

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 4 (17)

Декабрь 2017

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор

Зам. главного редактора

Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ТРИГОРЛЫЙ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Н.В. БЕКРЕНЕВ

Ю.В. ГУЛЯЕВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова
РАН, Москва

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

Л.С. ЗИМИН

С.Г. КАЛГАНОВА

В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ

В.Н. ЛЯСНИКОВ

А.Н. МАКАРОВ

Г.А. МОРОЗОВ

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

А.Ф. РЕЗЧИКОВ

И.В. РОДИОНОВ

В.П. РУБЦОВ

Ф.Н. САРАПУЛОВ

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

С.В. ТРИГОРЛЫЙ

Г.Г. УГАРОВ

В.Н. ХМЕЛЕВ

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь

д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов

д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

к.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, КТИ, Камышин

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 4 (17)
December 2017

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Editor-in-Chief:

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH

Assistant to the Editor-in-Chief:

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

Chief Executive Officer

TRIGORLY SERGEI VIKTOROVICH

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY

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

N.V. BEKRENEV

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

Yu.V. GULYAEV

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

V.B. DEMIDOVICH

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

L.S. ZIMIN

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

S.G. KALGANOVA

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

V.A. KOLOMEITSEV

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

V.N. LYASNIKOV

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

A.N. MAKAROV

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

G.A. MOROZOV

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

Yu. P. PERELIGIN

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

A.F. REZCHIKOV

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

I. V. RODIONOV

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

V.P. RUBTSOV

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

F.N. SARAPULOV

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

Yu. B. TOMASHEVSKY

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

S.V. TRIGORLY

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

G.G. UGAROV

Dr.Sc., Professor, Kamishin Institute of Technologies, (branch) Volgograd State Technical University, Kamishin

V.N. KHMELEV

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

V.A. TSAREV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я.** Исследование влияния плазмохимической модификации на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния 5
- Добродум А.С., Архангельский Ю.С.** Согласование производительностей гибридной камеры СВЧ электротехнологической установки по нетепловой и тепловой модификациям обрабатываемых материалов 15
- Степаненко В.В., Кожевников В.Ю.** Дезинсекция пищевых продуктов энергией СВЧ электромагнитного поля 19
- Юдина В.О., Архангельский Ю.С.** Конкурентоспособность и целесообразность применения методических СВЧ электротермических установок 23

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Менщиков И.А., Баташов С.И.** Рекуррентное оценивание диагностических параметров тяговых электрических машин пассажирского электровоза серии ЭП1 с повышенным отработанным ресурсом 28
- Менщиков И.А.** Исследование токовых характеристик электромеханических систем электропоезда ЭР-9^Т с помощью автоматизированного нагрузочного стенда на статических преобразователях НТЦ ТРАНСПОРТ 441549.014РЭ 32

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Кошелев П.А., Парамонов С.В.** Несимметрия электромагнитных процессов в трёхфазном трансформаторе. Причины, количественный анализ 39

ЭЛЕКТРОНИКА

- Семенов С.В., Зоркин А.Я., Родионов И.В., Вавилина Н.А.** Особенности работы выхода и поверхностного заряда термоэлектронных оксидосодержащих катодов вакуумных электронных приборов 51
- Тищенко О.Д., Тищенко А.А., Зоркин А.Я.** Исследование химическо-

го и фазового состава эмиссионно-активного вещества импрегнированного катода малоомощного прибора магнетронного типа 56

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Скворцов А.А., Иванов М.Д.** Методика квазианалитического расчета критической длины основной волны коаксиально-секторного волновода с неоднородным диэлектрическим заполнением 60
- Скворцов А.А.** Применение прямоугольных волноводов с неоднородным диэлектрическим заполнением в качестве элементов связи СВЧ устройств 64

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Перинская И.В.** Механические характеристики и элементный состав поверхности титана, имплантированного ионами серебра 69
- Родионов И.В., Сперанский С.К.** Исследование характеристик функциональных электротермических оксидных покрытий с помощью фракталов 73
- Тищенко А.А., Соловьев Р.В., Тищенко О.Д.** Влияние применения сплава Х20Н80 в качестве раскислителя меди при кольцевой аргонодуговой сварке на прочность и вакуумную плотность сварного соединения 80

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Суркова В.Д., Круглов Н.И., Алексеев В.С.** Программно-технический комплекс для функционирования печей сопротивления различных типов 85
- Круглов Н.И., Суркова В.Д., Алексеев В.С., Давыдов Д.А.** Моделирование многофункциональной системы автоматического управления печами сопротивления 92

ЛЕТОПИСЬ

- Архангельский Ю.С.** К вопросу о тепловой смерти Вселенной 98
- К сведению авторов** 103

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Yafarov R.K., Shanygin V.Ya.** Research into the influence of plasmochemical modification on field emission properties of silicon crystals 5
- Dobrodum A.S., Arkhangelsky Yu.S.** Negotiating the capacity of hybrid micro-waves in electrotechnological devices for heat-treatable and non-heat-treatable materials..... 15
- Stepanenko V.V., Kozhevnikov V.Y.** Disinsection of food products by microwave energy 19
- Yudina V.O., Arkhangelsky Yu.S.** Competitive capacity and expediency of continuous microwaves in electrotechnological devices 23

ELECTROMECHANICS

- Menshchikov I.A., Batashov S.I.** Recursive parameter estimation applied to electric traction machines of the EP1 passenger electric locomotive with improved service life..... 28
- Menshchikov I.A.** Investigation of the current characteristic of electromechanical systems in ER-9t electric trains using the automated load stand Based on static converters STC TRANSPORT 441549.014 RE 32

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Koshelev P.A., Paramonov S.V.** Causes and quantitative analysis for the asymmetry of electromagnetic processes in three-phase transformers 39

ELECTRONICS

- Semenov S.V., Zorkin A.Ya., Rodionov I.V., Vavilina N.A.** Operation peculiarities of the output and surface charge of thermionic oxide-containing cathodes in vacuum electronic devices 51

- Tischenko O.D., Tishchenko A.A., Zorkin A.Ya.** Investigation of the chemical and phase composition of emission-active substances of impregnated cathode in low-power magnetron-type devices 56

ELECTRODYNAMICS

- Skvortsov A.A., Ivanov M.D.** A method for quasianalytic assessment of the primary wave's critical length to coaxial sectorial waveguides with heterogeneous dielectric media 60
- Skvortsov A.A.** Application of rectangular waveguides with heterogeneous dielectric media as coupling elements in microwave devices..... 64

MATERIALS SCIENCE

- Perinskaya I.V.** Mechanical properties and elemental composition of the titanium surface implanted with silver ions 69
- Rodionov I.V., Speransky S.K.** Investigating the properties of functional electrothermal oxide coatings using fractal 73
- Tischenko A.A., Solovyov R.V., Tishchenko O.D.** Impact of NI80CR20 alloy used as a deoxidizer for argon arc welding on weld strength and vacuum tightness of seal welds 80

CONTROLLING SYSTEMS

- Surkova V.D., Kruglov N.I., Alekseyev V.S.** The software and technical complex for various types of resistance furnaces 85
- Kruglov N.I., Surkova V.D., Alekseyev V.S., Davydov D.A.** Simulation of a multifunctional system for automatic control of resistance furnaces..... 92

CHRONICLE

- Arkhangelsky Yu.S.** The issues of death heat of the universe 98
- Information for Authors 103

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 537.533.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ НА АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин

RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF PLASMOCHEMICAL MODIFICATION ON FIELD EMISSION PROPERTIES OF SILICON CRYSTALS

R.K. Yafarov, V.Ya. Shanygin

Исследованы закономерности электронной и морфологической модификации поверхности кремниевых кристаллов при СВЧ плазменной микрообработке в различных химически активных газовых средах. Показано, что электронная модификация обусловлена формированием встроенных поверхностных потенциалов, которые в зависимости от типа электропроводности полупроводников различным образом влияют на автоэмиссионные свойства катодных матриц, изготовленных на их основе.

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

Одно из важнейших направлений в развитии СВЧ электроники принадлежит вакуумной микроэлектронике и вакуумным интегральным схемам (ВИС), создаваемым на ее основе. Основными достоинствами ВИС являются сверхвысокое (субпикосекундное) быстродействие, высокая устойчивость к радиации, слабая чувствительность к температуре и весьма большой КПД. Приборы вакуумной микроэлектроники могут быть использованы как усилители и генераторы миллиметрового диапазона длин волн, в системах непосредственного телевизионного вещания со спутников

Regularities of electronic and morphological modification of silicon crystal surfaces at microwave plasma microprocessing are investigated in various chemically active gases. It is shown that electronic modification is caused by generating built-in superficial potentials. Depending on conductivity type of semiconductors, the given potentials have differential effect on field emission properties of the matrix cathode fabricated on their basis.

Keywords: plasma microprocessing, morphology, nanostructuring surface, phase structure, field emission

с использованием тридцатисантиметровых антенн и менее, в РЛС, системах сотовой связи и т.п.

Для вакуумных интегральных схем, СВЧ приборов, плоских дисплеев весьма привлекательными по ряду причин, прежде всего миниатюрности, экономичности и т.п., являются матричные автоэмиссионные катоды на кристаллах кремния, в которых эмиссия происходит с кончиков регулярно массива острий. Острия могут быть выполнены с помощью различных технологий, включающих процессы фотолитографии, травления, напыления, окисления как

с интегрированным управляющим электродом, например катоды Спиндта, так и без него. Ключевыми параметрами катодов являются величина плотности тока, ее однородность по площади и стабильность во времени. Эти параметры в первую очередь связаны с плотностью упаковки острий и однородностью тока эмиссии по массиву острий, которая, в свою очередь, обусловлена степенью идентичности геометрических и электрических параметров острий в массиве. Неоднородность параметров острий приводит к заметному разбросу электрического поля на их окончаниях и тока эмиссии от острия к острию из-за сильной зависимости тока автоэмиссии от величины электрического поля. Поэтому при повышении напряжения, приложенного к диоду, первыми начинают эмитировать небольшое число наиболее эффективных острий, через которые протекает большой ток еще до того, как начнет эмитировать основная их масса. Такие острия сгорают из-за низких проводимости и теплопроводности, поскольку охлаждение сильно вытянутого острия происходит с небольшой площади основания. Дополнительным иницирующим механизмом разрушения острий является ионная бомбардировка.

В работе [1] впервые экспериментально реализован и получил научное обоснование новый метод создания полевых источников электронов с использованием атомной структуры кристаллов кремния, процессов гетерофазной вакуумно-плазменной самоорганизации островковых углеродных масочных покрытий и высокоанизотропного плазмохимического травления в условиях слабой адсорбции. Исследования с использованием атомно-силовой и электронной микроскопии кинетики изменения морфологии поверхности кристаллов кремния показали, что использование в качестве масочного покрытия при высокоанизотропном плазмохимическом травлении самоорганизованных наноразмерных кремний-углеродных доменов позволяет получать многоострийные структуры с поверхностной плотностью острий $(3-5) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Это на 2-3 порядка превышает поверхностную

плотность эмиттерных решеток, полученных с использованием традиционных микроэлектронных литографических технологий. Повышение плотности автоэмиссионных токов и деградационной стойкости многоострийных полевых источников электронов на основе кристаллов кремния, изготовленных по этому методу, достигается увеличением поверхностной плотности острий, которое приводит к снижению токовой нагрузки на каждый из них, и углеродной модификацией эмиссионных центров.

При разработке метода было замечено, что при практически одинаковых параметрах морфологии автоэмиссионные характеристики полученных катодных структур существенно зависят от способа плазмохимической очистки поверхностей кристаллов перед осаждением на них субмонослойных углеродных масочных покрытий, а также от типа электропроводности кристаллов кремния. В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование влияния плазменной микрообработки в различных химически активных газовых средах на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния.

Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника, описанного в работе [2]. Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. Давление рабочих газов в процессе плазменной обработки было равным 0,1 Па и обеспечивало выполнение условий ЭЦР, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5% [2]. В экспериментах использовались кристаллы кремния ориентации (100) различных типов проводимости: КЭС (0,01-0,02) и КДБ (0,01-0,02). В качестве рабочих газов для травления пластин кремния, пассивированных тонкой пленкой естественного окисла, использовались хладон-14 и аргон. Величины ускоряющих напряжений на подложкодержателе в процессах плазменного травления были фиксированными и составляли 100 В. Исследование автоэмиссионных свойств

проводилось на наноструктурированных поверхностях кристаллов кремния. Процесс наноструктурирования осуществлялся в одном технологическом цикле и включал плазменное травление в хладоне-14 или аргоне с последующими плазмохимическим осаждением на кристаллы кремния островковых субнаноразмерных углеродных масочных покрытий и высокоанизотропным травлением для получения наноразмерных столбчатых кремниевых выступов [1]. Высокоанизотропное травление матрицы кремния осуществлялось при положительном смещении на подложкодержателе с использованием хладона-14 при давлении менее 0,1 Па. Исследования автоэмиссионных свойств осуществлялись в условиях высокого вакуума (10^{-5} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм.

Наноморфология наноструктурированных поверхностей кристаллов кремния изучалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) P4-SPM-MDT. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м. Поле сканирования составляло 3×3 мкм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения микроскопа.

На рис. 1-4 приведены зависимости морфологических (высот и поверхностных

плотностей выступов) и автоэмиссионных (порогов напряженностей электрического поля начала автоэмиссии с фиксированием начальных плотностей автоэмиссионного тока 10 мкА/см^2 и их максимальных значений) параметров наноструктурированных пластин кремния различных типов проводимости от длительности высокоанизотропного масочного травления. Можно видеть, что величины и характер изменения исследуемых параметров зависят от типа электропроводности полупроводника и вида плазмообразующего газа, использованного при травлении его поверхности перед осаждением углеродного масочного покрытия.

Из рис. 1, 2 видно, что при предварительной обработке пластин кремния обоих типов электропроводности в плазме аргона наблюдается практически линейная зависимость высот выступов от длительностей масочного травления. При длительностях травления 30 минут выступы на пластинах кремния обоих типов проводимостей достигают высоты около 20 нм. При предварительной обработке пластин в плазме хладона-14 максимум высот выступов достигается при длительности травления около 10 мин. Изменения их поверхностных плотностей при травлении в различных плазмообразующих средах имеют практически одинаковый характер: начиная с длительностей масочного травления в течение 10 минут они стабилизируются на уровне $(3-7) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

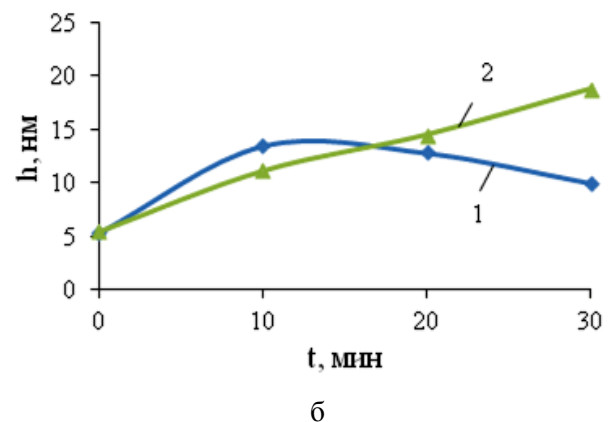
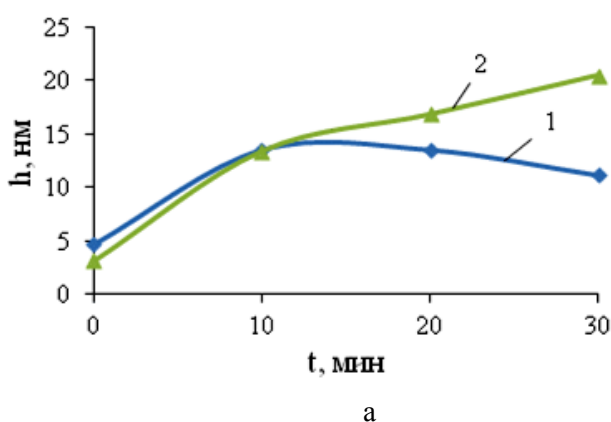


Рис. 1. Зависимости высот выступов на пластинах кремния р- (а) и n-типов (б) проводимости от длительности высокоанизотропного травления для различных видов обработки поверхностей перед осаждением углеродного масочного покрытия: 1 – в плазме хладона-14; 2 – в плазме аргона

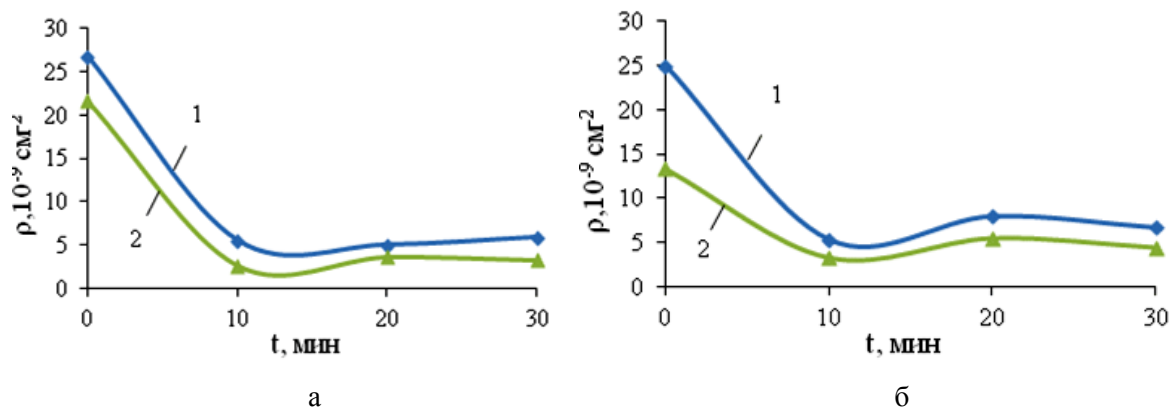


Рис. 2. Зависимости поверхностных плотностей выступов на пластинах кремния р- (*а*) и п-типов (*б*) проводимости от длительности высокоанизотропного травления для различных видов обработки поверхностей перед осаждением углеродного масочного покрытия: 1 – в плазме хладона-14; 2 – в плазме аргона

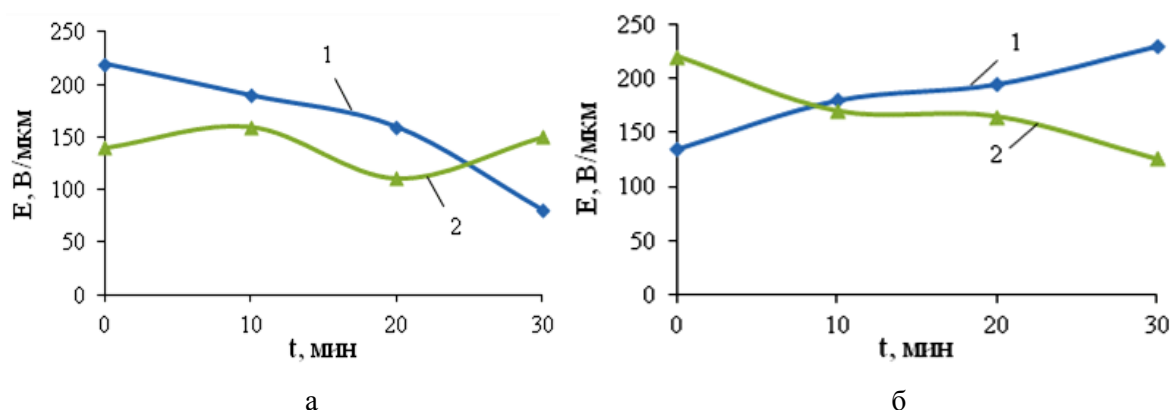


Рис. 3. Зависимости порогов начала автоэмиссии пластин кремния р- (*а*) и п-типов (*б*) проводимости от длительности высокоанизотропного травления для различных видов обработки поверхностей перед осаждением углеродного масочного покрытия: 1 – в плазме хладона-14; 2 – в плазме аргона

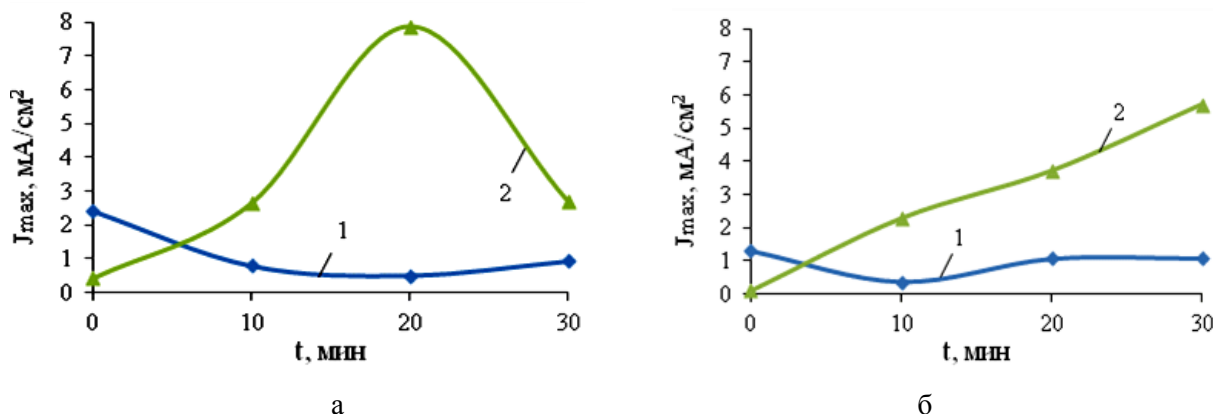


Рис. 4. Зависимости максимальных плотностей токов автоэмиссии пластин кремния р- (*а*) и п-типов (*б*) проводимости от длительности высокоанизотропного травления для различных видов обработки поверхностей перед осаждением углеродного масочного покрытия: 1 – в плазме хладона-14; 2 – в плазме аргона

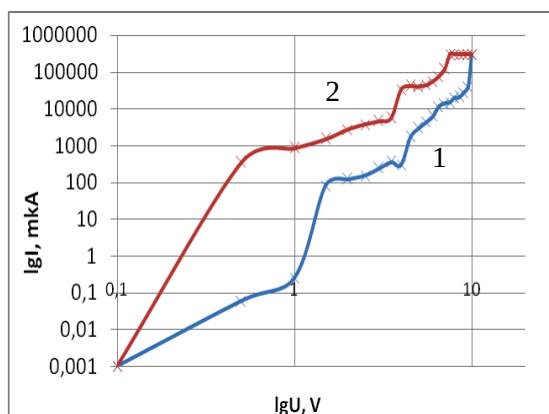
Из рис. 3, 4 можно видеть, что для кристаллов кремния р-типа с предварительной плазменной обработкой в среде аргона при

длительности масочного травления 20 минут реализуются экстремумы напряженности поля начала автоэмиссии и максималь-

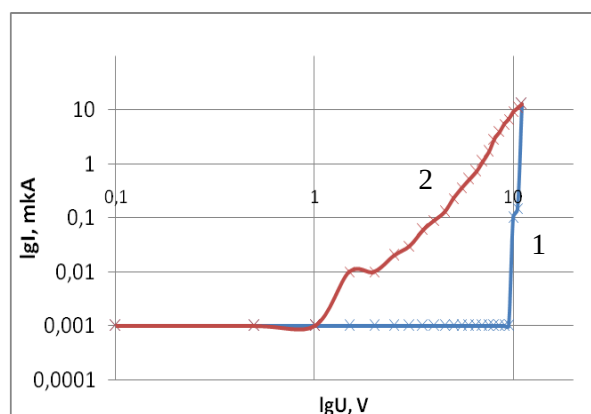
ной плотности автоэмиссионного тока, которая на порядок и более превышает плотность максимального тока после обработки в плазме хладона-14. При этой длительности травления напряженность поля начала автоэмиссии для кристаллов кремния р-типа меньше, чем для кристаллов кремния n-типа. Для кремния n-типа оптимальной является длительность масочного травления 30 минут. При этом достигаются минимальный порог автоэмиссии и наибольшее значение максимальной плотности автоэмиссионного тока. Однако она почти в два раза меньше, чем максимальная плотность тока при оптимальной длительности масочного травления для кремния р-типа.

На рис. 5 приведены в логарифмических координатах вольт-амперные характеристики (ВАХ) поперечного электронного транспорта (с направлением перпендикулярно поверхности) в пленочных гетеро-

структурах, полученных осаждением в одном вакуумном технологическом цикле в плазме смеси паров этанола и моносилана герметизирующего туннельно тонкого (10-20 нм) слоя аморфного гидрогенизированного карбида кремния (a-SiC:H) на кристаллы кремния (100) р-типа после травления в различных плазмообразующих газовых средах. Для проведения измерений на поверхность гетероструктуры методом вакуумного термического осаждения наносились металлические контакты диаметром 2 мм. В полученных структурах исследовался электронный транспорт с прямой полярностью подключения к источнику питания. Измерения ВАХ производились с использованием универсального мультиметра Keithley 2000. Измерялись вольт-амперные характеристики образцов при изменении внешнего напряжения в интервале от 0 до 10 В в прямом и обратном направлениях.



