, n_z – проекции единичного вектора нормали к поверхности S .

здесь M_r – обратная магнитная проницаемость.

Поскольку полагается, что в объеме ФТ $\operatorname{div} \bar{M} = 0$, можно записать

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \iint M_n \frac{dS}{|\bar{R}_P - \bar{R}_Q|} \quad (11)$$

где \bar{R}_P, \bar{R}_Q – векторы точек источника и точек намагниченности; φ – потенциал магнитного поля.

Для нормальной составляющей напряженности магнитного поля можно записать [5]

Фредгольма второго рода:

Слагаемое $\frac{2\pi}{S}$ под знак интеграла введено для улучшения сходимости решения системы линейных уравнений [5].

$$M_n(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \oint M_n \left[n_x \frac{(x_Q - x_P)dS}{R_{PQ}^{3/2}} + n_y \frac{(y_Q - y_P)dS}{R_{PQ}^{3/2}} + n_z \frac{(z_Q - z_P)dS}{R_{PQ}^{3/2}} + \frac{2\pi}{S} \right] dS + \frac{2\lambda}{\mu_p} M_{0n}, \quad (16)$$

где n_x, n_y, n_z – проекции единичного вектора нормали к S .

Уравнения (15), (16) решаются численным методом, для чего поверхность ФТ разбивается на прямоугольные элементы, в пределах которых полагается, что $M_{ni} = \text{const}$, интегральные уравнения (15), (16) редуцируются к системе линейных уравнений

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\mu} [1][M_n] \right\} = 2[H_{0n}], \quad (17)$$

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\lambda} [1][M_n] \right\} = \frac{2}{\mu_r} [M_{0n}]. \quad (18)$$

где $[1]$ – единичная матрица; $[A]$ – матрица коэффициентов, полученных путем интегрирования ядра интегрального уравнения по элементарным площадкам; $[M_n]$ – вектор значения намагниченности; $[H_{0n}]$ – вектор нормальных составляющих напряженности стороннего поля; $[M_{0n}]$ – вектор нормальных составляющих начальной намагниченности.

Результаты численного эксперимента. Целью эксперимента являлось определение оптимальных результатов стержневого сердечника феррозонда по критерию получения максимального значения сигнала при заданных размерах ФТ и расстоянии между ФТ и феррозондом.

При численном эксперименте задавались следующие численные значения геометрических параметров стержневого феррозонда: $2a_\phi = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $2b_\phi = 2 \dots 40 \cdot 10^{-3}$ м; $2a = 5 \cdot 10^{-3}, 20 \cdot 10^{-3}$ м; $2b = 0, 2 \cdot 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-3}, 10 \cdot 10^{-3}, 50 \cdot 10^{-3}$ м;

$2c = 1 \cdot 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-3}, 10 \cdot 10^{-3}$ м; $x_0 = 0$, $y_0 = 0, 1 \cdot 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-3} \dots 50 \cdot 10^{-3}$ м; $c_0 = c + h$ м; $h = 1 \cdot 10^{-3}, 3 \cdot 10^{-3} \dots 15 \cdot 10^{-3}$ м; $M_n = 1$ А/м.

На рис. 3 приведена зависимость напряженности магнитного поля в сердечнике феррозонда при разной длине сердечника феррозонда и различных значениях расстояния до ФТ. На графике видны максимумы напряженности при $2b_\phi = 4 \cdot 10^{-3}$. При увеличении расстояния этот максимумы сглаживаются и смещаются в сторону больших значений $2b_\phi$. Таким образом, существует оптимальная длина сердечников феррозондов, которая зависит от размеров ФТ и расстояния между феррозондом и ФТ.

Значение оптимального значения величины $2b_\phi$ от других геометрических параметров измерительной системы иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 4, 5.

Зависимости напряженности поля в сердечнике феррозонда от параметров магнитной системы, от длины сердечников $2b_\phi$ имеют четко выраженные две области. Резкое увеличение напряженности до максимального значения объясняется увеличением магнитной проницаемости формы сердечника с увеличением его длины. После достижения максимума происходит уменьшение напряженности, поскольку торцы сердечника удаляются от ФТ. С увеличением расстояния между сердечником и ФТ происходит сглаживание этого эффекта поскольку поле теряет свою неоднородность.