а



б

Рис. 5. ВАХ поперечного транспорта электронов в структурах a-SiC:H на кремнии (100) р-типа, полученных при прямом (1) и обратном (2) изменении напряжения после обработки кремния в СВЧ плазме различных газовых сред: а – аргон; б – хладон

Из рис. 5 можно видеть, что значение напряжения, при котором наблюдается начало роста тока, составляет около 10 В при травлении естественного оксидного покрытия кремния в плазме аргона, а при травлении в плазме хладона-14 задержка в росте тока отсутствует. Рост токов после обработки в аргоне носит характер достаточно резкого (скачкообразного) переключения. Перепад токов при этом составляет около 4 порядков от начального уровня. После обработки пластин кремния в плазме

хладона изменение токов в том же интервале изменения напряжений на гетероструктуре составляет более 8 порядков от исходного уровня. При изменении напряжения в обратном направлении токи через структуры во всех случаях выше, чем при изменении напряжения в прямом направлении.

Как показано в работе [3], виды ВАХ, приведенные на рис. 5, характерны для токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), которые имеют место в диэлектриках и высокоомных полупроводни-

ковых материалах с ловушками захвата носителей заряда. Согласно теории, эти ловушки создают глубокие уровни энергии в запрещенной зоне (так что обратным тепловым выбросом электронов можно пренебречь) и равномерно распределены по объему полупроводника. Участок ВАХ с резким ростом тока, который по терминологии теории ТОПЗ называется участком «полного заполнения ловушек» (ПЗЛ), является границей между режимом малых омических токов, существующих благодаря присутствию в полупроводниковой структуре некоторого количества равновесных электронов проводимости n_0 , и сильных токов, соответствующих участку с линейным ростом тока, который по терминологии ТОПЗ называется «ловушечным квадратичным законом» (ЛКЗ). На участке малых омических токов инжектируемые в гетероструктуру из металлического контакта электроны захватываются ловушками – происходит формирование области пространственного заряда, индуцированное электрическое поле которого препятствует проникновению электронов из контакта в гетероструктуру. На участке ПЗЛ в начальный момент резкого увеличения тока от напряжения все ловушки оказываются заполненными инжектированными электронами, и тогда их концентрация в зоне проводимости начинает увеличиваться, что и приводит к резкому возрастанию тока. На следующем участке ВАХ в области сформировавшегося пространственного заряда токопрохождение описывается законом Мотта. В этом случае ток пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален кубу толщины пленки. Напряжение, при котором начинается участок ПЗЛ, связано с концентрацией первоначально не занятых электронами ловушек (p_0) соотношением $U_{ПЗЛ} = q p_0 L^2 / \varepsilon$, где q – абсолютная величина заряда электрона, ε – статическая диэлектрическая проницаемость изолятора, L – толщина пленки.

По аналогии с теорией ТОПЗ можно предположить, что большая длительность участков малых омических токов после травления кремния в плазме аргона свиде-

тельствует о том, что возникшие в процессе плазменного травления неоднородности и дефекты поверхности вызывают по сравнению с травлением в хладоне-14 появление большего количества центров захвата электронов, которые расположены в глубине запрещенной зоны кремния и не могут быть активированы при комнатной температуре. Справедливость этого предположения может быть обоснована следующим образом.

При использовании низкоэнергетичной плазмы аргона травление пластин кремния с естественным оксидным покрытием осуществляется по ионно-физическому механизму за счет распыления атомов кремния и частиц его естественного оксида ускоренными ионами [2]. За счет инертности аргона какие-либо химические связи с поверхностными атомами кремния не образуются. В результате этого поверхность кремния приобретает структуру и плотность оборванных (ненасыщенных) связей, характерных для атомно чистой поверхности кремния заданной кристаллографической ориентации (рис. 6) [4].

При ионно-плазменной обработке кремния в плазме CF_4 химически активными частицами являются ионы C^+ , CF_n^+ , где $n = 1 \dots 4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора, которые при хемосорбции образуют адкомплексы $Si-C$ и $Si-F$ [2]. Хемосорбированные комплексы SiC и SiF имеют сильные энергии химической связи (4,55 и 5,6 эВ соответственно) и пассивируют часть оборванных (ненасыщенных) химических связей поверхностных атомов кремния, уменьшая их поверхностную плотность (рис. 7).

Формирование ненасыщенных электронных связей при травлении приводит к появлению локализованных на поверхности полупроводника состояний, которые в зависимости от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные ловушки захвата или рекомбинационные центры [3, 4]. Прочность ненасыщенных электронных связей существенно меньше, чем прочность насыщенных ковалентных связей, которые имеют место в

равновесных электронных конфигурациях объемных атомов. Кроме того, присутствие электронных поверхностных состояний на поверхности полупроводника р-типа возмущает электронную структуру в объеме и делает ее энергетически невыгодной. Поэтому поверхностные атомы кремния, имеющие ненасыщенную химическую связь, действуют как дырочные ловушки, заряжаясь поло-

жительно при отдаче электрона в валентную зону полупроводника (такие поверхностные состояния, как известно, называются донорными). Это приводит к образованию на поверхности трехвалентного кремния с положительным зарядом, поверхностная плотность которого при плазменной микрообработке зависит, как показано выше, от вида плазмообразующей среды.

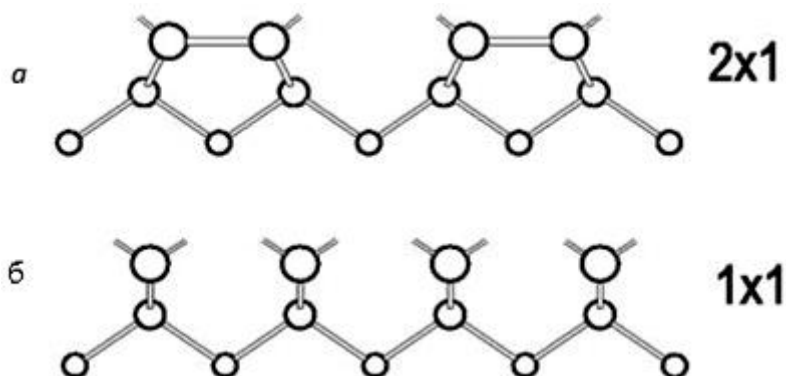


Рис. 6. Схематическое изображение ненасыщенных поверхностных связей на поверхности Si(100) после плазменной обработки в аргоне: а – после димерной реконструкции Si(100)2×1; б – идеальной нереконструированной Si(100)1×1

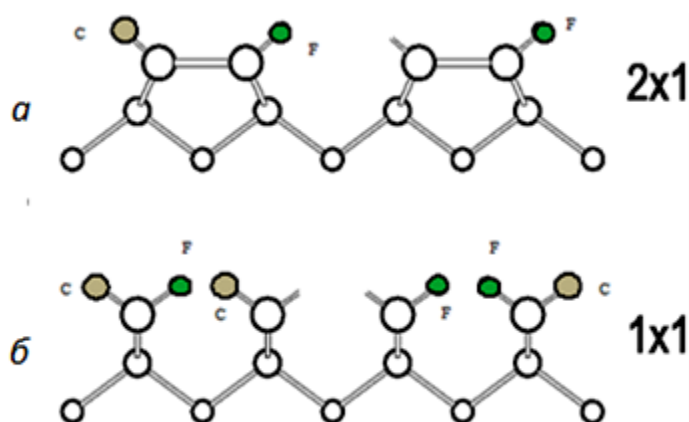


Рис. 7. Схема расположения хемосорбированных атомов углерода и фтора на поверхностях Si(100) после плазменной обработки в хладоне-14: а – после димерной реконструкции Si(100)2×1; б – идеальной нереконструированной Si(100)1×1

У высоколегированных акцепторных полупроводников наличие положительного поверхностного заряда приводит, как известно, к обеднению приповерхностной области основными носителями. Неоднородное распределение заряда приводит к возникновению электростатического встроенного потенциала с направлением электрического поля в объем полупроводника. Ширина области пространственного заряда

Q_{sp} и сопротивление обедненного слоя тем больше, чем больше пространственный заряд, который в случае свободной поверхности и отсутствия внешних полей равен и противоположен по знаку заряду в поверхностных состояниях.

В случае прямого включения гетероструктуры на кремнии р-типа к источнику питания внутреннее поле, вызванное присутствием поверхностных зарядов, будет

направлено противоположно внешнему электрическому полю, что приводит к ослаблению последнего. Поэтому ток через структуру при изменении внешнего напряжения возникает только после того, как напряженность от внешнего поля превысит напряженность поля от встроенного заряда.

В связи с меньшей плотностью ненасыщенных валентных связей встроенный потенциал и приповерхностный пространственный заряд на кремнии при плазмохимической обработке в среде хладона-14 меньше, чем при обработке в аргоне. В случае кристаллов кремния с электронным типом проводимости за счет поверхностной электронной автокомпенсации это различие менее значимо, чем при плазменной обработке кристаллов кремния р-типа [2]. Кроме того, благодаря более высокой электронейтральности встроенный поверхностный потенциал на кремнии п-типа много меньше, чем на кремнии р-типа.

При СВЧ плазменной обработке кремния в атмосфере хладона-14 в результате образования адкомплексов SiC и SiF уменьшается по сравнению с обработкой в аргоне величина поверхностного заряда Q_{ss} и, как следствие, уменьшаются внутреннее электрическое поле и степень обеднения приповерхностной области основными носителями. Вследствие этого порог «включения» проводимости в гетероструктуре после плазменной обработки подложки кремния в среде аргона выше, чем при обработке в хладоне-14.

В результате преодоления встроенного потенциала для обеспечения поперечного транспорта электронов в гетероструктуре «действующее» напряжение в системе уменьшается. Это уменьшение тем больше, чем больше величина встроенного потенциала. Вследствие этого при приложении одинаковой величины внешнего электрического поля величина тока через гетероструктуры с обработкой в различных плазмообразующих средах будет увеличиваться при переходе от аргона к хладону.

После преодоления внутреннего электростатического поля на границе полупроводника и $\alpha\text{-SiC:H}$ и заполнения всех лову-

шек в объеме структуры устанавливается термодинамически равновесный для данных условий транспорт носителей заряда, при котором инжектированный заряд носителей компенсирует все связанные электростатические заряды внутри объема структуры. Это состояние достигается после резкого увеличения тока на ВАХ. При изменении с этого момента внешнего электрического напряжения на исследуемой структуре в обратном направлении в результате снижения внешней инжекции происходит постепенное уменьшение пространственного заряда подвижных носителей. Это приводит к уменьшению тока через структуру, который, однако, остается большим, чем при таком же значении напряжения, но при изменении напряжения в прямом направлении, когда не все ловушки были заполнены. При еще меньших внешних напряжениях и концентрациях подвижных носителей, когда их пространственный заряд становится сравнимым с электростатическим внутренним потенциалом, подвижность носителей из-за изменения условий рассеяния резко падает. Поэтому при обработке кремния в аргоне, где плотности поверхностных зарядов в отличие от обработки в хладоне наиболее высокие, наблюдается переключение в исходное «непроводящее» состояние. Величина напряжения переключения характеризует величину внутреннего электростатического поля.

После удаления естественного оксидного покрытия на кремнии р-типа в плазменной среде хладона-14 и осаждения субмонослойного углеродного покрытия в образовавшемся островковом кремний-углеродном масковом покрытии могут оставаться полярные Si-F и Si-CF_m комплексы (рис. 7). Так же как любой другой химический адсорбат, они изменяют работу выхода электронов за счет изменения дипольного момента поверхности. Из-за высокой электроотрицательности фтора увеличение дипольного момента особенно сильно в случае высокой концентрации на поверхности Si-F диполей.

При высокоанизотропном плазмохимическом травлении кремния р-типа в хла-

доне-14 при положительном смещении на подложкодержателе одновременно с увеличением высоты выступов за счет интенсивной электронной бомбардировки может осуществляться разрыв Si-F связей в масочном покрытии и постепенное удаление из него электроотрицательных ионов фтора. Благодаря этому порог начала эмиссии с увеличением длительности масочного травления уменьшается (рис. 3 а), а максимальная плотность автоэмиссионного тока при больших длительностях травления увеличивается (рис. 4 а). Это происходит несмотря на уменьшение высоты выступов (рис. 1 а) и коэффициентов усиления поля на них, что, согласно представлениям Фаулера и Нордгейма, должно приводить к обратному результату.

На кристаллах кремния n-типа после плазмохимического травления естественного оксидного покрытия в среде хладона-14 и осаждения углерода в образовавшемся островковом кремнийуглеродном масочном покрытии за счет высокой электрокомпенсированности атомно-чистой поверхности концентрация полярных Si-F комплексов значительно больше, чем при травлении кремния p-типа. В процессе высокоанизотропного плазмохимического травления за счет конечной селективности травления толщина масочного покрытия уменьшается. Результатом этого является обогащение поверхности эмиттерных выступов полярными Si-F комплексами, которые при больших длительностях масочного травления увеличивают работу выхода электронов и порог начала автоэмиссии (рис. 3 б, кривая 1).

После удаления оксидного покрытия в плазме аргона и осаждения углеродного масочного покрытия под ним в силу рассмотренных выше причин формируется встроенный поверхностный потенциал с направлением вектора электрического поля в глубь кристалла. При последующем высокоанизотропном травлении на углеродных островках маски формируются остаточные C-F комплексы. При небольших длительностях масочного травления (≤ 10 мин) они ухудшают работу выхода электронов (рис. 3 а, кривая

2). При длительностях травления около 20 мин происходит удаление основной массы углеродного покрытия и связанных с ним C-F комплексов. Благодаря этому порог начала автоэмиссии уменьшается, а максимальная плотность автоэмиссионного тока за счет встроенного поверхностного потенциала увеличивается. При длительностях масочного травления больше 20 мин за счет электронной бомбардировки происходит нейтрализация положительного встроенного поверхностного потенциала. Результатом этого является уменьшение максимальных плотностей токов автоэмиссии (рис. 4 а, кривая 2).

После удаления оксидного покрытия на кристаллах кремния n-типа распылением в плазме аргона и осаждения углеродного островкового масочного покрытия его толщина больше, чем при травлении в плазме хладона-14 и при осаждении того же покрытия на кремний p-типа. Это связано с лучшей электронейтральностью поверхности кремния n-типа и отсутствием на ней хемосорбированных атомов фтора, которые в большом количестве остаются на атомно-чистой поверхности кремния после удаления оксидного покрытия в плазме хладона-14. Вследствие большей толщины углеродного покрытия порог автоэмиссии в отсутствие масочного травления на кремнии n-типа выше, чем на кремнии p-типа, а максимальная плотность тока ниже.

При высокоанизотропном масочном травлении за счет конечной селективности уменьшается толщина маски. Благодаря этому, а также за счет более высокой селективности травления (вследствие отсутствия на границе кремния атомов фтора) с увеличением длительности масочного травления увеличиваются высоты выступов и коэффициенты усиления поля на них, которые уменьшают пороги автоэмиссии и увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов (рис. 3 б, 4 б, кривые 2).

Низкоэнергетическая СВЧ плазменная микрообработка пластин монокристаллического кремния в различных по химической активности газовых средах позволяет различным образом модифицировать (перестраивать) электронную структуру и свой-

ства их поверхности. Модификация связана с перераспределением плотности заряда в приповерхностной области и определяется природой используемых плазмохимических сред. Валентность составляющих их химических элементов по отношению к кремнию и прочность образующихся химических связей способствуют формированию устойчивых насыщенных связей атомов кремния с различной поверхностной плотностью. Оставшиеся ненасыщенные связи участвуют в перестройке электронной структуры приповерхностной области полупроводника. Это приводит к возникновению встроенного электростатического потенциала и изменению приповерхностных электрофизических свойств, которые определяют закономерности транспорта и туннельной эмиссии электронов в пленочных гетероструктурах. При плазменной микрообработке в среде аргона в результате его химической инертности на поверхности пластин кремния образуются ненасыщенные электронные связи с максимальной поверхностной плотностью. Это вызывает наиболее сильные изменения приповерхностных электрофизических свойств кремния и условий транспорта электронов. Плазменная микрообработка в среде хладона-14 пассивирует часть оборванных связей поверхностных атомов кремния. Вследствие этого встроенный потенциал и приповерхностный пространственный заряд на кремнии после плазменной микрообработки в хладоне-14 меньше, чем при обработке в плазме аргона. Поэтому ВАХ поперечного транспорта электронов в исследуемой гетероструктуре для этого случая имеет меньшую величину участка малых омиче-

ских токов, которая, согласно теории ТОПЗ, пропорциональна концентрации первоначально не занятых электронами ловушек в структуре.

Для каждого типа полупроводника при удалении естественного оксидного покрытия с использованием ионно-плазменного или плазмохимического травления взаимосвязь морфологических и автоэмиссионных характеристик может быть описана в рамках теории Фаулера – Нордгейма с учетом изменения свойств поверхностных фаз на вершинах кремниевых острий, которые происходят в процессах масочного травления. Изменения в свойствах поверхностных фаз приводят к изменению суммарного дипольного момента поверхности эмиссионных острий, прозрачности потенциальных барьеров и, следовательно, автоэмиссионных характеристик полученных структур.

За счет большей величины встроенного потенциала после распыления естественного оксидного покрытия ионами аргона пондеромоторные нагрузки от внешнего электрического поля на кристаллическую решетку кремния уменьшаются. Результатом этого являются реализация в кремниевых структурах р-типа при оптимальных длительностях высокоанизотропного масочного травления с удалением естественного оксидного покрытия травлением в плазме аргона больших по величине максимальных плотностей автоэмиссионных токов по сравнению со структурами п-типа и травлением во фторсодержащей плазме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Яфаров Р.К.** Поверхностное наноструктурирование в системе углерод-кремний (100) при микроволновой плазменной обработке / Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 4. С. 558-562.
2. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.

3. **Калашников С.Г.** Физика полупроводников / С.Г. Калашников, В.Л. Бонч-Бруевич. М.: Наука, 1977. 672 с.
4. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин и др. М.: Наука, 2006. 490 с.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, профессор, 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

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

Vitaly Ya. Shanygin – PhD, Research Fellow at the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics

Статья поступила в редакцию 17.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

УДК 621.365.5

СОГЛАСОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЕЙ ГИБРИДНОЙ КАМЕРЫ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПО НЕТЕПЛОВОЙ И ТЕПЛОВОЙ МОДИФИКАЦИЯМ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский

NEGOTIATING THE CAPACITY OF HYBRID MICROWAVES IN ELECTROTECHNOLOGICAL DEVICES FOR HEAT-TREATABLE AND NON-HEAT-TREATABLE MATERIALS

A.S. Dobrodum, Yu.S. Arkhangelsky

Рассмотрены виды СВЧ модификаций диэлектриков, конструкция СВЧ электро-технологической установки с гибридной камерой и принцип ее работы, расчет длины щели в волноводе камеры нетепловой СВЧ модификации и количества полимерных нитей в щели при заданной производительности камеры тепловой СВЧ модификации, согласование производительностей гибридной камеры по тепловой и нетепловой модификациям.

Ключевые слова: СВЧ электротехнологическая установка, гибридная рабочая камера, тепловая и нетепловая модификации, производительность

Types of microwave modification of dielectrics are considered. The focus is made on the design scheme of a microwave electro technological installation with a hybrid chamber and its operation principles. Calculation of the slit length in the waveguide of the nonthermal microwave modification chamber and the number of polymer filaments in the gap at a given performance of the microwave modification chamber are presented.

Keywords: microwave electrotechnological installation with hybrid working chamber, thermal and nonthermal modifications, productivity

Одним из основных технологических процессов в различных отраслях промышленности является термообработка. Широкое распространение получила термообработка за счет энергии электромагнитных колебаний сверхвысоких частот [1].

Нагрев диэлектрика в электромагнитном поле происходит за счет процесса поляризации и протекания токов проводимости. При традиционных способах нагрева и сушки (конвективном, радиационном и контактном) нагрев объекта происходит по поверхности. Если теплопроводность объекта низка, что имеет место у диэлектриков, то термообработка объекта происходит медленно, с локальным перегревом поверхности нагрева, отчего возможны подгорание этой поверхности, возникновение внутренних механических напряжений. Все это в конечном счете может привести к выходу объекта из строя.

Нетепловое воздействие СВЧ электромагнитного поля впервые заметили медики и биологи. До этого было принято считать, что гибель микроорганизмов наступает из-за быстрого нагрева всего объекта до температуры пастеризации (стерилизации) [2].

Отклик биополимеров на нетепловое воздействие СВЧ электромагнитных колебаний ставит вопрос о наличии отклика на такое воздействие у неживых органических материалов, в частности у полимеров. В настоящее время известна возможность модификации свойств при нетепловой обработке в СВЧ электромагнитном поле некоторых материалов разного технологического назначения, таких как волокнистый поликапроамид, эпоксидные компаунды, вязкие смазки, применяемые в триботехнических парах [3].

Так как в установках нетепловой модификации на технологический процесс расходуется лишь небольшая часть СВЧ энергии, то основная часть СВЧ энергия рассеивается в балластной нагрузке, так что энергетическая эффективность такой установки весьма низкая. Повысить энергетическую эффективность можно, если использовать энергию, оставшуюся после СВЧ модификации, для тепловой моди-

фикации другого диэлектрика. Такие рабочие камеры получили название гибридных [4].

При проектировании гибридных камер для производителя важно в гибридной установке производить продукцию, которая одинаково необходима производителю. В работе [5] в качестве примера предложено в камере нетепловой модификации производить полимерную нить, а в камере тепловой модификации – сушку шерсти. Из этих видов продукции можно производить шерстяную ткань повышенной за счет поперечной нити прочности.

Схема такой установки показана на рис. 1.

Установка работает следующим образом. С помощью источника СВЧ энергии 1 СВЧ электромагнитная волна поступает в волновод 2 (камеру нетепловой СВЧ модификации). С помощью системы загрузки-выгрузки 4 через волновод проходят полимерные нити 3. Под действием СВЧ электромагнитного поля с заданной напряженностью электрического поля E в полимерном материале осуществляются физико-химические процессы, приводящие к изменению технологических свойств полимерного материала. СВЧ энергия, не поглощенная нитями, через линию передачи 5 поступает в рабочую камеру тепловой модификации 6, 7, где поглощается в процессе тепловой обработки диэлектрическим материалом (шерстью). Для равномерной термообработки по всему объему диэлектрика его перемещение в камере тепловой модификации осуществляется с помощью системы загрузки-выгрузки 8.

При реализации этой идеи возникает принципиальный вопрос, как согласовать производительности нетепловой и тепловой модификаций, чтобы можно было использовать эти две продукции без остатка. И здесь надо определить, какой может быть длина щели в волноводе 2 и сколько полимерных нитей можно пропустить через эту щель. Длину щели нужно выбирать таким образом, чтобы на ее входе и на выходе напряженность E оставалась в пределах допустимого для модификации данного мате-

риала диапазона. Если нить модифицируется при напряженности электрического поля E с допустимым отклонением $\pm \Delta E$, то на

входе щели напряженность должна быть $E + \Delta E$, а на выходе – $E - \Delta E$.

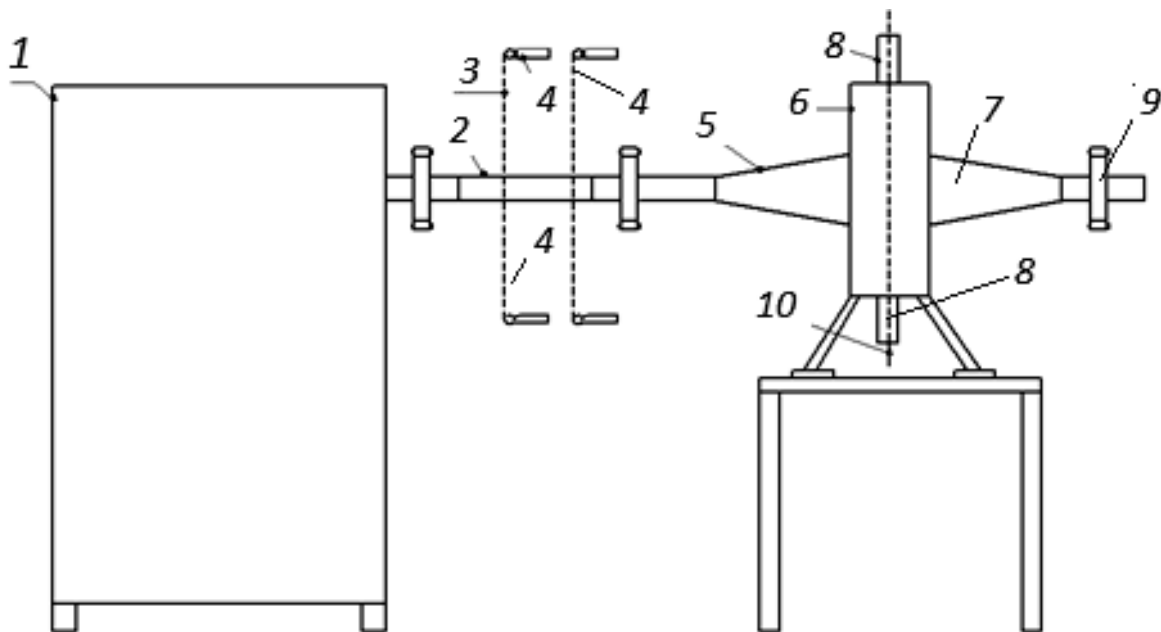


Рис. 1. СВЧ электротехнологическая установка с гибридной рабочей камерой: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – волновод; 3 – полимерные нити; 4 – система загрузки – выгрузки; 5, 6, 7 – рабочая камера тепловой модификации; 8 – система загрузки – выгрузки шерсти; 9 – балластная нагрузка; 10 – шерсть

Расчет длины щели в волноводе следует проводить по соотношению

$$l_{\text{щели}} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{E + \Delta E}{E - \Delta E}, \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания определяется соотношением

$$\alpha = \frac{\pi^2 d \varepsilon' \operatorname{tg} \delta}{2 a \lambda \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2)$$

где d – диаметр нити; ε' – относительная диэлектрическая проницаемость нити, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь нити; a – ширина широкой стенки волновода; λ – длина СВЧ электромагнитной волны.

Согласно [6] положим, что $\varepsilon' = 3-5$, $\operatorname{tg} \delta = 0,01-0,04$, $a = 9$ см, $d = 0,02$ см, $E = 50 \pm 2$ В/см. В таком случае согласно (1), (2) $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-5}$ (1/см), $l_{\text{щели}} = 21$ м.

Если при толщине нити d расстояние между ними $\Delta d = d$, то общее количество нитей в щели равно

$$n = \frac{\left(\frac{l_{\text{щели}}}{d} - 1\right)}{2}, \text{ шт.},$$

то есть $n = 5290$ шт.

Рассмотренный пример показывает, что из-за малого $\operatorname{tg} \delta$, малого коэффициента затухания α длина щели $l_{\text{щели}}$ достаточно велика. Камеру нетепловой модификации полимерных нитей можно сделать более компактной, если волновод этой камеры изогнуть меандром [7]. Если длину волновода в каждой секции меандра сделать, скажем, 2,1 метра, то секций будет 10, а площадь рабочей камеры нетепловой модификации составит примерно $2,3 \times 1,2$ м.

При времени модификации $\tau_m = 10$ с [6] производительность камеры нетепловой модификации составит 9,57 кг/ч, производительность тепловой камеры – 5 кг/ч. Чтобы использовать всю полимерную нить в про-

изготовлении шерстяной ткани с полимерной нитью, придется увеличить СВЧ мощность, подаваемую в камеру тепловой модификации от других источников для увеличения производительности сушки шерсти.

С другой стороны, для производства шерстяной ткани с полимерной нитью можно использовать лишь часть нитей, модифицированных в камере нетепловой модификации, а другую ее часть реализо-

вать отдельно. Окончательное решение о согласовании производительностей продукции гибридной камеры следует принимать с учетом маркетинговых исследований и технико-экономической оптимизации гибридной камеры при выбранном решении в отношении согласования производительностей обеих частей гибридной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермических установок / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 213 с.

2. Влияние электромагнитных полей СВЧ диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов и др. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1978. 124 с.

3. **Калганова С.Г.** Нетепловое действие СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические объекты / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский // Электротехнологические СВЧ установки: материалы межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. С. 53-56.

4. Терминологическая база, энергоэффективность и электроснабжение СВЧ электротехнологических установок /

А.С. Добродум, А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 94-102.

5. **Добродум А.С.** СВЧ электротехнологические установки с гибридными камерами / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 16-22.

6. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

7. **Архангельский Ю.С.** Меандровые системы в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Научная книга, 2011. 210 с.

Добродум Антон Сергеевич – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton S. Dobrodum – Master student, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yury S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

ДЕЗИНСЕКЦИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ СВЧ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В. Степаненко, В.Ю. Кожевников

DISINSECTION OF FOOD PRODUCTS BY MICROWAVE ENERGY

V.V. Stepanenko, V.Yu. Kozhevnikov

Рассмотрены конструкции СВЧ электротехнологических установок для дезинсекции пищевых продуктов, принцип работы, а также актуальность их применения.

Ключевые слова: дезинсекция, пищевые продукты, СВЧ излучение

The article presents the design of microwave installations, their operation principles, and relevance of their application.

Keywords: disinsection, food, microwave radiation

Дезинсекция – один из видов обеззараживания, представляющий собой уничтожение насекомых, способных переносить трансмиссивные инфекции, с помощью специальных химических средств, путём воздействия горячей воды с паром или с помощью биологических средств.

Под дезинсекцией также понимается процедура уничтожения любых насекомых, соседство которых с человеком считается нежелательным: мухи, комары, тараканы, муравьи, постельные клопы и т.д.

Сельскохозяйственная дезинсекция – это комплекс процедур по уничтожению членистоногих, которые препятствуют нормальному развитию зерновых, зернобобовых, технических и других культур, что также приводит к экономическому убытку. Для осуществления процедур по сельскохозяйственной дезинсекции используются средства с химическим составом (яды, пестициды, инсектициды), которые наносятся на поверхность растений посредством распыления с авиатехники или оросительных систем. Скот в зараженных областях можно купать в специально оборудованных в земле бассейнах, куда заливают эффективные препараты.

Новый способ дезинсекции материалов зернового происхождения основан на использовании энергии сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний.

Информационный поиск по этой теме установил на сегодняшний день 3 патента [1-3], а также 3 диссертации, посвященные проблеме дезинсекции пищевых продуктов в СВЧ электромагнитном поле.

В работах [1, 2] рассмотрен способ дезинсекции и дезинфекции материалов зернового происхождения. Изобретения относятся к способу предпосевной обработки зерна. Способ предусматривает формирование в разрядной камере рециркулирующего газового потока, подведение СВЧ энергии, создание плазмы в объеме камеры и пропускание через камеру обрабатываемого материала в виде свободно падающего потока. СВЧ энергию для создания плазмы вводят в импульсном или в непрерывном режимах с помощью трех электромагнитных волн при модуляции, по крайней мере, одной из них импульсами с частотой повторения, выбранной из УЗ диапазона.

При этом длительность импульсов составляет 1-5 мкс. Кроме того, частота модуляции непрерывно изменяется в указанном УЗ диапазоне с периодом 0,01-0,02 с, а через плазменное образование дополнительно пропускают постоянный электрический ток. Способ позволяет устранить зараженность зерна амбарным долгоносиком, подавить бактерицидную зараженность и повысить всхожесть зерна.

Способ осуществляется следующим образом.

Возбуждают в разрядной камере две электромагнитные волны типа H_{11} , электрические составляющие электромагнитного поля которой перпендикулярны оси устройства, и третью волну типа E_{01} , содержащую составляющие электрического поля по всем трем осям декартовой системы координат. При этом максимум продольной составляющей находится на оси. В вихре рабочего газа возбуждают СВЧ плазменный разряд и подают зерновой материал. Совместное действие всех трех волн обеспечивает равномерную по сечению потока обработку зерна. Дополнительные возможности повышения равномерности обработки зерна обеспечиваются организацией вращения поляризации путем введения первых двух волн от одного СВЧ источника со сдвигом фаз волн или пропусканием постоянного электрического тока. Введение первых двух волн от разных СВЧ источников обеспечивает вращение поляризации путем использования обычных методов управления фазой электромагнитных волн. В том случае, когда одна из волн вводится в непрерывном режиме, процесс деионизации плазмы в паузе между импульсами существенно замедляется и уровень ионизации газа к моменту прихода следующего импульса оказывается достаточным для возбуждения плазмы. Это позволяет увеличить паузу между импульсами при сохранении или увеличении мощности в импульсе. Поскольку период СВЧ электромагнитных волн существенно меньше времени прохождения зернового потока через рабочее пространство камеры, отсутствует риск получения необработанного продукта. Дополнительное пропускание постоянного электрического тока сопровождается увеличением вводимой в разряд энергии. При этом поддерживается степень ионизации газа, достаточная для возбуждения плазмы с приходом следующего импульса, и могут быть понижены требования к мощности СВЧ источников и стоимость обработки материала, так как СВЧ энергия значительно дороже энергии постоянного тока.

В работе [3] рассматривается способ СВЧ обработки семян. Изобретение относится к сельскому хозяйству и пищевой промышленности и может быть использовано с целью повышения урожайности растений и оптимизации различных биопромышленных производств. Способ СВЧ обработки семян включает низкоинтенсивное (10^{-8} - 10^{-10} Вт/м²) СВЧ воздействие на семена растений, которое проводят при частоте излучения 2400-2580 МГц, что соответствует природной нетепловой интенсификации. Время облучения варьируется от 6 до 12 ч в зависимости от вида растений. Режим облучения может быть прерывистым или непрерывным, обработка может проводиться в ночное или дневное время. Реализация изобретения позволит повысить всхожесть и прорастание семян.

Изобретение позволит улучшить качество хранящихся кормов, борьбу с вредителями культурных растений, в пищевой промышленности оно может быть применено при производстве БАД и для оптимизации процесса получения солода в пивоварении.

Известны также несколько способов обработки семян электромагнитным излучением СВЧ диапазона: способ подготовки семян к посеву (авт. свид. № 1695841 А1, А01С 1/00, 1991), способ обеззараживания семян томата от вируса табачной мозаики (патент РФ № 2053620 С1, 6 А01С 1/00, 1996), способ дезинсекции семян сельскохозяйственных растений (патент РФ № 2061350 С1, 6 А01С 1/00, 1996).

Все перечисленные способы обработки СВЧ электромагнитным полем являются, по сути дела, термическим воздействием, которое приводит к нарушению биологической структуры живой ткани, при этом применяют громоздкую аппаратуру, потребляющую значительное количество электроэнергии. Заметим, что воздействие СВЧ излучения в указанных способах не исключает возможности применения экологически вредных протравителей, используемых в качестве пестицидов в сельском хозяйстве.

Близким к этим способам СВЧ обработки биологических объектов является способ предпосевной обработки семян посредством воздействия на семена электромагнитного СВЧ электромагнитного поля (авт. свид. № 1762775 А1, А01С 1/00, 1992).

Этим способом предпосевной обработки семян СВЧ излучением достигается только обеззараживание семян перед посевом. Но мощное СВЧ электромагнитное поле нагревает семена до $\sim 105^{\circ}\text{C}$, затем, используя криогенную установку, температуру снижают до 0°C . При таком воздействии не только уничтожают микрофлору семян, но и оказывают разрушающее действие на жизненно важные биологические структуры семян, так как достигается температура коагуляции. Используемая здесь аппаратура сложна и громоздка, не может с легкостью использоваться в лабораторных и в полевых условиях, требует дополнительных энергозатрат.

Необходимо создание универсального, простого и экологически безвредного способа повышения урожайности растений и оптимизации различных биопромышленных производств. Так, солнечная радиация (включая СВЧ диапазон сверхнизкой интенсивности) является важнейшим экологическим фактором и оказывает естественное регулирующее влияние на биоритмы животных, растений и микроорганизмов, а следовательно, на физиолого-биохимические обменные процессы. Поэтому с помощью СВЧ воздействия нетепловой интенсивности можно управлять развитием биосистем в нужном для человека направлении для получения максимального полезного эффекта (например, в отношении растений это повышение урожайности, увеличение биомассы).

Речь может идти об обработке семян СВЧ электромагнитным полем на частоте 2450 МГц природной нетепловой интенсивности (10^{-8} - 10^{-10} Вт/м²), что не требует значительных энергетических затрат и громоздкой аппаратуры. Время облучения семян варьируется от 6 до 12 ч в зависимости от вида растений. Полезный результат – повышение всхожести растений.

Такой способ является надежным, экономичным, простым в осуществлении и может применяться как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Влияние СВЧ излучения низкой интенсивности на показатели прорастания семян проверяли на семенах ячменя сорта «Эльф» (1200 семян урожая 2002 г.) и гороха сорта «Глориоза» (600 семян урожая 2004 г.). Семена замачивали в дистиллированной воде в течение 12-24 ч, после чего их подвергали действию СВЧ излучения низкой нетепловой интенсивности в течение двух дней. Были выбраны 4 режима облучения: 1) 12ДО:12НП (двенадцатичасовое дневное СВЧ облучение (ДО), двенадцатичасовой ночной перерыв (отсутствие воздействия) (НП); 2) 12НО:12ДП (двенадцатичасовое ночное облучение, двенадцатичасовой дневной перерыв); 3) 6ДО:18НП (шестичасовое дневное облучение, восемнадцатичасовой ночной перерыв); 4) 3ДО:6ДП:3ДО:12НП (облучение в течение 3 часов, перерыв 6 ч, снова облучение в течение 3 ч, затем ночной покой 12 ч). В условиях постановки настоящих экспериментов исключался фотосинтез – прорастание проводили в темноте. Проращивание прекращали на пятый день.

Пример 1. Семена ячменя сорта «Эльф» и гороха сорта «Глориоза» подвергали действию СВЧ излучения низкой интенсивности (10^{-8} Вт/м²) при оптимальной частоте СВЧ-излучения 2450 МГц в течение 6 ч (режим 3). Проращивание семян и обработку результатов проводили согласно методике, указанной выше.

В результате проведенных исследований установлено, что непрерывный дневной режим облучения в течение 6 ч приводит к увеличению всхожести у гороха на $20,2 \pm 10,1\%$, у семян ячменя – на $9,8 \pm 6,1\%$.

Пример 2. Семена ячменя сорта «Эльф» облучали низкоинтенсивным СВЧ излучением (10^{-8} Вт/м²) с частотой излучения 2450 МГц в течение 12 ч (режим 2).

По окончании эксперимента установлено, что всхожесть семян ячменя при непрерывном ночном режиме облучения в течение 12 ч увеличивается на $16,6 \pm 8,8\%$.

Таким образом, проведенные исследования показали, что предлагаемый способ воздействия низкоинтенсивным СВЧ излучением является весьма эффективным.

В работах [4, 5] рассматриваются способы технологической подготовки семян к посеву, особенности влияния СВЧ электромагнитного поля на развитие микрофлоры зернового сырья для улучшения их качества и обеспечения безопасного потребления, а также обоснование энерготехнологического процесса и режимов СВЧ обеззараживания зернопродуктов для улучшения качества хлебных изделий и снижения энергозатрат.

Итак, проведенный информационный поиск свидетельствует об актуальности

проблемы дезинсекции в СВЧ электромагнитном поле.

Границы интервала электрической напряженности поля в импульсе определяются степенью зараженности семян гороха (фасоли) брухусом. На дезинсекцию семян гороха (фасоли) оказывает влияние их влажность. Верхняя и нижняя границы интервала частоты следования импульсов определяются влагосодержанием семян. В меньшей степени, чем частота следования импульсов и электрическая напряженность СВЧ электромагнитного поля в импульсе, влияет на эффективность дезинсекции длительность импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ дезинсекции и дезинфекции материалов зернового происхождения: пат. РФ 2321981 № 2006126335/13; заявл. 20.07.2006. Оpubл. 20.04.2008. 5 с.

2. Способ дезинсекции и дезинфекции материалов зернового происхождения и устройство для его осуществления: пат. РФ 2295848 № 2005113260/12; заявл. 2005.05.04. Оpubл. 27.03.2007. 13 с.

3. Способ СВЧ обработки семян: пат. РФ 2344590 № 2006136780/13; заявл. 16.10.2006. Оpubл. 27.01.2009. 4 с.

4. **Коман О.А.** Особенности влияния электромагнитного поля СВЧ на развитие микробов зерна и продуктов его переработки: автореферат: 03.00.16 / О.А. Коман. Красноярск: КГУ, 2004. 20 с.

5. **Цугленок В.Н.** Обоснование технологического процесса и эффективных режимов СВЧ обеззараживания зерна при производстве зернового хлеба: автореф. ... дис.... канд. с/х наук: 05.20.02 / В.Н. Цугленок. Красноярск: КГУ, 2004. 28 с.

Степаненко Владислав Владимирович – студент магистратуры Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кожевников Вячеслав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladislav V. Stepanenko – Master student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav Yu. Kozhevnikov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

COMPETITIVE CAPACITY AND EXPEDIENCY OF CONTINUOUS MICROWAVES IN ELECTROTECHNOLOGICAL DEVICES

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelsky

Рассмотрены вопросы конкурентоспособности и целесообразности применения методических СВЧ электротермических установок. Определены пути повышения конкурентоспособности методических СВЧ электротермических установок и порядок принятия решения о целесообразности проектирования одного из варианта таких установок.

Ключевые слова: конкурентоспособность, целесообразность применения, методические СВЧ электротермические установки, энергетическая эффективность, экономическая эффективность, сравнительный экономический эффект

Технико-экономические расчеты показывают, что СВЧ электротермические установки не имеют безоговорочного преимущества перед установками с альтернативным энергоподводом [1, 2], но повышение конкурентоспособности термообработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле позволяет реализовать известные преимущества этого способа нагрева. В условиях рыночной экономики в этом случае надо говорить о повышении экономической эффективности [3], когда при технико-экономических расчетах проводят сравнение экономических эффективностей сравниваемых вариантов технологических установок:

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{СВЧ}} - \mathcal{E}_{\text{ТТ}},$$

где $\mathcal{E}_{\text{СВЧ}}$, $\mathcal{E}_{\text{ТТ}}$ – экономические эффективности СВЧ и теплотехнологической установок [4].

The article considers the issues related with competitiveness and expediency of continuous microwaves used in electric heaters. The ways for increasing competitive capacity of continuous microwaves in electric heaters, and the decision making procedure concerning practicality of the design project for one of the types of these devices are determined

Keywords: competitiveness, expediency of application, continuous microwaves in electric heaters, energy efficiency, economic efficiency, comparative economic effect

Достижение $\mathcal{E}_{\text{СВЧ max}}$ возможно путем оптимизации структуры и параметров методической СВЧ электротермической установки (методической СВЧ ЭТУ), при этом одним из основных параметров СВЧ ЭТУ является энергетическая эффективность. Надо подчеркнуть, что не следует делать ставку исключительно на повышение энергетической эффективности [4]: установки нетепловой СВЧ модификации полимеров имеют весьма малую энергетическую эффективность (малый КПД), но выпускаемая продукция (например, модифицированные полимерные материалы) дает достойную прибыль [5].

Существенного повышения конкурентоспособности методических СВЧ ЭТУ можно достичь, совершенствуя ценовую политику на рынке СВЧ ЭТУ.

Наконец, конкурентоспособность методических СВЧ ЭТУ будет выше, если будут приняты меры повышения энергетической эффективности методических СВЧ ЭТУ на стадии эксплуатации.

Что касается целесообразности применения методических СВЧ ЭТУ, то с этой проблемой проектировщики сталкиваются при необходимости принять решение о предпочтении, которое надо отдать тому или другому варианту методической СВЧ ЭТУ еще на стадии проектирования. Рассмотрим эту проблему подробнее.

Пусть речь идет о выборе одного из пяти вариантов построения методических СВЧ ЭТУ с рабочими камерами с бегущей волной (КБВ), собранных на прямоугольном волноводе сечением 45×90 мм и работающих на частоте 2450 МГц, когда транспортные системы работают в толкательном режиме [6], перемещая обрабатываемые диэлектрики в рабочей камере с заданной производительностью Π (рис. 1).

Вариант 1 (рис. 1 а). В установке одна КБВ, один источник СВЧ энергии мощностью P_1 , один электропривод с электродвигателем мощностью $P_{э1}$.

Вариант 2 (рис. 1 б). В установке две КБВ, два источника СВЧ энергии мощностью P_2

каждый, два электропривода с электродвигателями мощностью $P_{э2}$ каждый.

Вариант 3 (рис. 1 в). В установке две КБВ, один источник СВЧ энергии мощностью P_3 с делителем СВЧ мощности, два электропривода с электродвигателями с одинаковой мощностью $P_{э3}$ каждый.

Вариант 4 (рис. 1 г). В установке две КБВ, один источник СВЧ энергии мощностью P_4 каждый, один электропривод с электродвигателем мощностью $P_{э4}$, обеспечивающий перемещение диэлектриков в обеих камерах.

Вариант 5 (рис. 1 д). В установке две КБВ, один источник СВЧ энергии мощностью P_5 с делителем СВЧ мощности, один электропривод с электродвигателем мощностью $P_{э5}$, обеспечивающий перемещение диэлектриков в обеих камерах.

Решение о целесообразности применения того или иного варианта можно принять с помощью сравнительного интегрального эффекта

$$\Delta \mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E}_{СВЧi} - \mathcal{E}_{СВЧj}, \quad (1)$$

где i, j – номера сравниваемых вариантов, и если расчет $\mathcal{E}_{СВЧ}$ проводится на интервале в один год, после чего эксплуатация установки продолжается, то [3]

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{СВЧ} = & \left\{ \left[(\Pi - \Pi_n) \Pi - C_c \right] (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) - C_{э} (1 - \gamma_n) - C_{э} (1 - \gamma_n - \gamma_{эп}) - \right. \\ & \left. - C_{бр} (1 - \gamma_n) - K \left[1 + i_{кр} + \gamma_{им} + (\gamma_{зч} + \gamma_a) (1 - \gamma_n) \right] \right\} (1 - \gamma_y). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь Π , Π – количество и цена единицы продукции, выпускаемой методической СВЧ ЭТУ; Π_n – потери продукции при ремонте установки; C_c – затраты на сырье; $C_{э}$ – затраты на электричество и воду (при водяном охлаждении СВЧ генератора); $C_{эп}$ – затраты на зарплату; $C_{бр}$ – затраты на брак (начальный и конечный, если обрабатываемый объект, находившийся в рабочей камере в моменты включения или выключения установки, не подлежит повторному нагреву); K –

капиталовложение; γ_n , $\gamma_{ндс}$ – коэффициенты, учитывающие налоги на прибыль и на добавочную стоимость; $\gamma_{эп}$ – коэффициент, учитывающий начисления на зарплату; $i_{кр}$ – банковский процент; $\gamma_{им}$ – коэффициент, учитывающий налоги на имущество; $\gamma_{зч}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на запасные части; γ_a – коэффициент, учитывающий затраты на амортизацию; γ_y – коэффициент, учитывающий выплату дивидендов.

С учетом (2) соотношение (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{ij} = & \left\{ \Pi \Delta \Pi_{nji} (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) + \Delta C_{эji} (1 - \gamma_n) + \Delta C_{эпji} (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) + \Delta C_{брji} (1 - \gamma_n) + \right. \\ & \left. + \Delta K_{ji} \left[1 + i_{кр} + \gamma_{им} + (\gamma_{зч} + \gamma_a) (1 - \gamma_n) \right] \right\} (1 - \gamma_y). \end{aligned} \quad (3)$$

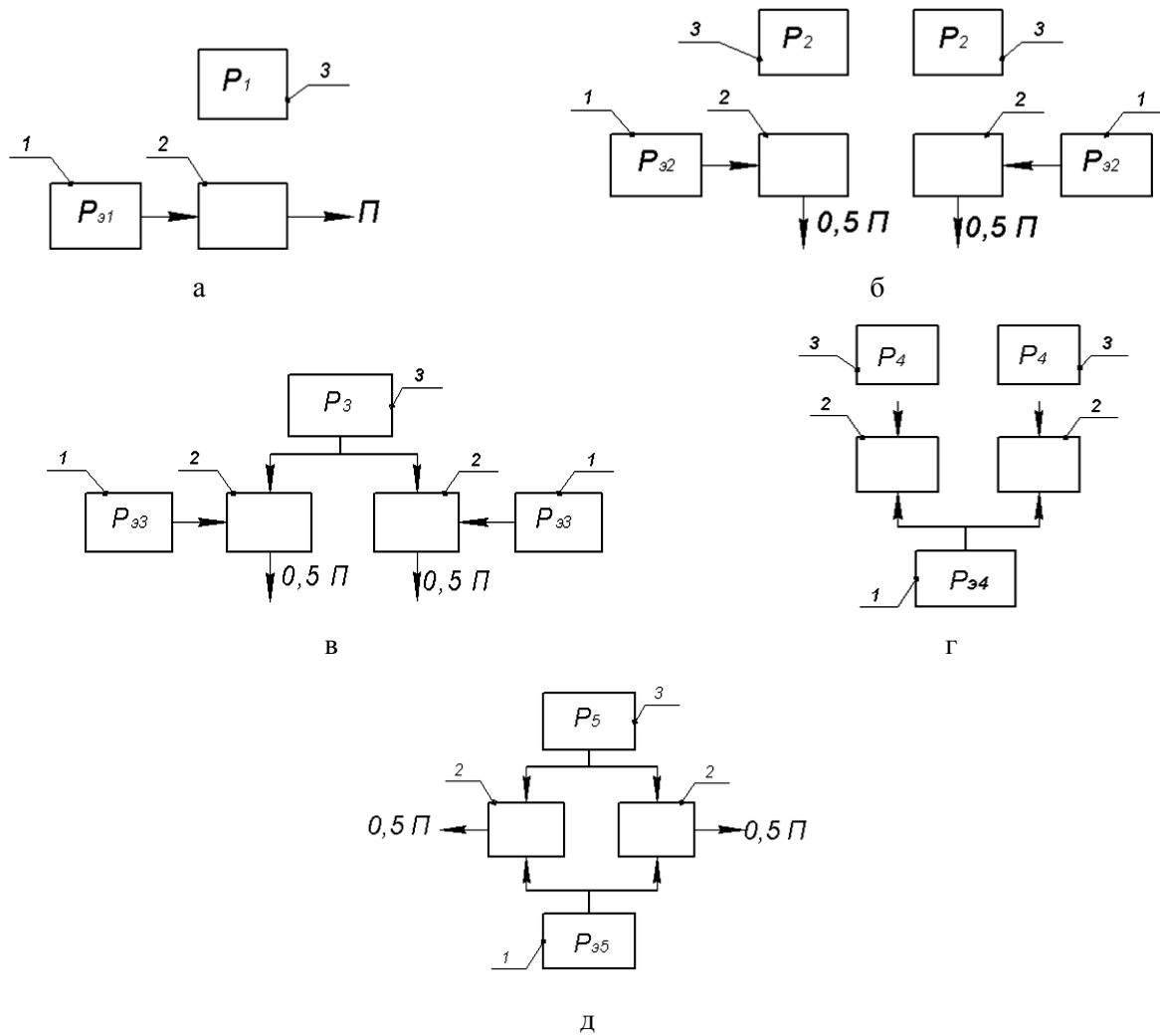


Рис. 1. Методические СВЧ электротермические установки: а – одна установка; б – две установки; в-д – две установки с общими элементами (1 – электропривод; 2 – КБВ; 3 – источник СВЧ энергии)

где $\Delta P_{nji} = P_{njm} - P_{ni}$; $\Delta C_{эji} = C_{эj} - C_{эi}$; $\Delta C_{зnji} = C_{зnj} - C_{зni}$; $\Delta C_{брji} = C_{брj} - C_{бри}$; $\Delta K_{ji} = K_j - K_i$, и если $\Delta \mathcal{E}_{ij} > 0$, то целесообразен вариант i , а если $\Delta \mathcal{E}_{ij} < 0$, то целесообразен вариант j .