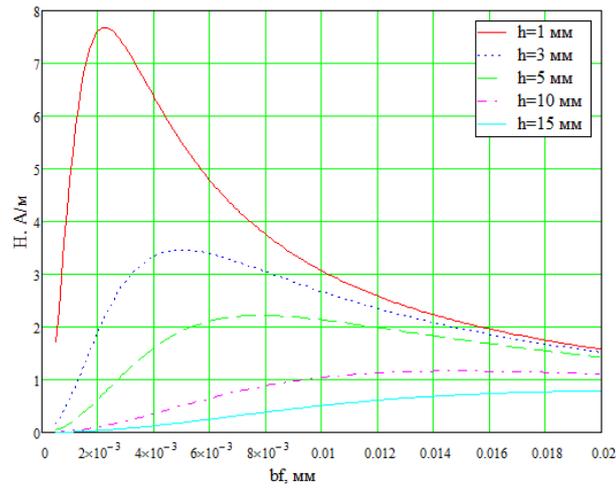


Рис. 3. Зависимость напряженности магнитного поля в сердечнике феррозонда от параметров c_0 , $2b_\phi$

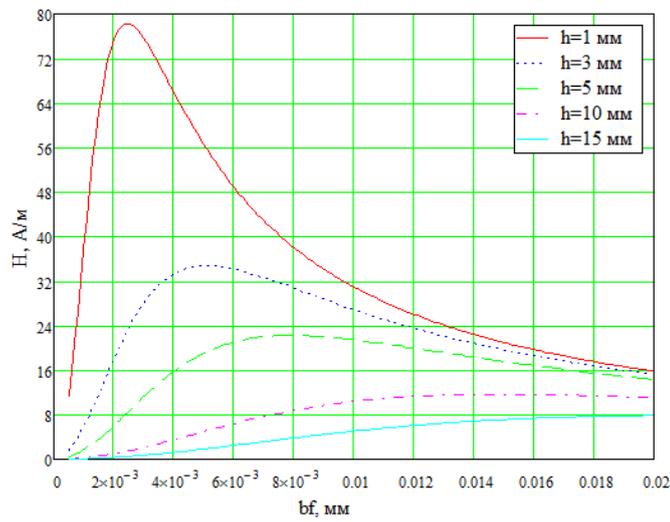


Рис. 4. Зависимость напряженности поля в сердечнике от параметров $2b_\phi$, $2b$, $2c$

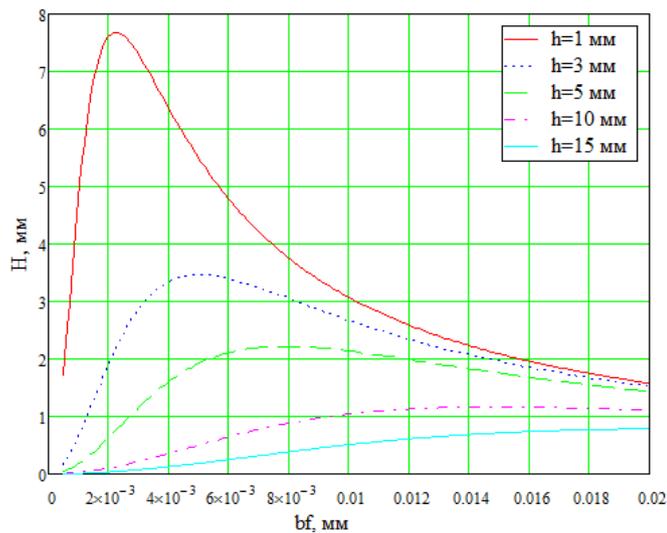


Рис. 5. Зависимость напряженности поля в сердечнике от параметров $2b_\phi$, $2b$, $2c$

Итак, существует оптимальная величина длины сердечников феррозонда по критерию максимального значения напряженности магнитного поля в сердечнике, индуцированного намагничен-

ным ФТ. Разработан метод определения оптимального значения длины сердечников по заданным геометрическим параметрам ФТ и его расстояния до феррозонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быльчинко Ф.С.** Обнаружение феррочастиц в оболочках тепловыделяющих элементов атомных реакторов / Ф.С. Быльчинко, В.И. Васильев, Б.В. Гуменюк // Дефектоскопия. 1980. № 5. С. 19-21.