Так как сравнение вариантов методических СВЧ ЭТУ следует проводить при заданной производительности Π (рис. 1), то $P_1 = P_3 = P_5$, $P_2 = P_4 = 0,5P_1$, а также [6] $P_{э2} = P_{э3} = 0,5P_{э1}$, $P_{э1} = P_{э4} = P_{э5}$. В таком случае $\Delta C_{эji} = 0$. Уточнение этого вывода может дать учет разницы КПД и затрат на водяное или воздушное охлаждение генераторов, генерирующих СВЧ мощность P_1 и $0,5P_1$.

Если загрузка – выгрузка обрабатываемого объекта автоматизирована, то $\Delta C_{зnji} = 0$, а если обрабатываемый объект,

находящийся в КБВ в моменты включения и выключения методической СВЧ ЭТУ, может быть обработан заново, то $\Delta C_{брji} = 0$. Если же этого делать нельзя, то в вариантах 2-5 (в установке две КБВ) в этом случае $\Delta C_{брji} = 2V\mathcal{C}n$, где V – объем обрабатываемого объекта в КБВ; $\mathcal{C}$ – цена единицы готовой продукции; n – число включений и выключений ЭТУ в год. В этом случае наименьшая величина $C_{бр}$ будет в варианте 1 (в установке одна КБВ). Заметим, что КБВ, собранные на одном и том же волноводе, работающие на одной и той же частоте, обрабатывающие один и тот же диэлектрик, но с разной производительностью, имеют одну и ту же геометрию и, следовательно, одну и ту же цену.

Таким образом, при $\Delta C_{эji} = \Delta C_{зnji} = \Delta C_{брji} = 0$ соотношение (3) упрощается:

$$\Delta \mathcal{E}_{ij} = \left\{ \mathcal{C} \Pi_n (1 - \gamma_n - \gamma_{\text{нос}}) + \Delta K_{ji} \left[1 + i_{\text{кр}} + \gamma_{\text{им}} + (\gamma_{\text{зч}} + \gamma_a)(1 - \gamma_n) \right] \right\} (1 - \gamma_y), \quad (4)$$

так что знак ΔC_{ji} , определяющий целесообразность применения варианта i или j , определяется, как правило, знаком ΔK_{ji} . Пусть в (4)

$$\Delta K_{ji} = (K_{2j} - K_{2i}) + (K_{2pj} - K_{2pi}) + (K_{unj} - K_{uni}) + (K_{2pkj} - K_{2pki}) + (K_{эj} - K_{эi}), \quad (5)$$

где K_2 – стоимость СВЧ генератора (генераторов) методической СВЧ ЭТУ; K_{2p} – стоимость резервного СВЧ генератора мощностью P_1 или $0,5 P_1$; K_{un} – стоимость источника (источников) питания СВЧ генератора (генераторов); K_{pk} – стоимость рабо-

чей камеры (рабочих камер); $K_э$ – стоимость электродвигателя электропривода (электродвигателей электроприводов).

На рис. 2 приведены зависимости $K_2(P)$; $K_{un}(P)$; $K_{pk}(f)$; $K_э(P_э)$.

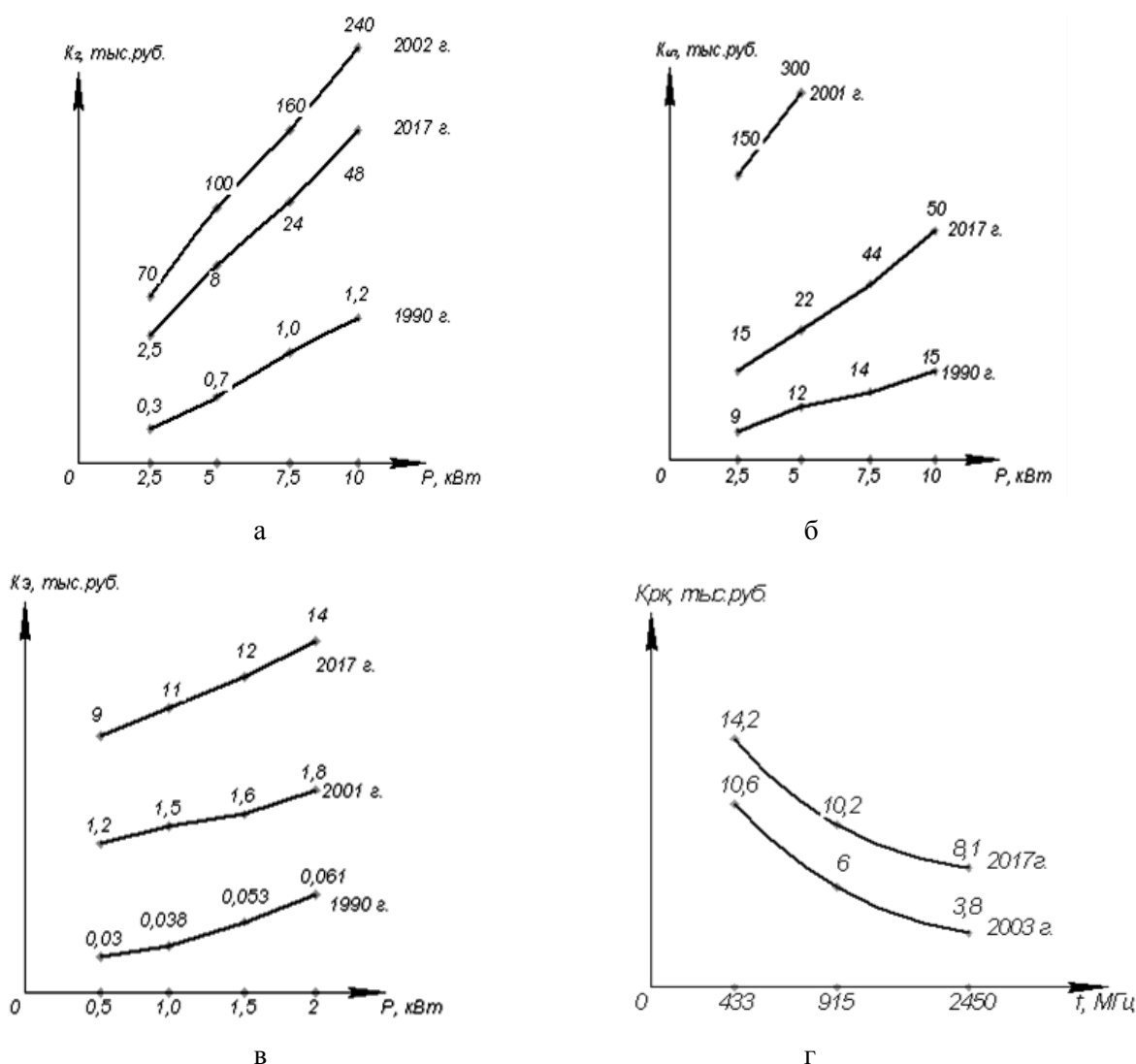


Рис. 2. Цены элементов методических СВЧ ЭТУ: а – цены магнетронов; б – цены источников питания магнетронов; в – цены электродвигателей электропривода; г – цены КБВ

Таким образом, соотношения (2)-(4) позволяют оценить конкурентоспособность методической СВЧ ЭТУ, эффектив-

ность предлагаемых мер по повышению ее конкурентоспособности и принять решение о целесообразности применения

того или иного варианта методической СВЧ ЭТУ на стадии ее проектирования. Решающее значение при этом имеют затраты, которые предстоят при реализации

проекта, и в первую очередь – зависимости цены элементной базы установки от мощности и частоты СВЧ электромагнитных колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаева Т.Ю. Техно-экономическое сравнение СВЧ и тепловой сушилок диэлектрических материалов / Т.Ю. Дунаева, Ю.С. Архангельский // Радиотехника и связь: сб. науч. тр. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. С. 278-288.

2. Дунаева Т.Ю. Общие принципы рационального подхода к выбору СВЧ установок для сушки зерна и семян / Т.Ю. Дунаева // Вестник СГТУ. 2007. № 4 (29). С. 39-43.

3. Архангельский Ю.С. Техно-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 147 с.

4. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 282 с.

5. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

6. Архангельский Ю.С. Толкательная СВЧ электротермическая установка на базе камеры с бегущей волной / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.

Юдина Виолетта Олеговна – аспирантка кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Violetta O. Yudina – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yury S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

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.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681.171.5

РЕКУРРЕНТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПАССАЖИРСКОГО ЭЛЕКТРОВОЗА СЕРИИ ЭП1 С ПОВЫШЕННЫМ ОТРАБОТАННЫМ РЕСУРСОМ

И.А. Менщиков, С.И. Баташов

RECURSIVE PARAMETER ESTIMATION APPLIED TO ELECTRIC TRACTION MACHINES OF THE EP1 PASSENGER ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH IMPROVED SERVICE LIFE

I.A. Menshikov, S.I. Batashov

Приведены результаты оценки технического состояния тяговых электрических машин пассажирского электровоза серии ЭП1 с повышенным отработанным ресурсом, полученные с помощью имитационного моделирования ТЭД в пакете MATLAB & SIMULINK, базирующегося на использовании математических моделей электрических машин постоянного тока и выбранных наиболее информативных контролируемых параметров функционирования тягового электродвигателя.

Ключевые слова: пассажирский электровоз, тяговый электродвигатель, моделирование

Для электроподвижного состава с повышенным отработанным ресурсом большое значение имеет автоматизированный контроль технического состояния изоляции обмоток тяговых электрических машин (ТЭД), качества коммутации тока в цепи якоря и состояние подшипникового узла. 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.

The article presents the assessment results of the technical condition of electric traction machines installed in passenger electric locomotives of the EP1 series characterized for improved service life. These results were received using the TED simulation modeling packaged in MATLAB & SIMULINK. The simulation is based on mathematical modeling of DC machines and most informative monitored operation parameters of the traction motor.

Keywords: passenger electric locomotive, traction motor, modeling, amplitude-frequency characteristics

Дефекты несквозного характера (отслоения, экструзия) практически не снижают пробивного напряжения изоляции и не имеют тенденции к быстрому развитию. ТЭД с такими повреждениями может безаварийно работать длительное время, тогда как автоматизированный бортовой контроль и техническая диагностика с помощью контролируемых параметров (тока в цепи якоря I_p , угловой частоты вращения ротора ТЭД ω_a , вида корней характеристического уравнения переходного процесса пуска ТЭД P , электромагнитного момента

на валу ротора $M_{эм}$), чувствительных к любым неоднородностям изоляции и качеству коммутации, позволяет определить состояние обмотки возбуждения, якоря, состояние коллекторного – щеточного узла и принять решение для проведения профилактического обслуживания и ремонта ТЭД [1-3]

С помощью имитационного моделирования амплитудно-частотных характеристик формы тока и напряжения в цепи якоря ТЭД с повышенным отработанным ресурсом типа НБ-520 определим его техническое состояние (рис. 1) [2, 3].

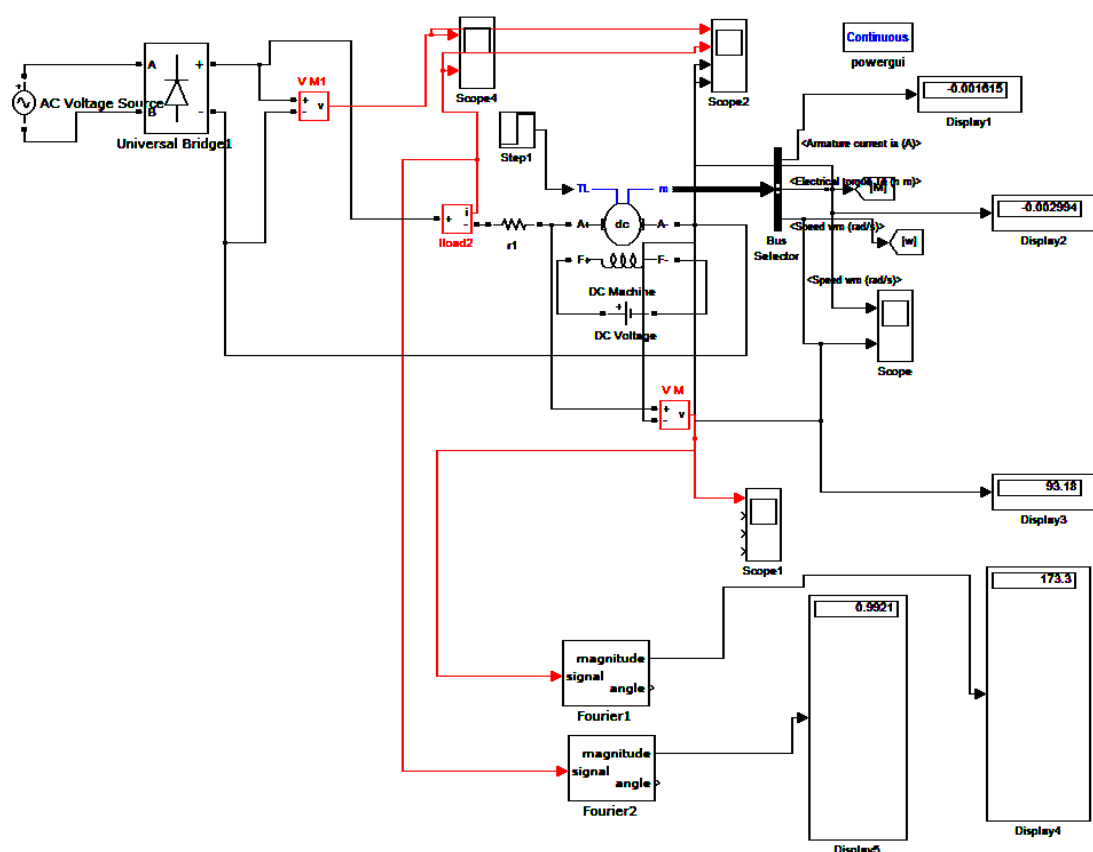


Рис. 1. Виртуальная имитационная модель амплитудно-частотных характеристик диагностических параметров ТЭД типа НБ-520 с повышенным отработанным ресурсом

План проведения и результаты моделирования устойчивости ТЭД с повышенным отработанным ресурсом представлены в табл. 1.

Таблица 1

План проведения и результаты моделирования устойчивости ТЭД с повышенным отработанным ресурсом

Номер опыта	Планирование				Результат, устойчивое состояние
	X0	X1	X2	X3	Y1
		U_a , В	M_C , Н _м	I_B , А	$I_{ан}^{(3)}$, А _{мп.}
1	+1	-1	-1	-1	647,2
2	+1	+1	-1	-1	647,3
3	+1	-1	+1	-1	735,3
4	+1	+1	+1	-1	735,9
5	+1	-1	-1	+1	539,5
6	+1	+1	-1	+1	539,4
7	+1	-1	+1	+1	612,7
8	+1	+1	+1	+1	612,8

План проведения и результаты экспериментального исследования неустойчивости состояния ТЭД с повышенным отработанным ресурсом представлены в табл. 2.

Для определения амплитуды и фазы тока и напряжения в цепи якоря ТЭД

необходимо в параметрах блока Fourier задать базовую частоту и номер гармоник. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Таблица 2

План проведения и результаты эксперимента исследования неустойчивости состояния электромеханического оборудования

Номер опыта	Планирование				Результат, неустойчивое состояние
	X0	X1	X2	X3	Y1
		$U_a, В$	$M_C, Н_м$	$I_B, А$	$I_{an}^{(3)}, А_{мп.}$
1	+1	-1	-1	-1	846,9
2	+1	+1	-1	-1	722,1
3	+1	-1	+1	-1	1023
4	+1	+1	+1	-1	922,9
5	+1	-1	-1	+1	222,1
6	+1	+1	-1	+1	236
7	+1	-1	+1	+1	531,3
8	+1	+1	+1	+1	254,5

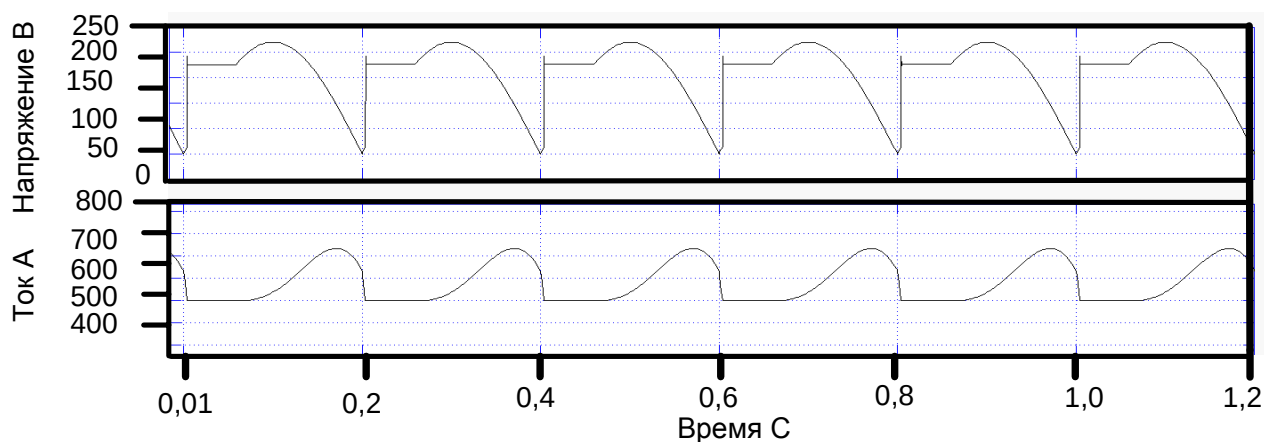


Рис. 2. Графики зависимости напряжения и тока от времени в цепи якоря ТЭД типа НБ-520

В результате получено уравнение регрессии устойчивого состояния ТЭД типа НБ-520, имеющее следующий вид:

$$y_1 = 633,763 + 0,087X_1 + 40,412X_2 - 57,662X_3 + 0,088X_1X_2 - 0,088X_1X_3 - 3,762X_2X_3 - 0,038X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Уравнение регрессии в относительных единицах для устойчивого состояния ТЭД типа НБ-520 имеет вид

$$I_a = 633,763 + 0,0948U_a + 42,957 M_{ЭЛ} - 50,742 I_B + 0,00897 U_a \cdot M_{ЭМ} - 0,00613 U_a I_B - 11,582 M_{ЭМ} I_B - 0,0000404 U_a M_{ЭМ} I_B. \quad (2)$$

Уравнение регрессии неустойчивого состояния ТЭД типа НБ-520 имеет вид

$$y_1 = 594,85 - 60,975 X_1 + 88,075 X_2 - 283,875 X_3 - 33,25 X_1 X_2 - 4,75 X_1 X_3 - 6,15 X_2 X_3 - 39,425 X_1 X_2 X_3. \quad (3)$$

Уравнение регрессии в относительных единицах для неустойчивого состояния ТЭД типа НБ-520 имеет вид

$$I_a = 594,85 - 54,87 U_a + 93,62 M_{ЭМ} - 249,81 I_B - 925,35 U_a M_{ЭМ} - 17,86 U_a I_B - 30,95 M_{ЭМ} I_B - 45136,01 U_a M_{ЭМ} I_B. \quad (4)$$

Итак, для оценки диагностических параметров информация в виде выборочных, упорядоченных во времени значений диагностических параметров (временных рядов) обрабатывается последовательно. На каждом шаге рекуррентных вычислений полученные на предыдущем шаге оценки обновляются с учетом новых значений измеряемых диагностических параметров,

поступивших за очередную единицу времени. Это означает, что при рекуррентных вычислениях статистическая база оценивания расширяется вместе с продвижением модели во времени.

Достоинством рекуррентных вычислений является получение диагностических параметров оценки прогнозирования отказов ТЭД электромеханических систем.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем

на ПК / С.Г. Герман-Галкин. М.: Корона Век, 2011. 368 с.

3. Менщиков И.А. Эффективные методы автоматизации контроля технического состояния электромеханических систем / И.А. Менщиков. Саратов: Изд. центр «Наука», 2014. 141 с.

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

Баташов Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта

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

Sergei I. Batashov – PhD, Associate Professor Department of Traction Equipment, Russian University of Transport

Статья поступила в редакцию 15.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ЭР-9^Т
С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НАГРУЗОЧНОГО СТЕНДА
НА СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ
НТЦ ТРАНСПОРТ 441549.014РЭ**

И.А. Менщиков

**INVESTIGATION OF THE CURRENT CHARACTERISTIC
OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS IN ER-9T ELECTRIC TRAINS
USING THE AUTOMATED LOAD STAND BASED ON STATIC
CONVERTERS STC TRANSPORT 441549.014 RE**

I.A. Menshikov

Приведены результаты исследования проблемы диагностирования тяговых электрических машин электропоезда переменного тока серии ЭР-9^Т с помощью автоматизированного нагрузочного стенда на статических преобразователях НТЦ ТРАНСПОРТ 441549.014РЭ. Проблему оценки работоспособности тяговых электрических машин предлагается решать с помощью количественного анализа информативности диагностических признаков распознавания образов и построения разделяющей функции. С помощью математической обработки диагностической информации получены наиболее информативные признаки распознавания образов, которые могут использоваться в автоматизированной системе адаптивного мониторинга электромеханических систем для прогнозирования неустойчивого функционирования электроподвижного состава.

Ключевые слова: электроподвижной состав, тяговый электропривод, теория распознавания образов, техническая диагностика

Для количественного анализа информативности признаков, а также построения разделяющей функции необходимо располагать статистическими данными признаков, к которым относятся непрерывные за-

The article presents the results of research into diagnostics of traction electric machines of electric trains in the alternating current series ER-9T with automated load stand for static converters STC TRANSPORT 441549.014 re. The problems of efficiency assessment of traction electric machines can be resolved by means of quantitative analysis of information depth of diagnostic features for pattern recognition and construction of the discriminant function. Using mathematical treatment for the diagnostic data we obtained most informative features for pattern recognition that can be used in automated adaptive monitoring of electromechanical systems to predict unstable operation of the electric rolling stock.

Keywords: electric rolling stock, electric traction, theory of pattern recognition, technical diagnostics.

коны распределения и их моменты. Эти данные были получены в процессе исследования токовых характеристик тяговых электродвигателей (ТЭД) РТ-51М с помощью снятия осциллограмм токов в цепи

якоря испытуемых ТЭД электропоезда серии ЭР-9^т в пусковом и установившемся режимах с помощью автоматизированного нагрузочного стенда на статических преобразователях для испытания тяговых двигателей электропоездов НТЦ Транспорт 441549.014РЭ.

Автоматизированный нагрузочный стенд на статических преобразователях для испытания тяговых двигателей предназначен для проведения прямо-сдаточных ис-

пытаний ТЭД в части реализации нагрузочных режимов, предусмотренных ГОСТ 2582-81 и правилами ремонта.

Нагружение испытуемых ТЭД осуществляется по методу возвратной работы с использованием схемы взаимной нагрузки двух ТЭД, соединенных муфтой. Внешний вид испытательного поста стенда изображен на рис. 1. Структурная схема стенда показана на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид испытательного поста стенда

Измерительные средства стенда (имеются сертификат соответствия и регистрация в реестре средств измерения) позволяют проводить измерения тока, напряжения и частоты вращения двигателя. Необходимый токовый режим машин создается вольтодобавочным статическим преобразователем ВДП170, компенсирующим электрические потери в системе испытуемых двигателей. Режим напряжения обеспечивается линейным статическим преобразователем ЛП1000, возмещающим потери холостого хода, добавочные и магнитные потери в тяговых электродвигателях.