2. **Веденеев В.Н.** Устройство для обнаружения и удаления твердосплавных ферромагнитных включений в стружке титановых сплавов / В.Н. Веденеев, В.И. Дрожжина, П.Ф. Михайлов, С.В. Понедилко, С.М. Усов // Дефектоскопия. 1982. № 10. С. 58-59.

3. **Поливанов К. М.** Теоретические основы электротехники. Ч. 3 / К. М. Поливанов. М.: Энергия, 1975. 120 с.

4. **Безкорвайный В. С.** Математическое моделирование измерительного тракта дефект-феррозонд / В. С. Безкорвайный, В. В. Яковенко, С. Н. Швец // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. 2015. № 1 [29]. С. 231-256.

5. **Запорожец Ю.М.** Исследование распределения источников поля в плоской системе постоянных магнитов методом интегральных уравнений / Ю.М. Запорожец // Электромеханика. 1979. № 8. С. 683-689.

Безкорвайный Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Луганского национального университета им. В. Даля

Тарасенко Олег Владимирович – кандидат технических наук, декан факультета электротехнических систем Луганского национального университета имени В. Даля

Яковенко Валерий Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики, Луганского национального университета имени В. Даля

Креселюк Юрий Владимирович – аспирант Луганского национального университета имени В. Даля

Vladimir S. Beskorovainy – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Lugansk National University named after V. Dahl

Oleg V. Tarasenko – PhD, Dean: Faculty of Electrotechnical Systems, Lugansk National University named after V. Dahl

Valery V. Yakovenko – Dr.Sc., Head: Department of Electrical Engineering, Lugansk National University named after V. Dahl

Yuri V. Kreselyuk – Department of Electrical Engineering, Lugansk National University named after V. Dahl

Статья поступила в редакцию 27.10.18, принята к опубликованию 28.11.18

ЛЕТОПИСЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ЖУРНАЛУ «ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ» – ПЯТЬ ЛЕТ

Ю. С. Архангельский

С предложением учредить в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. научно-технический журнал по электротехнологии автор этих строк обратился к ректору СГТУ осенью 2012 г.

Электротехнологические процессы и реализующие их установки весьма востребованы на предприятиях Саратова и региона. В 1992 г. в СГТУ была открыта выпускающая кафедра и начата подготовка электротехнологов, с 1968 г. в вузе ведутся научные исследования в области СВЧ диэлектрического нагрева (СВЧ электротехнологии). В 2006 г. на первом конкурсе российских научных школ межкафедральная, межфакультетская научная школа СГТУ имени Гагарина Ю.А., ведущая исследования в области СВЧ электротехнологии, была признана ведущей научной

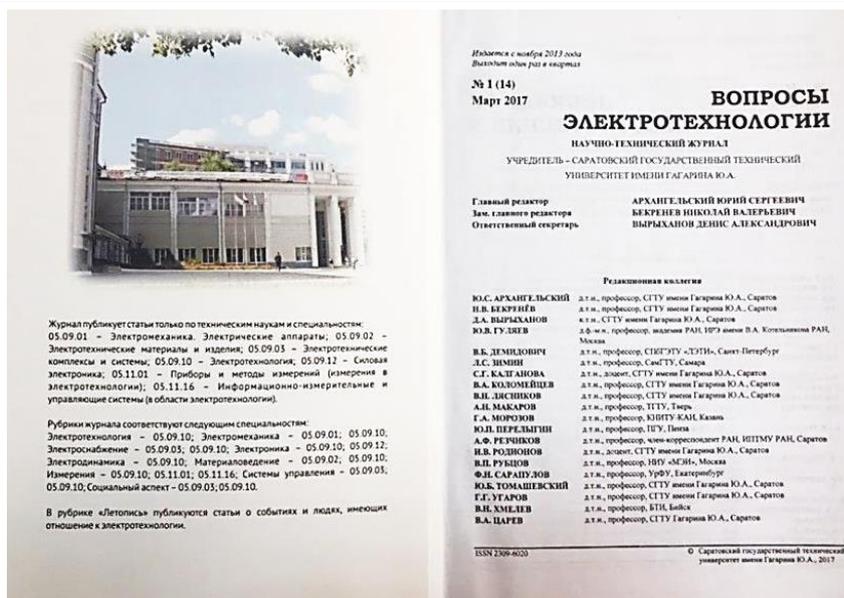
школой России в области инженерных и технических наук (НШ 9553.2006.8). В вузе идет подготовка бакалавров, магистров, специалистов в смежных с электротехнологией областях науки и техники, таких как электроника, электродинамика тепло-массообмена, электроэнергетика, системы управления, электросварка, электрохимические и электрофизические электротехнологические процессы, материаловедение и др. В диссертационных советах университета проводятся защиты профильных кандидатских и докторских диссертаций.

Журнал был создан по приказу ректора СГТУ имени Гагарина Ю.А. д.и.н., профессора И.Р. Плева № 399П от 15.05.13. Организация журнала оказалась делом непростым, и первый номер журнала вышел в свет в декабре 2013 г.



С тех пор очередные номера журнала выходили в свет каждый квартал, и за прошедшие пять лет вышли в свет 20 но-

меров журнала. В номерах с № 1 (1) за 2013 г. по № 2 (7) за 2015 г. статьи распределялись по рубрикам: электротермия,



Теперь журнал принимает к опубликованию статьи только по техническим наукам и специальностям: 05.09.01 – Электромеханика. Электрические аппараты; 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия; 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы; 05.09.10 – Электротехнология; 05.09.12 – Силовая электроника; 05.11.01 – Приборы и методы измерения (измерение в электротехнологии); 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в области электротехнологии).

Рубрики журнала соответствуют следующим специальностям: Электротехнология – 05.09.10; Электромеханика – 05.09.01; 05.09.10; Электроснабжение – 05.09.03; 05.09.10; Электроника – 05.09.10; 05.09.12; Электродинамика – 05.09.10; Материаловедение – 05.09.02; 05.09.10; Измерения – 05.09.10; 05.11.01; 05.11.16; Системы управления – 05.09.03; 05.09.10; Социальный аспект – 05.09.03; 05.09.10.

В марте 2018 г. журнал «Вопросы электротехнологии» включен в перечень ведущих рецензируемых научно-технических журналов, рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией. Об этом указывается, начиная с № 1 (18) за 2018 г., на титульных страницах очередных номеров журнала.

По электротехнологии опубликовано 40,2 % статей, поступивших в журнал, по электромеханике – 10,4 %, по электроснабжению – 9,3 %, по электронике – 5,8 %, по электродинамике – 4,4 %, по системам управления – 3,8 %, по материаловедению – 6,4 %, по измерениям – 2,2 %, по социальному аспекту – 4,4 %, под рубрикой «Летопись» опубликовано 13,1 % статей.

Авторы статей – научные сотрудники Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН и его Саратовского филиала, Саратовского научного центра РАН, сотрудники предприятий Москвы, Подмосковья, Санкт-Петербурга, Самары, Саратова, Фрязино, преподаватели, студенты, аспиранты Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. с филиалом в г. Энгельсе, Самарского государственного технического университета с филиалом в г. Сызрани, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета («ЛЭТИ»), Национального исследовательского университета («МЭИ»), Национального исследовательского ядерного университета («МИФИ»), Казанского национального исследовательского университета им. А.Н. Туполева (КАИ), Уральского федерального университета, Новосибирского государственного

технического университета, Российского университета транспорта, Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Саратовского аграрного университета им. Н.И. Вавилова, Курганского государственного университета, Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, Саратовского государственного медицинского университета им. В.И. Разумовского, Тамбовского государственного технического университета, Пензенского государственного университета, Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета, Донбасского государственного технического университета, Тольяттинского государственного университета, Филиала ВУЦ ВСС «Военно-воздушная академия им. профессора В.Н. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Сызрань).