В режиме управления испытаниями от ПЭВМ имеется возможность автоматического измерения активного сопротивления обмоток двигателей, а также автоматического измерения сопротивления изоляции двигателей. При наличии прибора

определения коммутации тяговых двигателей на испытательном стенде система автоматического управления испытаниями позволяет считывать информацию с прибора о классе коммутации. Система автоматического управления имеет возможность мобильного обновления конфигурации для решения изменившихся задач и условий испытаний тяговых двигателей.

Для питания силовой части стенда используется трехфазная сеть с линейным напряжением 380 В частотой 50 ± 1 Гц.

Основной особенностью электрической части стенда является замена вращающихся линейного и вольтодобавочного преобразователей (ЛП и ВДП) статическими преобразователями на тиристорах. На рис. 3 представлен внешний вид шкафа управления стендом, а на рис. 4 – внешний вид управления стендом.

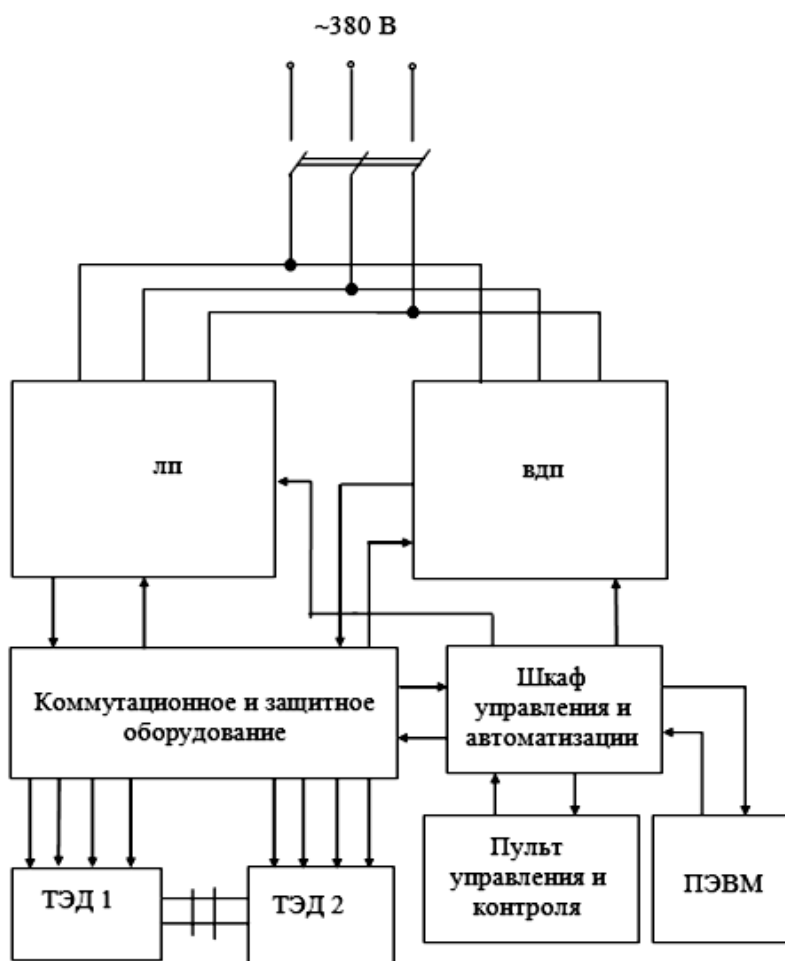


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда

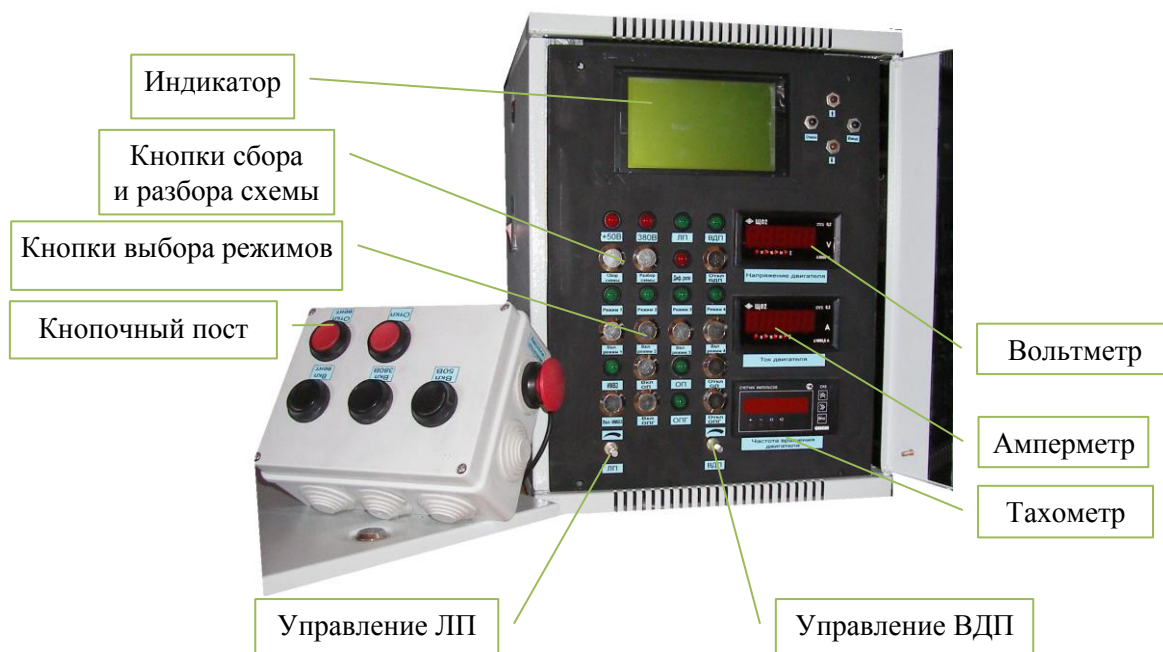


Рис. 3. Внешний вид шкафа управления стендом

Объектами исследований, проведенных на испытательном стенде, были тяговые

электродвигатели с параметрами, представленными в табл. 1.



Рис. 4. Внешний вид пульта управления и контроля испытательного стенда НТЦ Транспорт 441549.014РЭ

Таблица 1

Параметры испытываемых тяговых электродвигателей электропоезда ЭР-9^т

Тип ТЭД	Мощность, кВт	Часовой ток, А	Обороты при часовом токе, об./мин	Максимальные обороты испыт., об./мин	Напряжение на коллекторе, В	Сопротивление якоря при 20°C, Ом	Сопротивление обмоток гл. полюсов при 20°C, Ом	Сопротивление обмоток доп. полюсов при 20°C, Ом	Ослабление поля до, %	Сопротивление изоляции, МОм
РТ-51М	200	266	1140	2600	825	0.053	0.127	0.025	32	>100
РТ-51Д	200	266	1140	2600	825	0.053	0.127	0.025	50	>100
ТЭД-2У1	235	345	1250	2900	750	0.05	0.102	0.018	20	
ТЭД-3У1	220	295	870	3025	825	0.05	0.102	0.018	25	>100
1ДТ.003.3У1	225	330	1290	3020	750	0.0562 +/-0.0032	0.0878	0.017 +/-0.001	20	>100
1ДТ.003.4У1	225	245	1290	3020	750	0.0562 +/-0.0032	0.102	0.017 +/-0.001	20	

Испытуемые ТЭД электропоезда ЭР9^т номинальным напряжением 850 В работали в двигательном и генераторном режимах. ТЭД имели сменяемые роторы: № 1 РТ-51М с исправным якорем, № 2 РТ-51Д с нарушением условий коммутации, приводящим к появлению высокочастотных электромагнитных помех в спектре тока якоря, возникновению искрения и появлению кругового огня по коллектору, № 3 ТЭД-2У1 с неисправностью (межвитковое замыкание одной

секции обмотки якоря), приводящей к высокочастотным колебаниям магнитного потока и тока якоря, возникновению высокочастотных электромагнитных помех и образованию кругового огня по коллектору якоря.

ТЭД в режиме двигателя были загружены через специальную муфту с ТЭД той же серии, работающей в генераторном режиме. Ниже показаны осциллограммы тока якоря в различных режимах функционирования с различными диагнозами (рис. 5-7).

Во время производственных исследований ТЭД серии РТ51М на испытательном стенде были установлены следующие электрические параметры: напряжение главных полюсов $U_{zn} = 751,4$ В; напряжение дополнительных полюсов $U_{dn} = 736$ В; напряжение на якоре ТЭД $U_{я} = 729,7$ В; ток в цепи главных полюсов возбуждения $I_{zn} = 265$ А; ток в цепи якоря $I_{я} = 264$ А; частота вращения вала $n = 1000$ об/мин. Статический момент нагрузки изменялся от максимального $M_{max} = 1910$ Нм до минимального $M_{min} = 734,9$ Нм с увеличением электрической нагрузки в цепи ТЭД, функционирующего в режиме генератора.

Протокол испытания тягового электродвигателя типа ТЭД-ЭУ1 электропоезда ЭР9^Т в локомотивном депо Анисовка Приволжской ж.д. представлен в табл. 2.

Результаты производственных испытаний ТЭД электропоезда ЭР-9^Т, проведенных на испытательном стенде НТЦ ТРАНСПОРТ 441549.014РЭ в локомотивном депо станции Анисовка Приволжской ж.д., представлены в табл. 3 и 4.

При различных видах повреждений обмотки якоря гармоники тока могут быть многочисленными, амплитуда колебаний магнитного потока в воздушном зазоре и амплитудное значение тока якоря в несколько раз выше номинального значения.

Поскольку частоты гармоник тока якоря и магнитного потока в воздушном зазоре при заданном статическом моменте на валу ротора точно определены, уровень повреждения характеризуют только изменения их амплитуд [1, 2].

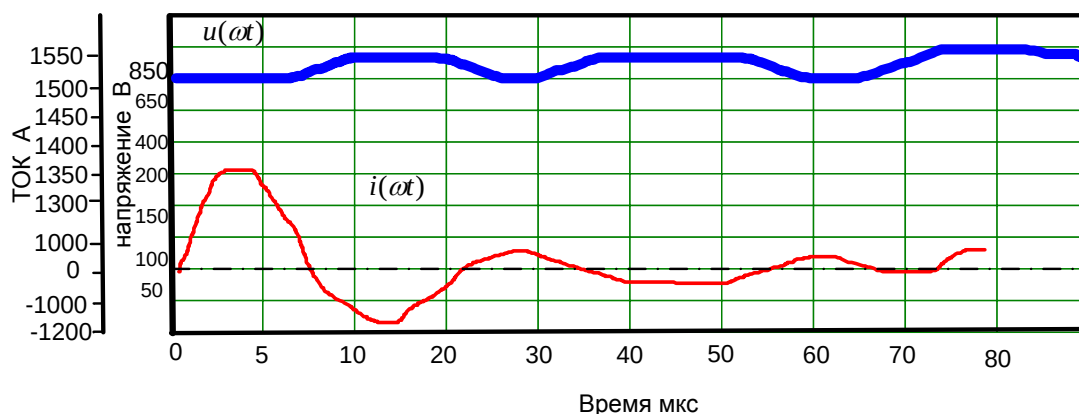


Рис. 5. Осциллограммы тока исправного якоря РТ51М

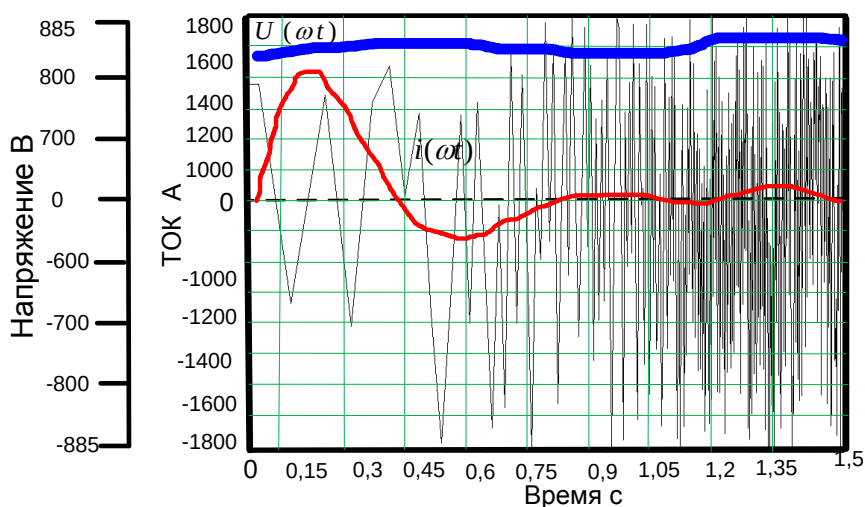


Рис. 6. Осциллограммы тока РТ51Д с нарушением условий коммутации якоря

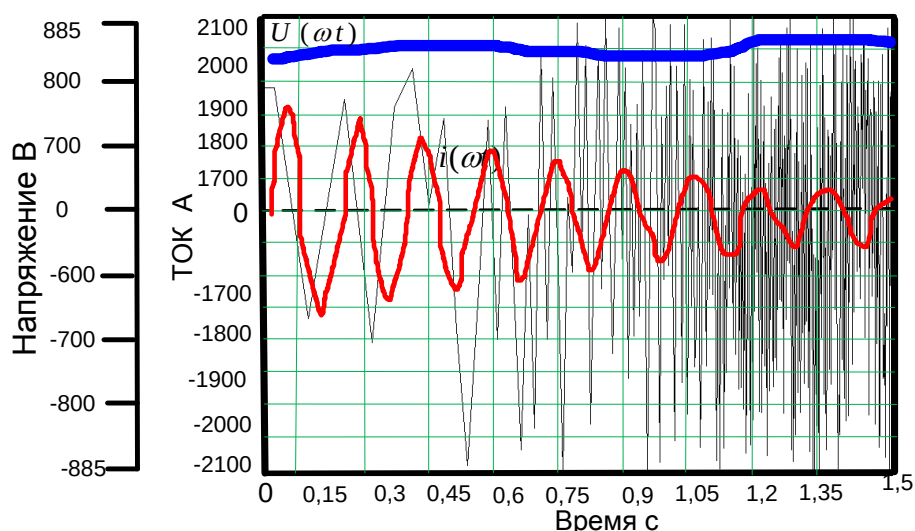


Рис. 7. Осциллограммы тока PT51Д с межвитковым замыканием секции обмотки якоря

Таблица 2

 Протокол испытания тяговых электрических машин электропоезда ЭР9^Т
Протокол испытаний

Номер якоря		304		
Номер остова		480627		
Дата и время		17.08.2014 13:18:02		
Оператор		Хурдин М.В.		
Тип двигателя		ТЭД-3У1		
Номер в испытании		2		
Технические данные		Норматив	Результат	Соответствие
Температура при проведении испытаний, °С		20,0°С	26	
Сопротивление обмоток при 20°С, Ом	якорных	0,0500±10,0%	0,0502	+
	доп. полюсов	0,0179±10,0%	0,0194	+
	гл. полюсов	0,1020±10,0%	0,1100	+
Сопротивление изоляции в «холодном состоянии» относительно, МОм	корпуса и якорной обмотки	> 0,5	100,0	+
	обмоток якоря и возбуждения	> 0,5	100,0	+
	корпуса и обмотки возбуждения	> 0,5	100,0	+
Обороты при часовом токе и напряжении		870±3,0%	869	+
Разница оборотов при реверсировании		4,0%	3	+
Сопротивление обмоток после испытания на нагрев, Ом	якорных	0,0775	0,0695	
	доп. полюсов	0,0288	0,0274	
	гл. полюсов	0,1640	0,1650	
Температура обмоток после испытания на нагрев, °С	якорных	140	69,00	+
	доп. полюсов	155	90,00	+
	гл. полюсов	155	107,00	+
Сопротивление изоляции в «горячем состоянии» относительно, МОм	корпуса и якорной обмотки	> 0,5	100,0	+
	обмоток якоря и возбуждения	> 0,5	100,0	+
	корпуса и обмотки возбуждения	> 0,5	100,0	+
Степень искрения щеток в режиме коммутации		≤ 1,5	1,5	+
Испытание на повышенную частоту вращения		исправен	исправен	+
Температура подшипников после испытаний, °С		≤ 80,0°С	58	+
Мощность, кВт		220	220	

Таблица 3

Информационные признаки распознавания РТ-51М
в исправном состоянии обмоток якоря и главных полюсов

№	Y ₁	Y ₃	Y ₆	Y ₈	Y ₁₀
1	1585	2470	0,48	0,25	0,09
2	1546	1222	6691	1,16	0,06
3	1507	409	0,77	1,19	0,04
4	1467	26	0,54	0,37	0,01
5	1428	93	2231	0,48	–0,02
6	1389	594	0,54	0,40	–0,04
7	1356	1358	0,48	0,50	–0,07
8	1350	1530	1116	1,33	–0,07
$\bar{m}$	1454	963	38724461	0,71	0,00
σ^2	44740	4619141	0,48	1,02	0,02

Таблица 4

Информационные признаки распознавания РТ51М
при межвитковом замыкании секции якоря

№	Y ₁	Y ₃	Y ₆	Y ₈	Y ₁₀
1	1921	1643	0,35	0,21	–0,05
2	1993	183	0,48	0,90	–0,02
3	1993	183	6691	0,90	–0,02
4	1993	183	0,77	0,28	–0,02
5	1993	183	0,54	0,34	–0,02
6	1993	183	2231	0,28	–0,02
7	1993	183	0,54	0,34	–0,02
8	2350	14789	0,48	0,77	0,16
$\bar{m}$	2028	2191	1116	0,50	0,00
σ^2	33960	$4,7 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	0,57	0,01

Анализируя осциллограммы токовых характеристик, можно сделать вывод, что при исправном состоянии якорных катушек ТЭД имеется небольшое количество гармо-

ник в осциллограмме тока, а при неисправном состоянии возникают высокочастотные гармоники тока якоря ТЭД.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Волков А.К. Повышение эксплуатационной надёжности тяговых двигателей / А.К. Волков, А.Г. Суворов. М.: Транспорт, 1988. 128 с.

Меншиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Статья поступила в редакцию 15.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314.58

НЕСИММЕТРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЁХФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ. ПРИЧИНЫ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

П.А. Кошелев, С.В. Парамонов

CAUSES AND QUANTITATIVE ANALYSIS FOR THE ASYMMETRY OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THREE-PHASE TRANSFORMERS

P.A. Koshelev, S.V. Paramonov

Рассмотрены причины несимметрии электромагнитных процессов в трёхфазном трансформаторе симметричной конструкции, представлен анализ количественных характеристик процессов. Предложены способы компенсации несимметричных режимов, основанные на модификации технологии изготовления магнитопровода и обмоток.

В расчётах использовались математические модели, созданные на основе символьных преобразований MAPLE 12 и численных вычислений MATLAB R10. Приведены примеры.

Ключевые слова: силовой трёхфазный трансформатор, магнитопровод, несимметрия, математическая модель

Как правило, силовые трёхфазные трансформаторы (СТТ) большой мощности (сотни кВА, десятки МВА) по соображениям экономии материалов, площадей, удобства обслуживания электрооборудования и систем охлаждения имеют общий магнитопровод с обмотками, размещёнными на трёх стержнях.

Несмотря на топологическую симметрию конструкции, электромагнитные процессы в стержнях СТТ плоской конструкции различаются [1, 2]. Это объясняется разни-

The article considers the reasons for the asymmetry of electromagnetic processes in three-phase transformers having symmetric design, and presents the quantitative analysis to the characteristic of the given processes. The ways for compensation of asymmetrical modes based on modification of manufacturing technologies of magnetic circuits and windings are proposed.

For calculations we used the mathematical models created on the basis of symbolical transformations MAPLE12 and numerical calculations MATLABR10.

Keywords: power three-phase transformer, magnetic circuit, asymmetry, mathematical model

цей длин силовых линий, в которых действуют магнитные потоки и, как следствие, различием магнитных сопротивлений, магнитных индукций материала стержней, напряжений на выводах вторичных обмоток.

Это может вызвать нежелательные явления, в частности, превышение значения индукции, допустимого для применённого материала.

Возможные простейшие меры компенсации (увеличение размеров немагнитных зазоров, площадей сечения стержней) при-

водят к росту стоимости и массы изделия, активных и реактивных потерь.

Если в системе электропитания, содержащей СТТ, содержатся статические преобразователи, например выпрямители, несимметрия приводит к появлению пульсаций выпрямленного напряжения (тока) с низкими частотами.

В связи с этим необходимо выполнить исследования и выработать дополнительные рекомендации, касающиеся конструкции и технологии изготовления СТТ.

В продукте MATLAB, в библиотеке пакета SIMULINK POWER SYSTEMS (SPS) содержатся имитационные модели транс-

форматоров различных типов, однако несимметрия в них не учитывается.

В результате данного исследования предложен количественный анализ упомянутых процессов, а также возможные методы компенсации несимметричных режимов СТТ.

Применённый математический аппарат основан на комплексном использовании символьных и численных преобразований, наиболее удобно сочетающихся программных продуктов MAPLE, MATLAB.

На рис. 1 а показаны основные элементы СТТ и их размеры, на рис. 1 б – схема замещения магнитных цепей.

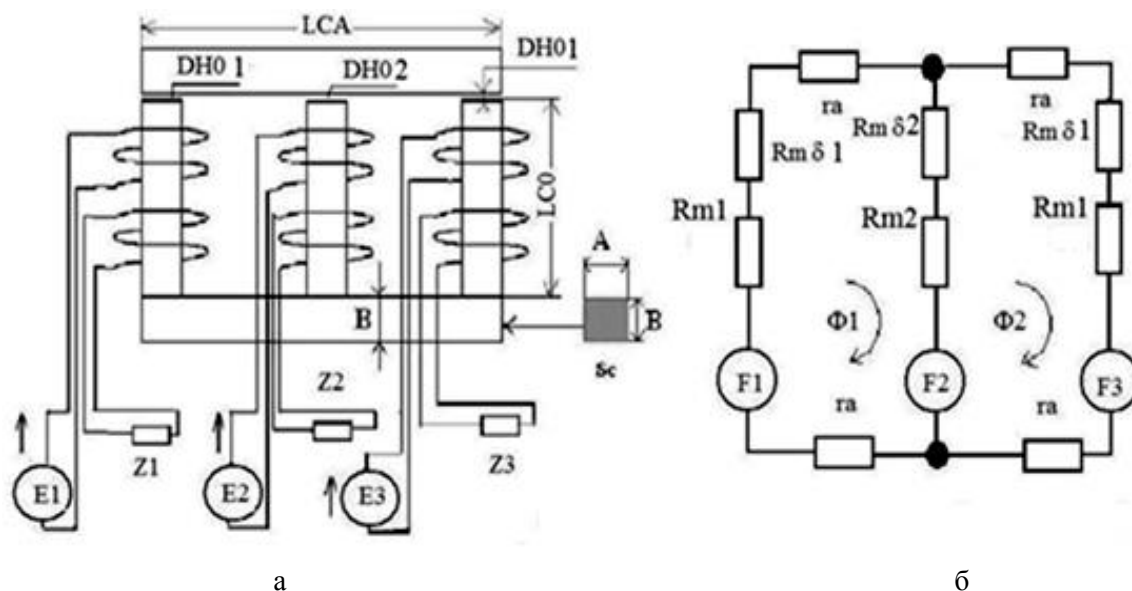


Рис. 1. Силовой трехфазный трансформатор: а – основные элементы и размеры; б – схема замещения магнитных цепей

На 1-м этапе рассчитываются параметры СТТ по любой надёжной методике [1, 3].

В этом примере расчёт выполнен для одного стержня в программе

MATLAB, разработанной в СПб ГЭТУ (ЛЭТИ) [4].

Распечатки исходных данных и результатов приведены ниже.