По научно-техническому содержанию статьи, опубликованные в журнале, самые разные. Принимая во внимание количество статей, можно, пожалуй, выделить следующие темы: СВЧ, плазменные, ультразвуковые, индукционные, электродуговые, электрохимические, электротехнологические процессы и установки, математическое моделирование электротехнологических процессов, электропривод и системы диагностирования работоспособности систем на его основе, автономное электроснабжение, системы электроснабжения электротехнологических установок, технология изготовления катодов СВЧ электровакуумных приборов, полевые и инженерные решения в СВЧ электродинамике, самосогласованные краевые задачи в СВЧ электротехнологии, системы управления электротехнических комплексов, материаловедческий и социальный аспекты электротехнологии, измерения в СВЧ электротехнологии.

Выходит с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (18)
Март 2018

**ВОПРОСЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией

Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕН ВНИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ТРИГОЛЬНЫЙ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ д.т.н., профессор, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов	Л.С. БЕРНГЕЙМ д.т.н., профессор, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.С. ГУЗЬВ д.б.м.н., профессор, в.д.и.и.и. РАН, ИРЭ имени П.А. Элеонидова РАН, Москва	В.В. ДЕМЦОВИЧ д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара	С.Г. КАМАНОВА д.т.н., доцент, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЗЛОВИЧ д.т.н., профессор, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов	В.В. ЛЕВИН д.т.н., профессор, ИТУ, Ижевск
А.В. МАКАРОВ д.т.н., профессор, КНИТУ – КИИ, Казань	Г.А. МОРОЗОВ д.т.н., профессор, ИТУ, Пенза
Ю.С. ПЕРЕКРЫТОВ д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИИТМУ РАН, Саратов	А.В. РЕЗНИКОВ д.т.н., доцент, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.В. РЕЗНОВ д.т.н., профессор, ИИТ «МЭИ», Москва	В.В. РЯБЦОВ д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ф.И. САРАТОВ д.т.н., профессор, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов	Ю.С. ТОМАШЕВСКИЙ к.т.н., доцент, ССТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
С.В. ТРИГОЛЬНЫЙ д.т.н., профессор, КТИ, Москва	Г.Г. УГАРОВ д.т.н., профессор, ИИТ, Байконур
В.В. УМАНОВ д.т.н., профессор, ИИТ, Байконур	В.А. ЦАПЕВ д.т.н., профессор, ССТУ Гагарина Ю.А., Саратов

ISSN 2300-6020

© Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2018

Журнал публикует статьи только по техническим наукам и специальностям:
01.09.01 – Электроника. Электронные аппараты; 05.09.02 – Электротехнические материалы и изоляция; 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы; 05.09.10 – Электротехнология; 05.09.12 – Силовая электроника; 05.11.01 – Приборы и методы измерений (измерения в электротехнологии); 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в области электротехнологии).

Рубрики журнала соответствуют следующим специальностям:
Электротехнология – 05.09.10; Электроника – 05.09.01; 05.09.10; Электроснабжение – 05.09.03; 05.09.10; Электроника – 05.09.10; 05.09.12; Электродинамика – 05.09.10; Материаловедение – 05.09.02; 05.09.10; Измерения – 05.09.03; 05.11.01; 05.11.16; Системы управления – 05.09.03; 05.09.10; Социальный аспект – 05.09.03; 05.09.10.

В рубрике «Летопись» публикуются статьи о событиях и людях, имеющих отношение к электротехнологии.

В перспективе с получением статуса журнала из перечня ВАК Минобрнауки России научно-техническому журналу «Вопросы электротехнологии» следует ожидать увеличения поступающих в редакцию статей. Следует провести работу по сокращению затрат времени на подготовку и редактирование очередного

номера, ввести в практику издания цветные фотографии и рисунки и продолжить встречи редакции журнала за круглым столом с авторами журнала для обсуждения путей совершенствования работы журнала, решения тех или иных научно-технических вопросов электротехнологии.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефонам:

8 (8452) 99-87-63 – Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте eltech@sstu.ru.

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественнонаучных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка – О.В. Пачина
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 25.12.2018
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 16,0 Уч. изд. л. 6,7
Тираж 500 экз. Заказ 64 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2019 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 25.12.2018
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 16,0 Publication base sheet 6,7
Circulation: 500 printed copies Order 64 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*