% Ввод исходных данных для имеющегося магнитопровода (1 стержень)

LC0 = 0.4;	% Длина стержня, м
LCA = 1;	% Длина ярма, м
A = 0.08;	% Толщина магнитопровода, м
B = 0.08;	% Ширина магнитопровода, м
RO = 1.7e-8;	% Уд. сопротивление провода, Ом*м
M0 = 4*pi*10^(-7);	% Магнитная постоянная, Гн/м
MR = 1000;	% Отн. магн. проницаемость
FR = 50;	% Частота сети, Гц
P = 10000;	% Активная мощность нагрузки, Вт
R = 10;	% Актив. сопротивление нагрузки, Ом

BM = 1.2;	% Допустимая индукция, Тл
DH0 = 0.001;	% Размер немагнитного зазора, м
Tmax = 373;	% Температура перегрева, К
Tex = 313;	% Температура окружающей среды, К
Twr = 1;	% Относ. продолжительность работы
Di0 = 0.001;	% Толщина изоляции м. провода, м
Di1 = 0.0003;	% Толщина изоляции 1 обмотки, м
Di2 = 0.0001;	% Толщина изоляции 2 обмотки, м
DH1 = 0.005;	% Ширина воздушного канала стержень – 1 обмотка, м
DH2 = 0.005;	% Ширина воздушного канала 1 – 2 обмотки, м
P0 = 3;	% Уд. мощность потерь, Вт/кг
Di12 = 0.002;	% Толщина изоляции между 1 и 2 обмотками, м
Gam = 8900;	% Плотность материала обмоток, кг/м ³
Gaf = 7800;	% Плотность материала магнитопровода, кг/м ³
E = 380;	% Напряжение питающей сети, В
Dmax = 3;	% Допустимая плотность тока, А/мм ²
RG = 1;	% К-т Роговского, учитывает конфигурацию поля
LD = 0.9*LC0;	% Размер для размещения обмотки на стержне
Результат расчёта.	
Частота сети (Гц) = 50	
Кол. витков первичной обмотки W1 = 225	
Кол. витков вторичной обмотки W2 = 187	
Кол. слоев первичной обмотки Z = 3	
Кол. слоев вторичной обмотки J = 2	
Размер немагнитного зазора (м) = 0.001	
Индуктивность намагничивания Lm (Гн) = 4831	
Площадь "кольца" рассеяния SQ (м ²) = 0.0069125	
Индуктивность рассеяния Ls (Гн) = 0.0012215	
Индуктивность рассеяния, пр. к 1 обм. L1 (Гн) = 0.00082697	
Индуктивность рассеяния, пр. к 2 обм. L2 (Гн) = 0.00057123	
Ток холостого хода Imax (А) = 11.59	
Ток нагрузки T2 (А) = 31.623	
Ток 1 обмотки T1 (А) = 28.724	
Заданная магнитная индукция BM (Тл) = 1.2	
Действующая магнитная индукция Bmm (Тл) = 1.199	
КПД (ЕТА) = 0.9377	
Активное сопротивление нагрузки R (Ом) = 10	
Сопротивление 1 обмотки R1 (Ом) = 0.1366	
Сопротивление 2 обмотки R2 (Ом) = 0.13232	
Длина провода 1 обмотки lw1(м) = 77.016	
Длина провода 2 обмотки lw2(м) = 82.137	
Мощность потерь в магнитопроводе PF (Вт) = 419.33	
Мощность потерь в обмотках PW (Вт) = 245.03	
Общая мощность активных потерь Psum (Вт) = 664.35	
Активная мощность в нагрузке (Вт) = 10000	
Установленная мощность ptr (Вт) = 10664	
Диаметр провода 1 обмотки D1 (м) = 0.0034966	
Диаметр провода 2 обмотки D2 (м) = 0.0036687	
Толщина магнитопровода A (м) = 0.08	
Ширина магнитопровода B (м) = 0.08	

Масса обмоток Q_m (кг) = 14.31

Масса магнитопровода Q_f (кг) = 139.78

Масса трансформатора Q_T (кг) = 154.09

Длина стержня LC_0 (м) = 0.4

Длина ярма LCA (м) = 1

Средняя длина магнитной силовой линии l_m (м) = 1.721

Площадь сечения стержня S_c (м²) = 0.0064

На 2-м этапе по результатам расчёта и на основе схемы замещения (рис. 1б) в программе MAPLE анализируются процессы в магнитопроводе в режиме XX.

Основные соотношения. Матрица магнитных сопротивлений Z по рис. 1 б:

$$Z = \begin{bmatrix} 2 \cdot ra + 2 \cdot Rm1 + 2 \cdot Rm\delta1 & -Rm\delta2 - Rm2 \\ -Rm\delta1 - Rm1 & 2 \cdot ra + 2 \cdot Rm1 + 2 \cdot Rm\delta1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Вектор намагничивающих сил FF :

$$FF = \begin{bmatrix} I01 \cdot w1 - I02 \cdot w2 \\ I02 \cdot w2 - I03 \cdot w3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Выражения токов XX:

$$I01 = \frac{E1}{2 \cdot \pi \cdot FR \cdot L1}; \quad I02 = \frac{E2}{2 \cdot \pi \cdot FR \cdot L2}; \quad I03 = \frac{E3}{2 \cdot \pi \cdot FR \cdot L3}. \quad (3)$$

В (3) в числителях напряжения фаз E , В, в знаменатели входят: частота сети FR , Гц, индуктивности обмоток $L1, L2, L3$, Гн.

Индуктивности рассчитываются по известным выражениям:

$$L = \mu \cdot w^2 \cdot Sc / l_m.$$

S_c – площадь его поперечного сечения, м², l_m – эквивалентная длина магнитной силовой линии, м.

Магнитные сопротивления

$$Rm = \frac{LC_0}{\mu \cdot Sc}, \quad 1/\text{Гн}. \quad (5)$$

Магнитная проницаемость с учётом размера зазора DH_0 :

$$\mu = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{1 + \frac{\mu_r \cdot DH_0}{LC_0}}; \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}. \quad (4)$$

В последних выражениях w – число витков обмоток, LC_0 – длина стержня, м,

Приведём текст программы (MAPLE – файл): выражения, исходные данные.

На рис. 2 – матрица магнитных сопротивлений Z после подстановок в MAPLE – файле, вектор магнитодвижущих сил FF . На рис. 3 – магнитная индукция в стержнях трансформатора, а на рис. 4 – результаты расчета.

Программа анализа процессов в 3-фазном трансформаторе

```
> restart;
> with(linalg);
> with(plots);
> Digits := 3;
# Основные соотношения
> ra := .5*LCA/(mu*Sc1);
> Rmdelta1 := DH0/(mu0*Sc1);
> Rmdelta2 := DH0/(mu0*Sc2);
> Rm1 := LC0/(mu*Sc1);
> Rm2 := LC0/(mu*Sc2);
> Z := array([[2*(ra+Rm1+Rmdelta1), -Rmdelta2-Rm2], [-Rmdelta1-Rm1, 2*(ra+Rm1+Rmdelta1)]]);
```

```

> x1 := Rm1+Rmdelta1+2*ra; x2 := Rmdelta1+Rm1; y1 := (x1+x2)/(x1*x2); x3 := Rm1+Rmdelta1+2*ra; Rm11
:= combine((y1+x3)/(y1*x3));
> F1 := I01*w1; F2 := I02*w2; F3 := I03*w3;
> x4 := Rmdelta2+Rm2; x5 := .5*(Rmdelta2+2*ra+Rm2); Rm22 := combine(x4*x5)/(x4+x5);
> Rm33 := Rm11;
> l1 := 2*LC0+LCA+2*DH0; l2 := 2*(LCA+LC0+DH0);
> lm1 := (l1+l2)*(1/2);
> l3 := 2*LC0+LCA+2*DH0; l4 := l3; lm2 := (l3+l4)*(1/2);
> lm3 := lm1;
> L1 := mu*w1^2*Sc1/lm1;
> L2 := mu*w2^2*Sc2/lm2;
> L3 := mu*w3^2*Sc1/lm3;
> FF := array([F1-F2, F2-F3]);
> IZ := inverse(Z);
> Phi := multiply(IZ, FF);
> Phi1 := Phi[1];
> Phi2 := Phi[2]-Phi[1];
> Phi3 := -Phi[2];
> I01 := E1/(2*Pi*FR*L1); I02 := E2/(2*Pi*FR*L2); I03 := E3/(2*Pi*FR*L3);
> g1 := (1/360)/FR; g2 := 120/FR*(1/360); g3 := 240/FR*(1/360);
> E1 := Em*sin(2*Pi*FR*(t+g1)); E2 := Em*sin(2*Pi*FR*(t+g2)); E3 := Em*sin(2*Pi*FR*(t+g3));
# Подстановка чисел
> mu0 := 4*Pi*10^(-7);
> mur := 1000;
> LC0 := .4;
> LCA := 1;
> DH0 := 0.1e-2;
> A1 := 0.8e-1; B1 := 0.8e-1; A2 := 0.96e-1; B2 := 0.8e-1;
> mu := mu0*mur/(1+mur*DH0/LC0);
> Sc1 := A1*B1; Sc2 := A2*B2;
> w1 := 225; w2 := 225; w3 := 225;
> FR := 50;
> Em := 380;
> w21 := 184; w22 := 184; w23 := 184;
# Вывод графиков
> plot({E1, E2, E3}, t = 0 .. 0.4e-1, style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig1 := plot(I01, t = 0 .. 0.4e-1, color = "red", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig2 := plot(I02, t = 0 .. 0.4e-1, color = "blue", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig3 := plot(I03, t = 0 .. 0.4e-1, color = "green", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> display(Fig1, Fig2, Fig3);
> Fig4 := plot(Phi1/Sc1, t = 0 .. 0.4e-1, color = "red", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig5 := plot(Phi2/Sc2, t = 0 .. 0.4e-1, color = "blue", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig6 := plot(Phi3/Sc1, t = 0 .. 0.4e-1, color = "green", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> display(Fig4, Fig5, Fig6);
> U21 := evalf(w21*(diff(Phi1, t))); U22 := evalf(w22*(diff(Phi2, t))); U23 := evalf(w23*(diff(Phi3, t)));
> Fig7 := plot(U21, t = 0 .. 0.4e-1, color = "red", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig8 := plot(U22, t = 0 .. 0.4e-1, color = "blue", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> Fig9 := plot(U23, t = 0 .. 0.4e-1, color = "green", style = line, thickness = 3, axes = boxed, axis = [gridlines = 10]);
> display(Fig7, Fig8, Fig9);

```

```

> II := evalf([I01, I02, I03]);
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do II01[t] := evalf(I01) end do;
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do II02[t] := evalf(I02) end do;
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do II03[t] := evalf(I03) end do;
> CI1 := convert(II01, list); CI2 := convert(II02, list); CI3 := convert(II03, list);
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do B1[t] := evalf(Phi1/Sc1) end do;
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do B2[t] := evalf(Phi2/Sc2) end do;
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do B3[t] := evalf(Phi3/Sc1) end do;
> BI1 := convert(B1, list); BI2 := convert(B2, list); BI3 := convert(B3, list);
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do E1[t] := evalf(U21) end do;
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do E2[t] := evalf(U22) end do;
> for t from 0.1e-2 by 0.1e-2 to 1/FR do E3[t] := evalf(U23) end do;
> EI1 := convert(E1, list); EI2 := convert(E2, list); EI3 := convert(E3, list);
> LL := evalf([L1, L2, L3]);
> [max(CI1), max(CI2), max(CI3)];
> [max(BI1), max(BI2), max(BI3)];
> [max(EI1), max(EI2), max(EI3)];

```

По рис. 3 и результату расчёта (рис. 4) можно оценить количественное влияние несимметрии процессов в СТТ.

Выравнивание магнитных потоков в стержнях возможно за счёт изменения размеров немагнитных зазоров DH0 (рис. 1 а) и (или) изменения площадей поперечного сечения стержней Sc.

Первый способ неудобен с точки зрения технологии сборки СТТ средней и большой мощности.

Более простой и дешёвый способ – подбор площади сечения среднего стержня.

Этот способ иллюстрируется на 3-м этапе. Используются программы MATLAB.

Выражения, связывающие электрические и магнитные величины с параметрами конструкции СТТ, выведены в программе MAPLE и экспортированы в скрипт-файл MATLAB.

На рис. 5 приведены зависимости магнитной индукции от размера одинакового для всех стержней немагнитного зазора и ширины пластины среднего стержня по данным СТТ, приведённым выше.

Горизонтальные линии – для крайних стержней, наклонные – для среднего.

Если сечение стержней имеет сложный профиль, следует пересчитать суммарную площадь его фрагментов из прямоугольника с площадью $Sc = A \cdot B$ (рис. 1 а).

С достаточной для практики точностью и с учётом технологических разбросов по рис. 5 можно определить точки совпадения индукций. Например, при $\delta = 1$ мм и средней ширине пластины 0,11 м значения индукции в стержнях практически совпадают и находятся в пределах 0,95-1,2 Тл.

$$Z := \begin{bmatrix} \frac{1.0 LCA}{\mu Sc1} + \frac{2 LCO}{\mu Sc1} + \frac{2 DH0}{\mu0 Sc1} & -\frac{DH0}{\mu0 Sc2} - \frac{LCO}{\mu Sc2} \\ -\frac{DH0}{\mu0 Sc1} - \frac{LCO}{\mu Sc1} & \frac{1.0 LCA}{\mu Sc1} + \frac{2 LCO}{\mu Sc1} + \frac{2 DH0}{\mu0 Sc1} \end{bmatrix}$$

$FF := \text{array}([F1 - F2, F2 - F3]);$ # Вектор намагничивающих сил, НМС, А

$FF := [I01 w1 - I02 w2 \quad I02 w2 - I03 w3]$

Рис. 2. Матрица магнитных сопротивлений

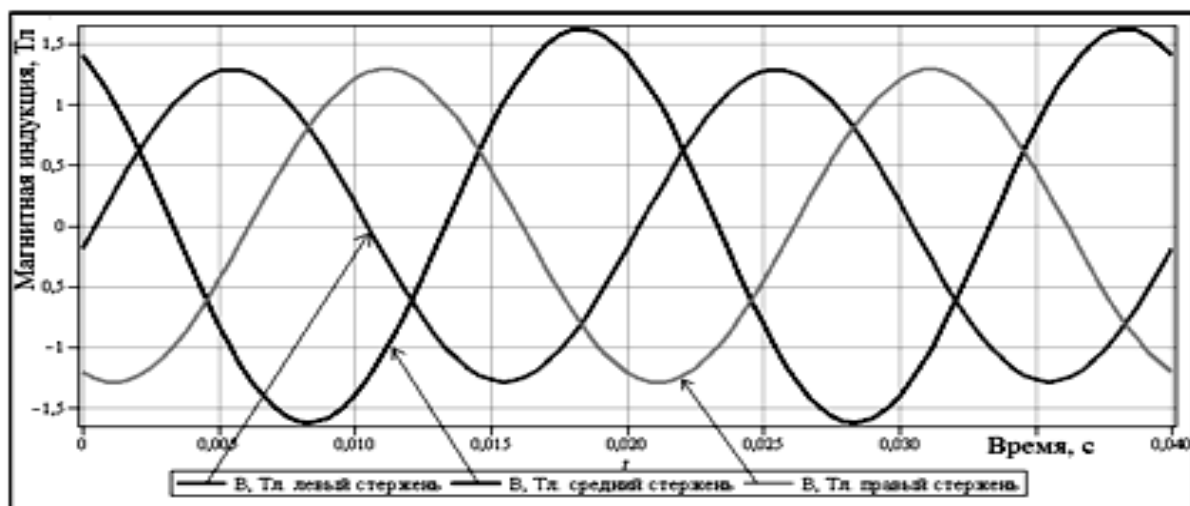


Рис. 3. Магнитная индукция в стержнях трансформатора

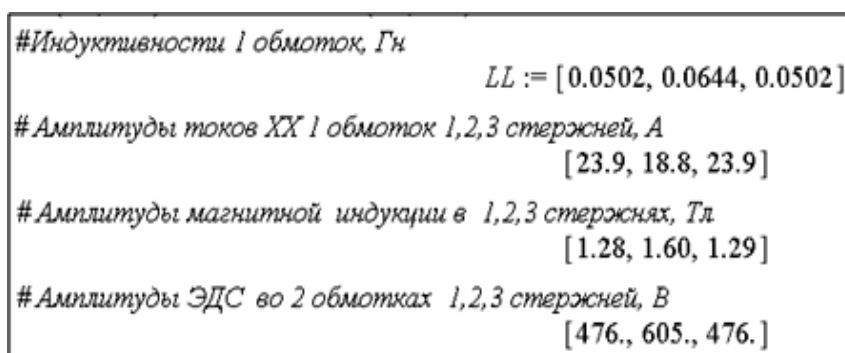


Рис. 4. Результаты расчета

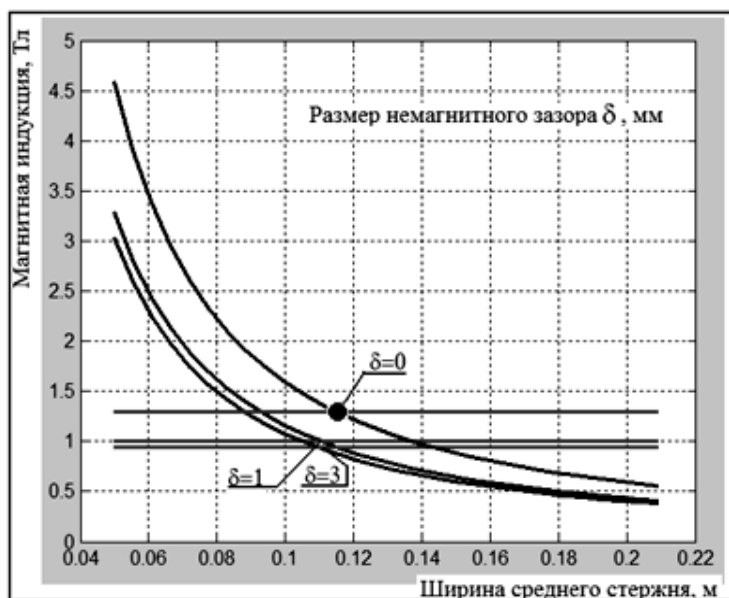


Рис. 5. Зависимости магнитной индукции от размера немагнитного зазора и ширины пластины среднего стержня

Далее приведены результаты подстановки данных в MAPLE файл. Содержание рис. 6, 7 аналогично рис. 3, 4.

Для выравнивания ЭДС вторичных обмоток фаз достаточно скорректировать число витков вторичной обмотки среднего стержня.

На 4-м этапе применена имитационная математическая модель в пакете SPS системы MATLAB.

Вариант структуры модели показан на рис. 8. Расчётная схема СТТ соответствует рис. 1 б и содержит магнитные сопротивления, источники намагничивающих токов.

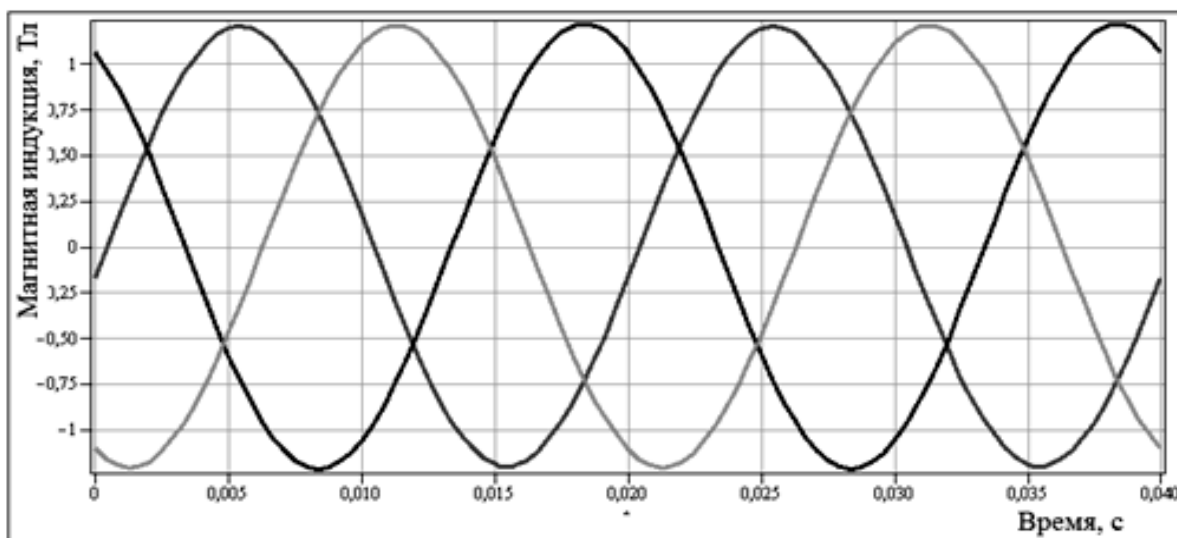


Рис. 6. Магнитная индукция в стержнях трансформатора

```
#Индуктивности 1 обмоток, Гн
LL := [0.0502, 0.0772, 0.0502]

#Амплитуды токов ХХ 1 обмоток 1,2,3 стержней, А
[23.9, 15.7, 23.9]

#Амплитуды магнитной индукции в 1,2,3 стержнях, Тл
[1.19, 1.21, 1.21]

#Амплитуды ЭДС во 2 обмотках 1,2,3 стержней, В
[444., 442., 444.]
```

Рис. 7. Результаты расчета

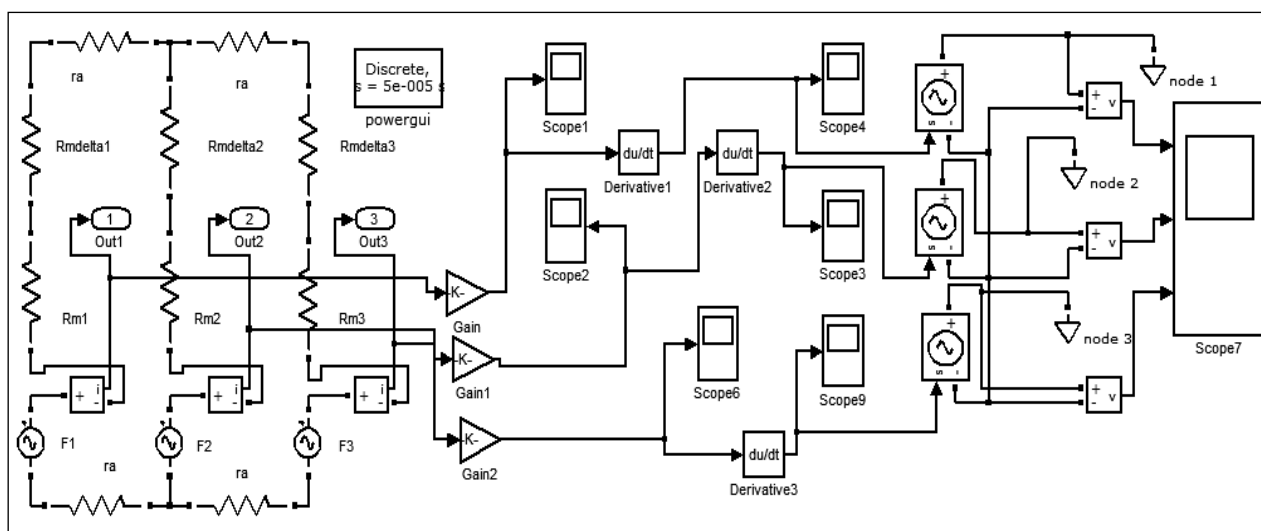


Рис. 8. Вариант структуры модели

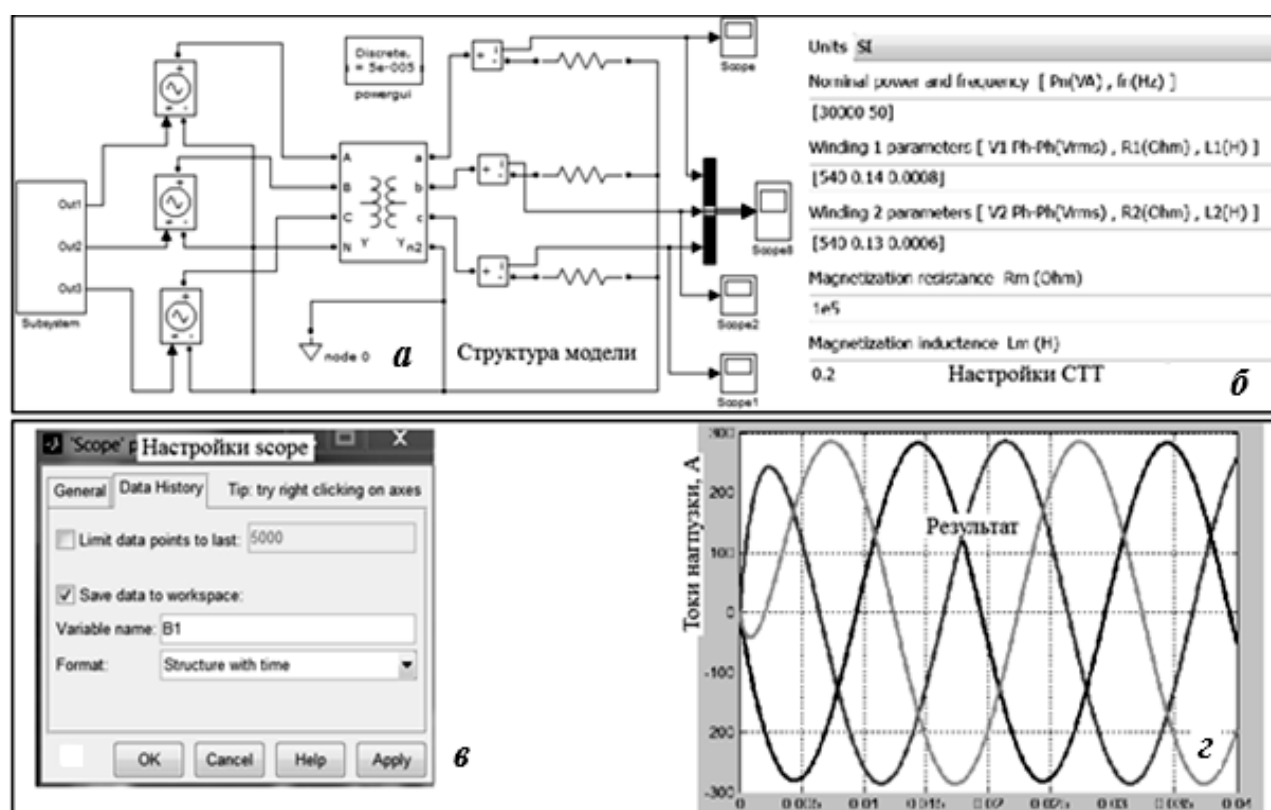


Рис. 9. Компактная форма модели

В компактной форме модель представлена в виде подсистемы и дополнительных элементов (рис. 9 а).

На рис. 9 б приведено меню настройки распределительного трансформатора, на рис. 9 в – меню настройки прибора наблюдения, включающее экспортирование результатов в рабочую область workspace.

Значения элементов схемы определяются из приведённых выше выражений (1)-(5).

Выполнение вспомогательной программы (текст ниже) обеспечивает ввод исходных данных, запуск модели, импортирование результатов из рабочей области MATLAB, построение графиков (рис. 9 г).

Пример 1. Имитационное моделирование. Симметричная активная нагрузка.

Показаны токи симметричной нагрузки; значение активных сопротивлений 1 Ом. Вспомогательная программа MATLAB управления SPS моделью:

```
% Исходные данные
clear,hold off
```

```
ra=2.18e5;
Rm1=1.74e5;
Rm2=1.4e5;
Rm3=Rm1;
Rmdelta1=1.24e5;
Rmdelta2=1.04e5;
Rmdelta3=Rmdelta1;
A1=0.08; B1=0.08;
A2=0.096; B2=0.08;
Sc1=A1*B1; Sc2=A2*B2;
```

Пример 2. Активная нагрузка, подключённая на выходе выпрямителя.

```
pause
% Запуск модели. Имя редактируется.
sim TR3ph_1
% Результаты и график
x=B1.time;
y1=B1.signals.values;
plot(x,y1,'r','LineWidth',3),grid,hold on
y2=B2.signals.values;
plot(x,y2,'b','LineWidth',3)
y3=B3.signals.values;
plot(x,y3,'g','LineWidth',3)
Структурная схема – на рис. 10.
```

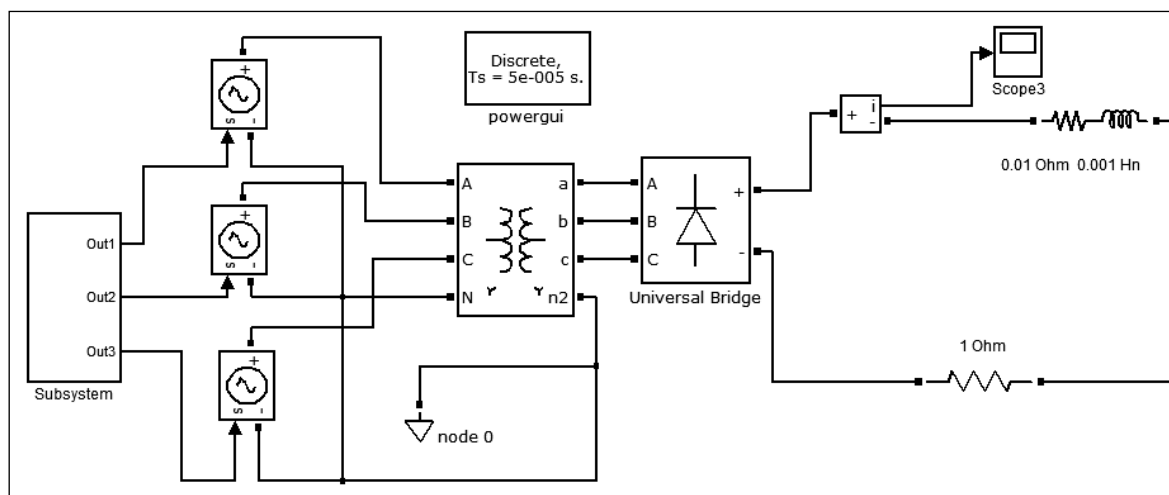


Рис. 10. Структурная схема модели для второго примера

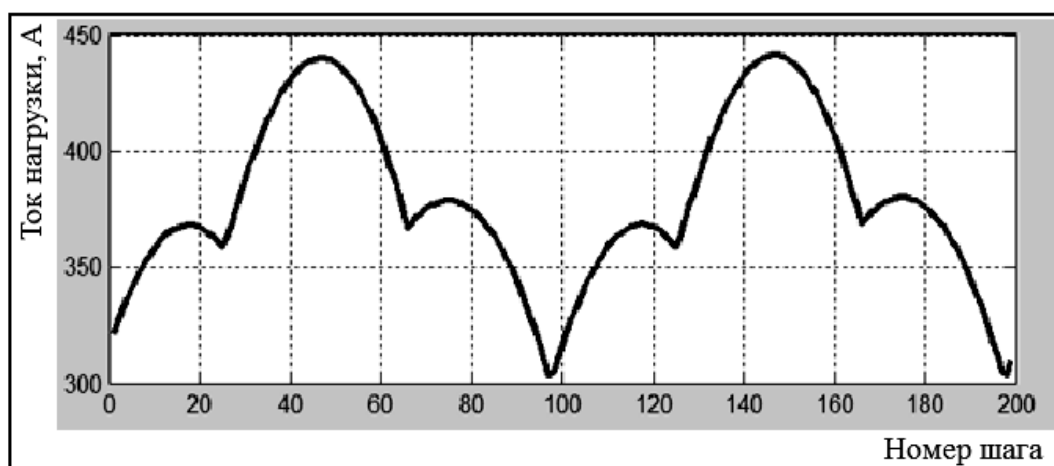


Рис. 11. Ток нагрузки

Если параметры СТТ не скорректированы и соответствуют исходным данным, в токе нагрузки присутствуют низкочастотные пульсации (рис. 11).

Гармонический состав тока нагрузки (амплитудный и фазовый спектры) показаны на рис. 12 а, б соответственно.

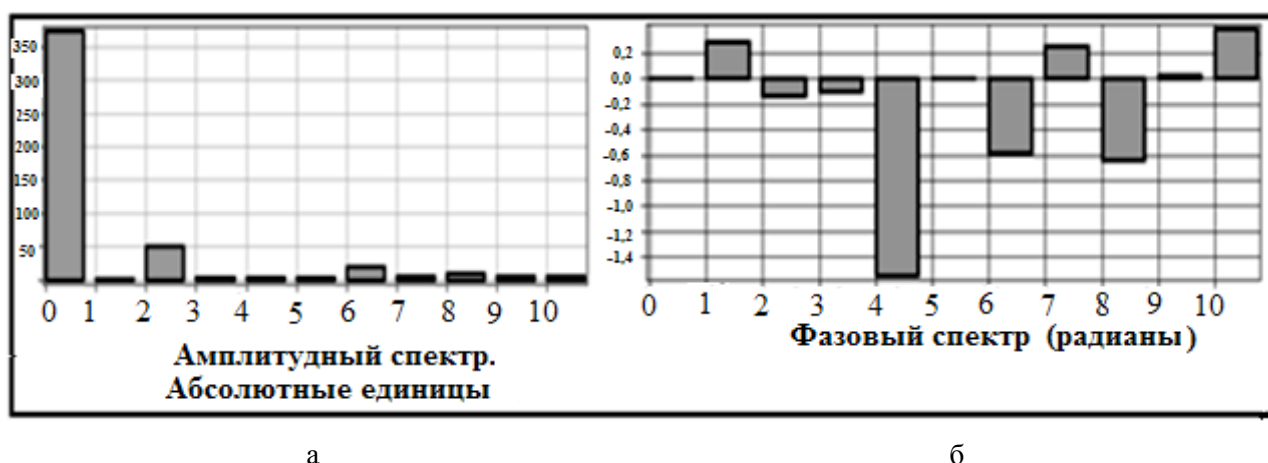


Рис. 12. Гармонический состав тока нагрузки: а – амплитудный спектр; б – фазовый спектр

В графиках и распечатках присутствует 2-я гармоника тока с частотой 100 Гц при базовой частоте исследования 50 Гц и имеет значительную амплитуду.

После коррекции размеров магнитопровода, рекомендованной выше, график тока, гармонический состав вполне удовлетворительны с точки зрения подавления пульсаций.

Вторая гармоника тока практически отсутствует. Существенны постоянная составляющая с номером 0 и гармоника с номером 6 (её частота 300 Гц, обычная для пульсаций в 3-фазной двухполупериодной схеме выпрямления), её амплитуда зависит от параметров сглаживающего фильтра.

Иллюстрации даны на рис. 13, 14.

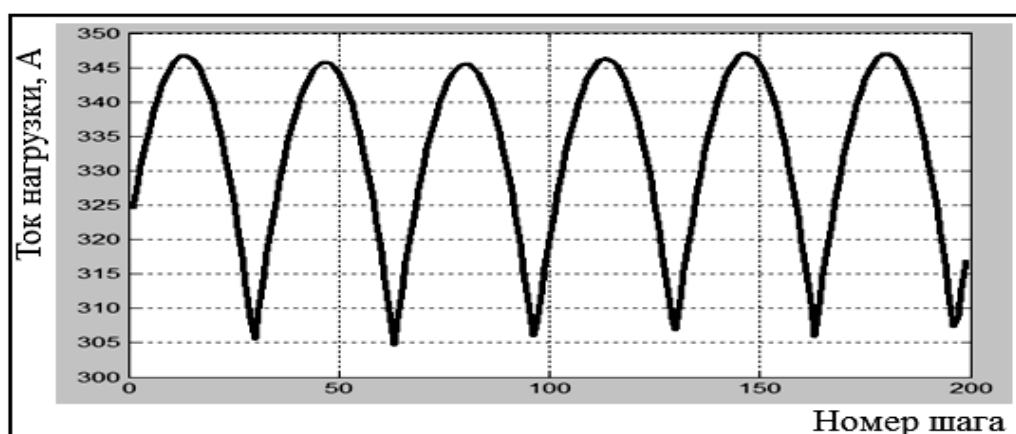


Рис. 13. Ток нагрузки после коррекции размеров магнитопровода

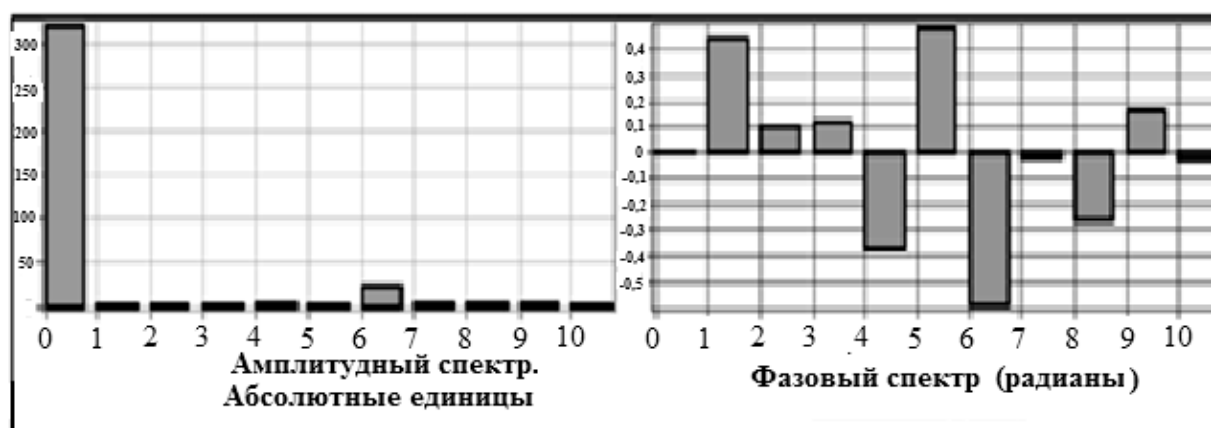


Рис. 14. Гармонический состав тока нагрузки после коррекции магнитопровода: а – амплитудный спектр; б – фазовый спектр

Итак, симметрирование электромагнитных процессов в СТТ возможно путём коррекции магнитного сопротивления линии магнитного потока намагничивающих сил фаз, которое достижимо либо за счёт изменения конструкции пакета магнитопровода, либо настройкой размера немагнитного зазора в стержнях.

Рекомендованы методы количественного анализа процессов в СТТ и показаны их результаты.

Приведены выражения, использованные в программах символьных и численных математических преобразований.

После простого редактирования исходного MAPLE файла и на основании выведенных выражений может быть проведён анализ однофазного трансформатора броневой конструкции с произвольным размещением обмоток на стержнях магнитопровода.

Представлена имитационная математическая модель, предназначенная для иссле-

дования, проектирования СТТ, проведения численных экспериментов при различных

нагрузках, в том числе электрических машин, вентильных преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихомиров П.М.** Расчёт трансформаторов / П.М. Тихомиров. М.: Энергия, 1968. 455 с.

2. **Кислицын А.Л.** Трансформаторы / А.Л. Кислицын. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2002. 32 с.

3. **Мошкин В.И.** Расчет трехфазного сухого силового трансформатора /

В.И. Мошкин. Курган: Курган. гос. ун-т, 2012. 81 с.

4. Компьютерно-информационные технологии анализа и синтеза электротехнических комплексов [Электронный ресурс] / П.А. Кошелев, С.В. Парамонов. СПб.: СПбГЭТУ, 2012.

Кошелев Пётр Александрович – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ)

Парамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ)

Pyotr A. Koshelev – Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

Sergei V. Paramonov – PhD, Associate Professor Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

Статья поступила в редакцию 30.06.17, принята к опубликованию 20.09.17

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.032.21

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВЫХОДА И ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫХ ОКСИДОСОДЕРЖАЩИХ КАТОДОВ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

С.В. Семенов, А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, Н.А. Вавилина

OPERATION PECULIARITIES OF THE OUTPUT AND SURFACE CHARGE OF THERMIONIC OXIDE-CONTAINING CATHODES IN VACUUM ELECTRONIC DEVICES

S.V. Semenov, A.Ya. Zorkin, I.V. Rodionov, N.A. Vavilina

Рассмотрена система оксид – газ (пары оксида) в оксидосодержащих катодах вакуумных электронных приборов для определения работы выхода оксида и определения положительного поверхностного заряда, образованного адсорбированными атомами бария. Получены зависимости: поверхностного заряда и эффективной работы выхода для оксида бария от внешнего напряжения в режиме пространственного заряда при различных температурах и активности кислорода в приборе; поверхностного потенциала, внутренней и внешней работы выхода для оксида бария от температуры и давления молекулярного кислорода.

Ключевые слова: оксидосодержащий катод, работа выхода, поверхностный заряд, газовая фаза

The article analyses the system of oxide-containing cathodes in vacuum electronic devices. The oxide-gas system (oxide vapor) is used to determine the work function of the oxide and determine the positive surface charge formed by adsorbed barium atoms. The following dependences are obtained: the surface charge and effective work function for barium oxide on the external voltage in the space charge mode at various temperatures and oxygen activity in the device; the surface potential, internal and external work function for the barium oxide on the temperature and pressure of molecular oxygen.

Keywords: oxide-containing cathode, work function, surface charge, gas phase

В вакуумных электронных приборах (ВЭП) применяются оксидосодержащие катоды, активно взаимодействующие с остаточной газовой средой внутри ВЭП [1]. Такое положение приводит к необходимости учета фазового равновесия оксид – газ (пары оксида), по состоянию которого можно определить работу выхода [1, 2]. Оксидосодержащие катоды имеют низкую работу выхода после технологической операции их

активирования, проводимую внутри ВЭП [1]. Низкая работа выхода обеспечивается в первую очередь положительным поверхностным потенциалом катода, который изгибает энергетические зоны вблизи поверхности катода [1, 2]. Положительный поверхностный заряд может образовываться из-за адсорбции и ионизации атомов металла (чаще всего бария) на поверхности ионных кристаллов оксида катода [1, 3].

Отрицательный поверхностный заряд катода создается адсорбцией атомов кислорода, но из-за малых давлений остаточного кислорода в ВЭП адсорбцией атомов кислорода пренебрегают [4].

Система оксид – газ в равновесии имеет две степени свободы, в качестве которых рассмотрим температуру T и давление кислорода P_{O_2} . Внутренняя работа выхода оксида $\phi_o = E_C - E_F$ определяется концентрацией свободных электронов $n_{eo}(T, P_{O_2})$ в зоне проводимости (при $\phi_o \gg kT$) [4, 2]. Концентрацию электронов проводимости в объеме оксида можно найти из решения уравнения электронейтральности в объеме оксида с учетом уравнений баланса структурных единиц или статистическим методом [4]. Концентрация электронов проводимости при достаточно высокой температуре и избытке кислородных вакансий над металлическими определяется концентрацией двукратно ионизированных кислородных вакансий $V_{2O}(T, P_{O_2})$ [4].

Потенциальная энергия электронов в вакууме относительно уровня Ферми равна

$$\phi_{og}(T, P_{O_2}) = -\frac{kT}{e'} \cdot \ln \left(\frac{n_{eg}(T, P_{O_2})}{N_{cg}(T)} \right),$$

где $n_{eg}(T, P_{O_2})$ – концентрация электронов в парах оксида; $N_{cg}(T)$ – плотность состояний в континууме; k – постоянная Больцмана; e' – заряд электрона; T – температура; P_{O_2} – давление кислорода.

Концентрацию электронов в ионизированном газе (в парах оксида) можно определить по распределению Саха в предположении, что ионизированы в основном атомы металла [1, 2]. Сродство оксида к электрону равно [1, 2]

$$\chi(T, P_{O_2}) = -k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{n_{eg}(T, P_{O_2})}{n_{eo}(T, P_{O_2})} \times \left(\frac{m_e}{m'_e} \right)^{1.5} \right),$$

где $n_{eg}(T, P_{O_2})$ – концентрация электронов в ионизированном газе паров оксида по распределению Саха [1]; $n_{eo}(T, P_{O_2})$ – концентрация электронов проводимости в объеме оксида определяется квазихимическим ме-

тодом [1]); m_e, m'_e – масса свободного электрона и эффективная масса электрона в зоне проводимости оксида соответственно.

Поверхностный потенциал в равновесии, определенный из баланса заряда в переходе оксид – газ и равенства поверхностных потенциалов в оксиде и в газе, равен [2, 4]

$$j_n(T, K_S) = \frac{kT}{e'} \times \Phi_X(K_S),$$

где K_S – коэффициент усреднения поля и заряда в переходе; $\Phi_X(K_S)$ – функция, определяемая из решения уравнения $\Phi_X - \ln [(K_S)^2 \Phi_X] = 0$.

Работа выхода оксида (без учета дипольной составляющей) определяется из выражения [1, 2]

$$\begin{aligned} \phi_{ox}(T, P_{O_2}, K_S) = \\ = \phi_{og}(T, P_{O_2}) - \phi_n(T, K_S) + \chi(T, P_{O_2}). \end{aligned}$$

При увеличении температуры и уменьшении активности кислорода равновесный поверхностный заряд оксида увеличивается и соответствует плотности донорных состояний на поверхности 10^{10} – 10^{18} м^{-2} [1, 2], что значительно превышает поверхностную концентрацию кислородных вакансий. Протяженность пространственного заряда в газе в области перехода оксид-газ составляет 0,1-10 мм, что свидетельствует о нахождении равновесной плазмы в парах оксида [1, 2].

Работа выхода оксида в режиме пространственного заряда при токоотборе с приложением внешнего напряжения U_{ak} определяется из выражения [2, 4]

$$\begin{aligned} \phi_{ou}(T, P_{O_2}, Q_S, U_{ak}) = \phi_o(T, P_{O_2}) - \phi_s(T, P_{O_2}, Q_S) \\ + \chi(T, P_{O_2}) + V_b(T, P_{O_2}, Q_S, U_{ak}), \end{aligned}$$

где $V_b(T, P_{O_2}, Q_S, U_{ak})$ – понижающий работу выхода оксида общий потенциал, который получается из решения уравнения Пуассона для несимметричного перехода оксид – газовая фаза.

Поверхностный заряд Q_S при наличии внешнего напряжения определяется из решения уравнения [2, 4]

$$\begin{aligned}\phi_s(T, P_{O_2}, Q_s) = \\ = V_j(T, P_{O_2}, U_{ak}) - V_b(T, P_{O_2}, Q_s, U_{ak}),\end{aligned}$$

где $V_j(T, P_{O_2}, U_{ak})$ – понижающий потенциал на поверхности оксида, который определяется из условия, что ток подчиняется закону 3/2.

Поверхностный потенциал связан с поверхностным зарядом выражением [1, 2]

$$\phi_s(T, P_{O_2}, Q_s) = \frac{Q_s^2}{2\epsilon\epsilon_0 e' n_{eo}(T, P_{O_2})}.$$

Для определения положительного поверхностного заряда, образованного адсорбированными атомами бария, необходимо рассмотреть равновесное состояние системы оксид – пары оксида [3-6]. Все параметры системы можно представить функциями температуры и активности (давления) кислорода. Так как эффективный заряд частиц в узлах ионной решетки не превышает единицы [1], степень ионизации адсорбированных атомов принята равной единице. Поверхностный заряд определен в работах [1, 3-5].

Внутренняя работа выхода связана с концентрацией электронов проводимости в объеме оксида соотношением [1, 3]:

$$\phi_{Fc}(T, P_{O_2}) = -kT \exp\left(\frac{n_{ec}(T, P_{O_2})}{N_c(T)}\right),$$

$$N_c(T) = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{1.5},$$

где $n_{ec}(T, P_{O_2})$ – концентрация электронов проводимости в объеме оксида; $N_c(T)$ – объемная плотность состояний в зоне проводимости оксида; P_{O_2} – давление кислорода (атм); m_e – эффективная масса электрона; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана.

Поверхностный потенциал как функция температуры и давления молекулярного кислорода в газовой фазе равен [1, 3]:

$$\phi_s(T, P_{O_2}) = kT \ln \left(\frac{N_c(T)}{n_{ec}(T, P_{O_2})} \cdot Y_r(T, P_{O_2}) \right),$$

где $Y_r(T, P_{O_2})$ – является решением следующего уравнения относительно y :

$$(1 + y(1 + f_M(T, P_{O_2})))\sqrt{y} = \frac{Q_{so}}{\alpha(T)\sqrt{N_c(T)}}.$$

Здесь $Q_{so} = N_n \cdot e$; $N_n = a_{ox}^{-2}$ – поверхностная концентрация структурных единиц твердого оксида; a_{ox} – параметр решетки оксида; e' – заряд электрона; $f_M(T, P_{O_2})$ – коэффициент покрытия при адсорбции атомов металла на поверхности оксида.

Для малых покрытий поверхностный потенциал (все энергетические параметры взяты по абсолютной величине) примет вид [1, 3]:

$$\begin{aligned}\phi_s(T, P_{O_2}) = \\ = kT \ln \left[\frac{1}{n_{ec}(T, P_{O_2})} \cdot \left(\frac{Q_{so} N_c(T)}{f_M(T, P_{O_2}) \alpha(T)} \right)^{\frac{2}{3}} \right],\end{aligned}$$

$$\alpha(T) = \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon kT},$$

где ϵ_0 , ϵ – диэлектрическая постоянная и относительная диэлектрическая проницаемость оксида.

Концентрация электронов проводимости в объеме оксида находится независимо из решения уравнения электронейтральности в объеме оксида с учетом уравнений баланса структурных единиц или статистическим методом [7, 8]. В случае преобладания кислородных вакансий над металлическими концентрацию свободных электронов в зоне проводимости оксида можно определить по формуле

$$n_{ec}(T, P_{O_2}) = 2V_{2O}(T, P_{O_2})N_0,$$

где

$$V_{2O}(T, P_{O_2}) = \left(\frac{K_v(T)}{4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot P_{O_2}^{-\frac{1}{6}},$$

$$K_v(T) = K_{v0} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H}{R \cdot T}\right).$$

Здесь $V_{2O}(T, P_{O_2})$ – концентрация двукратно ионизированных вакансий кислорода в оксиде; $N_0 = \rho_{MO} \cdot N_A / M_{MO}$ – объемная концентрация структурных единиц МО в оксиде; ρ_{MO} , M_{MO} – плотность и молярная масса оксида; N_A – число Авогадро; $K_v(T)$ – констан-

та равновесия реакции $MO = 2e + V_2O + 0,5 O_2$ (в реакции обозначено: MO – твердый оксид, V_2O – двукратно ионизированные кислородные вакансии, MM – ионы металла в узлах решетки, O_2 – молекулярный кислород в газовой фазе).

Внешняя работа выхода оксида равна

$$\Phi(T, P_{O_2}) = \Phi_{Fc}(T, P_{O_2}) - \Phi_s(T, P_{O_2}) - \chi_s - \delta,$$

где χ_s – сродство оксида к электрону на поверхности; δ – дипольная составляющая работы выхода.

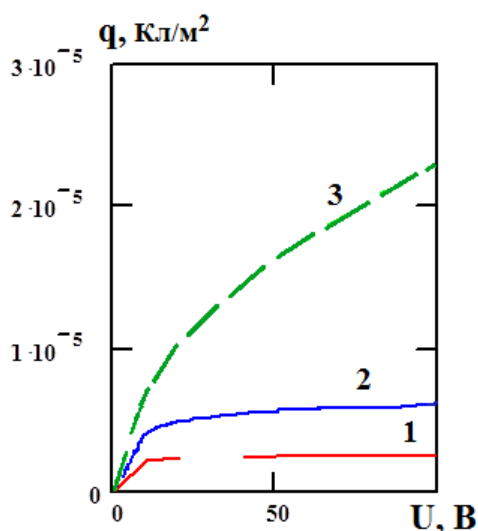


Рис. 1. Зависимость поверхностного заряда от внешнего напряжения для оксида бария: 1 – при $T = 1100$ К; 2, 3 – при $T = 1200$ К; 1, 2 – при активности кислорода в точке минимума общего давления над оксидом; 3 – в точке трехфазного равновесия металл – оксид – газ

На рис. 1 показана зависимость поверхностного заряда для оксида бария, а на рис. 2 – зависимость эффективной работы выхода для оксида бария от внешнего напряжения при различных температурах и активности кислорода в приборе. Эффективная работа выхода уменьшается, стремясь к предельному значению, соответствующему току насыщения эмиссии, при котором построенная модель неприменима.

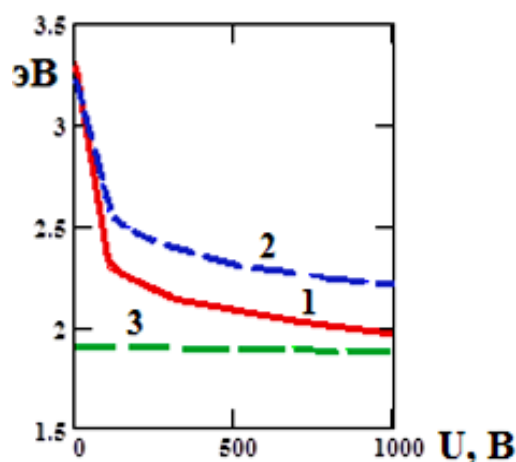


Рис. 2. Зависимость эффективной работы выхода от внешнего напряжения в режиме пространственного заряда для оксида бария: 1 – при $T = 1100$ К; 2, 3 – при $T = 1200$ К; 1, 2 – при активности кислорода в точке минимума общего давления над оксидом; 3 – в точке трехфазного равновесия металл – оксид – газ

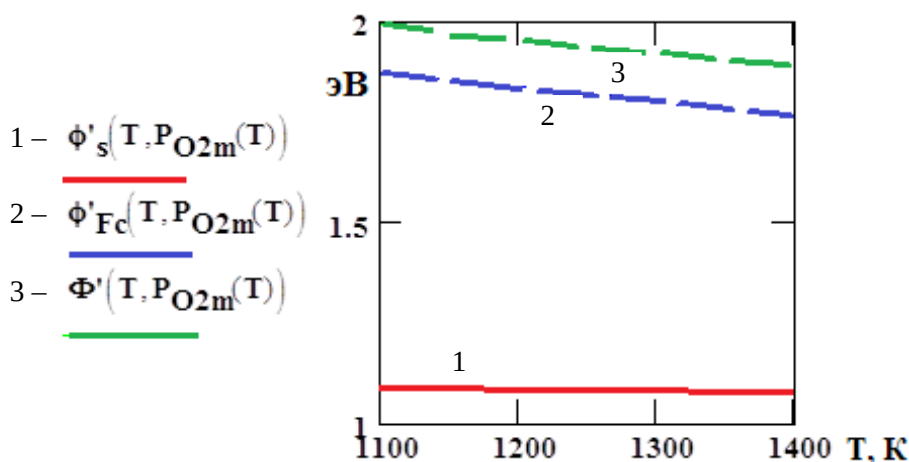


Рис. 3. Зависимости поверхностного потенциала (1), внутренней (2) и внешней (3) работы выхода от температуры для оксида бария на линии минимума общего давления паров оксида

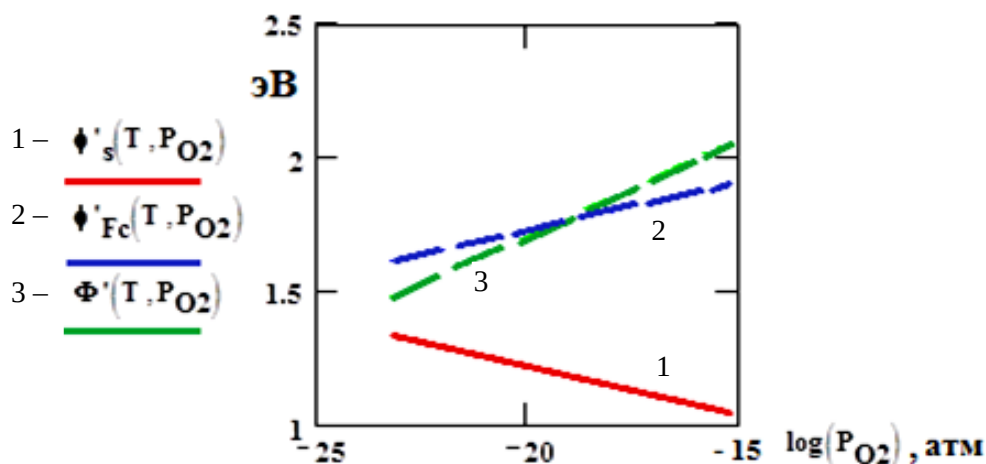


Рис. 4. Зависимость поверхностного потенциала (1), внутренней (2) и внешней (3) работы выхода от давления молекулярного кислорода для оксида бария при $T = 1100$ К

На рис. 3 показаны зависимости поверхностного потенциала, внутренней и внешней работы выхода от температуры, а на рис. 4 – от давления молекулярного кислорода для оксида бария. Средство к элек-

трону принято равным 1,1 эВ, дипольная составляющая 0,1 эВ, энергия активации десорбции адсорбированных атомов бария в нейтральной форме 3,5 эВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Откачка электронных приборов / А.Я. Зоркин, Г.В. Конюшков. Саратов: СГТУ, 2006. 284 с.

2. Особенности работы выхода оксидосодержащих катодов вакуумных электронных приборов / А.Я. Зоркин, С.В. Семенов, Н.А. Вавилина и др. // Прикладные научные новации – 2015: материалы 11 Международ. науч.-практ. конф. 2015. Т. 5. С. 10-15.

3. Адсорбционный механизм образования поверхностного заряда в термоэлектронных оксидосодержащих катодах вакуумных электронных приборов / А.Я. Зоркин, С.В. Семенов, Н.А. Вавилина // Динамичная современная наука: материалы 11 Международ. науч.-практ. конф. 2015. Т. 5. С. 7-12.

4. **Зоркин А.Я.** Адсорбционный механизм образования поверхностного заряда и работа выхода оксидного катода / А.Я. Зоркин // Перспективные направления разви-

тия электронного приборостроения. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. С. 108-113.

5. **Зоркин А.Я.** Равновесие оксид – газ, состояние поверхности и работа выхода оксидного катода / А.Я. Зоркин // Вакуумная наука и техника: материалы 10 Междунар. науч.-техн. конф. М.: МИЭМ, 2003. С. 69-74.

6. **Волькенштейн Ф.Ф.** Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции / Ф.Ф. Волькенштейн. М.: Наука, 1987. 432 с.

7. **Крегер Ф.** Химия несовершенных кристаллов / Ф. Крегер. М.: Мир, 1969. 655 с.

8. **Браун О.М.** Расчет динамически равновесного состава и электропроводности кристаллов при высокой температуре в вакууме / О.М. Браун, Г.Я. Пикус, Г.Е. Чайка // Физика твердого тела. 1975. Вып. 9. С. 768-770.

Семенов Станислав Валерьевич – ассистент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav V. Semenov – Assistant Lecturer, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Вавилина Надежда Александровна – ассистент 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

Igor V. Rodionov – Dr.Sc., Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nadezhda A. Vavilina – Assistant Lecturer Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

УДК 621.3.032.213

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЭМИССИОННО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ИМПРЕГНИРОВАННОГО КАТОДА МАЛОМОЩНОГО ПРИБОРА МАГНЕТРОННОГО ТИПА

О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин

INVESTIGATION OF THE CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION OF EMISSION-ACTIVE SUBSTANCES OF IMPREGNATED CATHODE IN LOW-POWER MAGNETRON-TYPE DEVICES

O.D. Tischenko, A.A. Tishchenko, A.J. Zorkin

Для создания импрегнированных катодов повышенной долговечности проведено исследование химического и фазового состава эмиссионно-активного вещества импрегнированного катода до его постановки в прибор методами растровой электронной микроскопии, цветной (спектральной) катодолуминесценции и рентгеноспектрального микроанализа.

Ключевые слова: *катод, эмиссия, фазовый состав, химический состав*

To solve the problem with creating impregnated cathodes with increased sustainability, we conducted a research into the chemical and phase composition of emission-active substances in the impregnated cathode using the methods of scanning electron microscopy, color (spectral) cathodoluminescence and x-ray microanalysis.

Keywords: *cathode, emission, phase composition, chemical composition*

В производстве современных приборов магнетронного типа особое внимание уделяется задачам, связанным с созданием высокоэффективных и надежных катодно-подогревательных узлов, отличающихся высокой стабильностью эмиссионных свойств в условиях интенсивной электронной бомбардировки и воздействия тех или иных внешних факторов [1-3]. Не существует универсального катода, однако импрегнированные катоды заняли прочное место в производстве электровакуумных приборов. На их основе изготавливаются усилители на базе ламп бегущей волны или обратной волны, используемые для радиолокации, наземной и космической связи, телевидения, сотовой связи. Однако применение таких катодов в приборах М-типа оказалось весьма затруднительным в связи с высоким процентом брака приборов и их нестабильной работы.

Целью работы является выявление причин брака и нестабильной работы мало-мощных приборов М-типа на основе импрегнированных катодов.

Эмиссионная способность и долговечность катода определяются процессами,

протекающими в его объеме и на поверхности, и зависят от множества различных факторов, важнейшим из которых является определенный химический и фазовый состав эмиссионно-активного вещества и однородность его распределения по всему объему катода.

Для решения проблемы создания импрегнированных катодов повышенной долговечности необходимо провести исследование химического и фазового состава эмиссионно-активного вещества импрегнированного катода до его постановки в прибор.

Для этого исследовались локальные участки (20 участков размером 30×30 мкм) поверхности и объема катода (поперечный излом) методами растровой электронной микроскопии, цветной (спектральной) катодоллюминесценции и рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты исследования, представленные на фазовой диаграмме состояния тройной системы $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ (рис. 1) и РЭМ-изображениях (рис. 2, 3), свидетельствуют о неоднородности химического и фазового состава эмиссионно-активного вещества в исследованном образце.

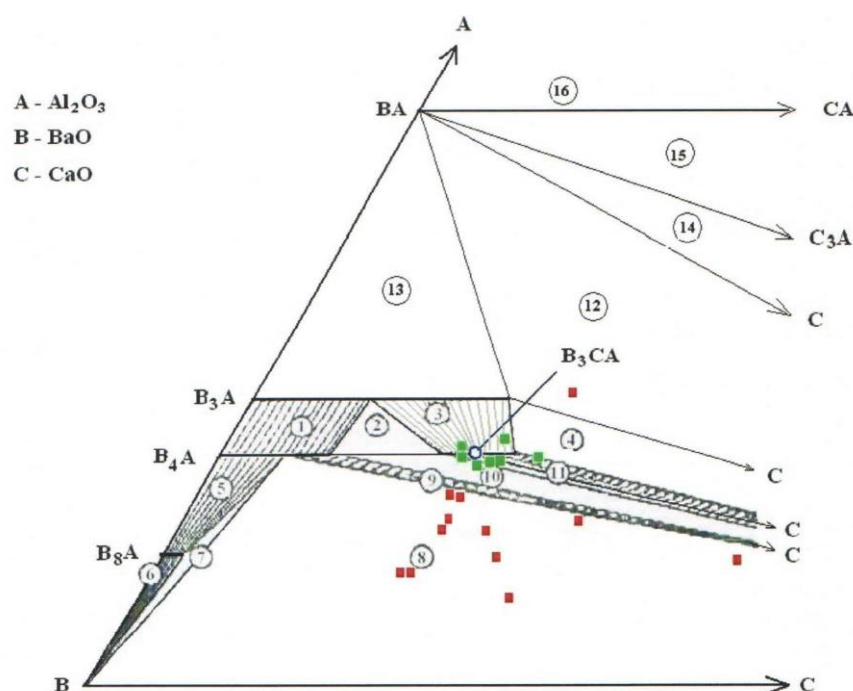


Рис. 1. Результаты исследований химического и фазового состава эмиссионного вещества импрегнированного катода, отображенные на диаграмме фазового состава тройной системы $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$

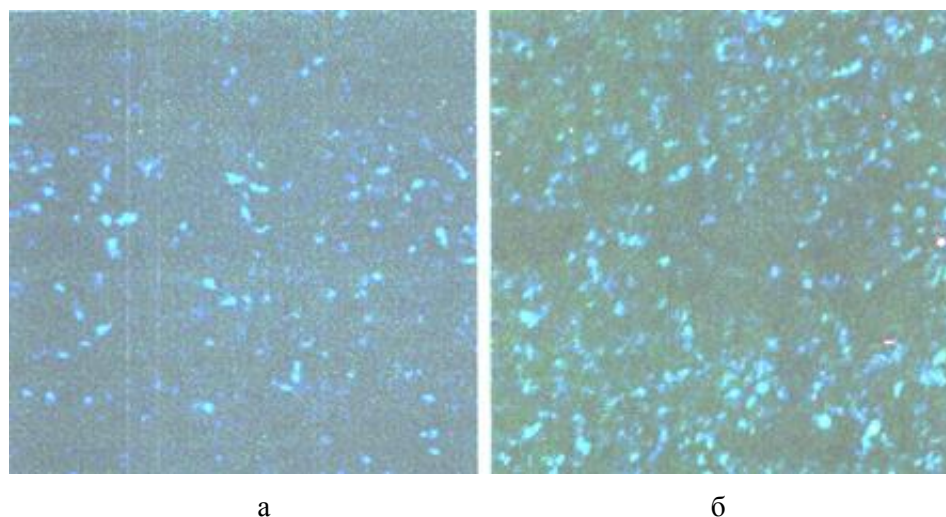


Рис. 2. Изображения рабочей поверхности (а) и поверхности скола (б) импрегнированного катода до постановки в прибор, полученные в режиме регистрации цветной катодолюминесценции. Ширина поля изображения – 200 мкм

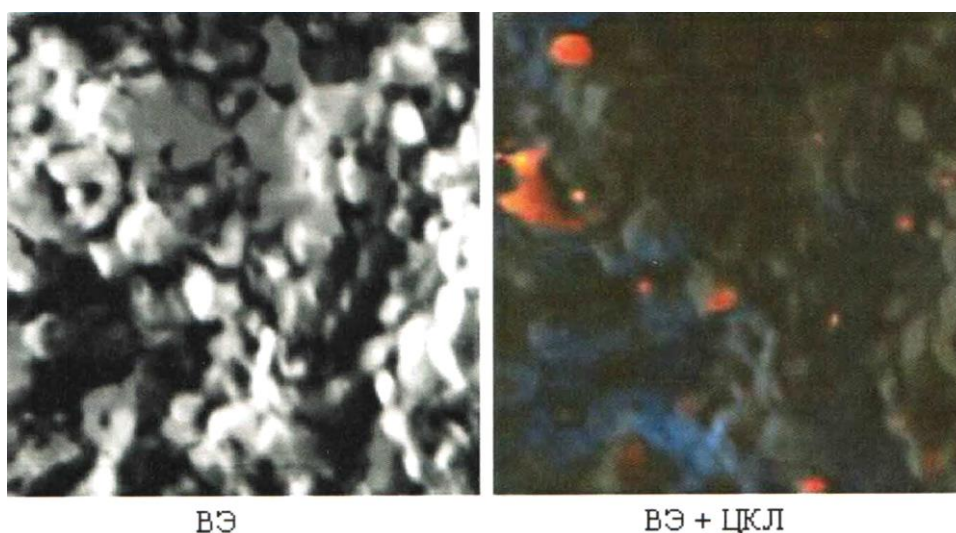


Рис. 3. Изображения поверхности импрегнированного катода до постановки в прибор, полученные в режиме регистрации вторичных электронов (ВЭ) и цветной катодолюминесценции (ЦКЛ). Ширина поля изображения – 50 мкм

Из 20 исследованных участков только 7 участков имеют химический и фазовый состав (зеленые квадраты на диаграмме), близкий к оптимальному (содержат соединение $3\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$). На остальных участках эмиссионное вещество является смесью других фаз (красные квадраты), что, безусловно, будет сказываться на эмиссионных характеристиках катода, стабильности тока термоэмиссии, скорости испарения бария и долговечности катода.

Многофазность и неоднородность фазового состава эмиссионного вещества катода также подтверждаются результатами РЭМ-

исследований рабочей поверхности и поверхности скола импрегнированного катода до постановки в прибор с использованием метода цветной катодолюминесценции (рис. 2).

Разноцветие катодолюминесценции оксидной фазы катода (рис. 3) связано с неоднородностью фазового состава эмиссионного вещества и свидетельствует о неоднородности распределения эмиссионного вещества и его фазового состава на поверхности и в объеме катода.

Итак, в результате исследований химического и фазового состава эмиссионного вещества импрегнированного катода установ-

лено, что причиной брака и нестабильной работы маломощных приборов М-типа является несовершенство используемой технологии изготовления импрегнированных катодов.

Для решения проблемы создания импрегнированных катодов повышенной дол-

говечности необходимо проводить контроль химического и фазового состава катодов на всех этапах их изготовления.

Изучение характера изменений в катодах позволит прогнозировать долговечность работы приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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 науч.-техн. конф. по вакуумной науке и технике. 2014. С. 209-214.

2. **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 // Научно-технические технологии. 2014. № 11. Т. 15. С. 32-38.

3. Патент 2380784 РФ, 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. Опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3. 11 с.

Тищенко Ольга Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тищенко Артем Александрович – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» 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, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander Ya. Zorkin – Dr.Sc., Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

МЕТОДИКА КВАЗИАНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ОСНОВНОЙ ВОЛНЫ КОАКСИАЛЬНО-СЕКТОРНОГО ВОЛНОВОДА С НЕОДНОРОДНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

А.А. Скворцов, М.Д. Иванов

A METHOD FOR QUASIANALYTIC ASSESSMENT OF THE PRIMARY WAVE TO COAXIAL SECTORIAL WAVEGUIDES WITH HETEROGENEOUS DIELECTRIC MEDIA

A.A. Skvortsov, M.D. Ivanov

Рассмотрена методика квазианалитического расчета, позволившая установить в явном виде зависимость критической длины основной волны коаксиально-секторного волновода от его геометрических размеров и электрофизических параметров неоднородного диэлектрического заполнения.

Ключевые слова: квазианалитический расчет, критическая длина, основная волна, коаксиально-секторный волновод, неоднородное диэлектрическое заполнение, прямоугольный волновод, эффективная диэлектрическая проницаемость

В настоящее время внимание разработчиков микроволновых систем различного назначения, включая СВЧ-устройства для термообработки диэлектрических материалов [1], привлекает коаксиально-секторный волновод (КСВ), заполненный неоднородным диэлектрическим материалом (рис. 1). Это связано с тем, что неоднородное диэлектрическое заполнение КСВ позволяет повысить технические характеристики и существенно расширить функциональные возможности СВЧ устройств, выполненных на его основе. Важной задачей, возникающей при построении базовых элементов та-

The article considers the method for quasianalytic assessment relating the dependence of critical length of the primary wave to coaxial sectorial waveguides on geometrical dimensions and physical parameters of heterogeneous dielectric media.

Keywords: quasianalytic assessment, critical length, primary wave, coaxial sectorial waveguide, heterogeneous dielectric media, rectangular waveguide, effective dielectric permeability

ких микроволновых систем, является определение критической длины основной волны КСВ с частичным диэлектрическим заполнением.

Определить критическую длину основной волны рассматриваемой линии передачи (ЛП) на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики не удастся из-за сложной формы границ и неоднородного диэлектрического заполнения КСВ, поэтому приходится прибегать к приближенным методам расчета, среди которых, прежде всего, необходимо выделить численные подходы

[1-5]. Основным достоинством численных методов является их универсальность, а недостатками – частный характер результатов, значительные трудности математического и вычислительного характера. Кроме того, первое приближение этих методов достаточно часто дает результат с большой погрешностью.

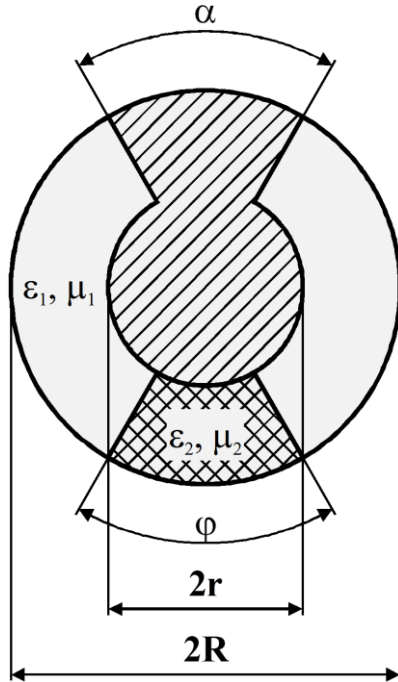


Рис. 1. Поперечное сечение КСВ с неоднородным диэлектрическим заполнением

В отличие от численных подходов приближенно-аналитические (квазианалитические) подходы к расчету электродинамических параметров волноведущих структур, базирующиеся на методах эквивалентных схем (МЭС), малых возмущений, конформных отображений и некоторых других, обладают наглядностью, возможностью выявить общие закономерности функционирования ЛП и сравнительной простотой вычислений [1, 2, 5-8]. Так, при квазианалитических расчетах электродинамических параметров волноводов различных поперечных сечений хорошо себя зарекомендовал МЭС, основанный на замене ЛП эквивалентной цепью с сосредоточенными параметрами, выбор которой зависит от физических свойств замещающей структуры и используемого подхода. Точность расчета МЭС зависит от точности определения параметров эквивалентной схемы, которые

могут быть оценены качественно или рассчитаны методами теории поля. Примером применения МЭС к расчету электродинамических параметров КСВ с неоднородным диэлектрическим заполнением могут служить полученные на его основе в работе [1] квазианалитические выражения для расчета критических длин основной и первой высшей волн исследуемой ЛП.

В настоящей работе представлен еще один квазианалитический подход к определению критической длины основной волны КСВ с неоднородным диэлектрическим заполнением, основанный на том, что данную ЛП можно рассматривать как прямоугольный волновод (ПрВ), свернутый в поперечной плоскости по окружности [7]. Эта модель позволяет рассчитать критическую длину основной волны анализируемой ЛП исходя из ее замены на эквивалентный ПрВ с неоднородным диэлектрическим заполнением, у которого размер широкой стенки равен $(\pi - \alpha/2)(R + r)$. В работе [8] приведена методика определения постоянной распространения ПрВ с неоднородным диэлектрическим заполнением, основанная на представлении рассматриваемой структуры в виде ЛП, заполненной однородным диэлектрическим материалом. С учетом сказанного, квазианалитический расчет критической длины основной волны КСВ с неоднородным диэлектрическим заполнением можно осуществить по формуле

$$\lambda_{cl} = (2\pi - \alpha)(R + r) \sqrt{\varepsilon_{эфф} \mu_{эфф}}, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{\varphi}{2\pi - \alpha} \cdot \left(1 + \frac{\sin(\pi\varphi/(2\pi - \alpha))}{\pi\varphi/(2\pi - \alpha)} \right) \quad (2)$$

и $\mu_{эфф} = \mu_1 = \mu_2$ – относительные эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости неоднородного диэлектрического заполнения КСВ.

Из выражения (2) следует, что

$$\varepsilon_{эфф} = \begin{cases} \varepsilon_1 & \text{при } \varphi = 0; \\ \varepsilon_2 & \text{при } \varphi = 2\pi - \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

С использованием рассмотренной выше квазианалитической методики (КМ) проведен расчет критической длины основной волны КСВ при различных значениях геометрических размеров и электрофизических параметров неоднородного диэлектрического заполнения. В качестве примера на рис. 2 представлены результа-

ты расчета нормированной критической длины основной волны ($\lambda_{c1}/2R$) КСВ $\varepsilon_1 = \mu_1 = \mu_2 = 1$; $\alpha = \pi/3$, полученные при различных значениях φ , r/R и ε_2 . Как следует из рис. 2, критическая длина основной волны КСВ при фиксированном α возрастает с увеличением φ , r/R и ε_2 .

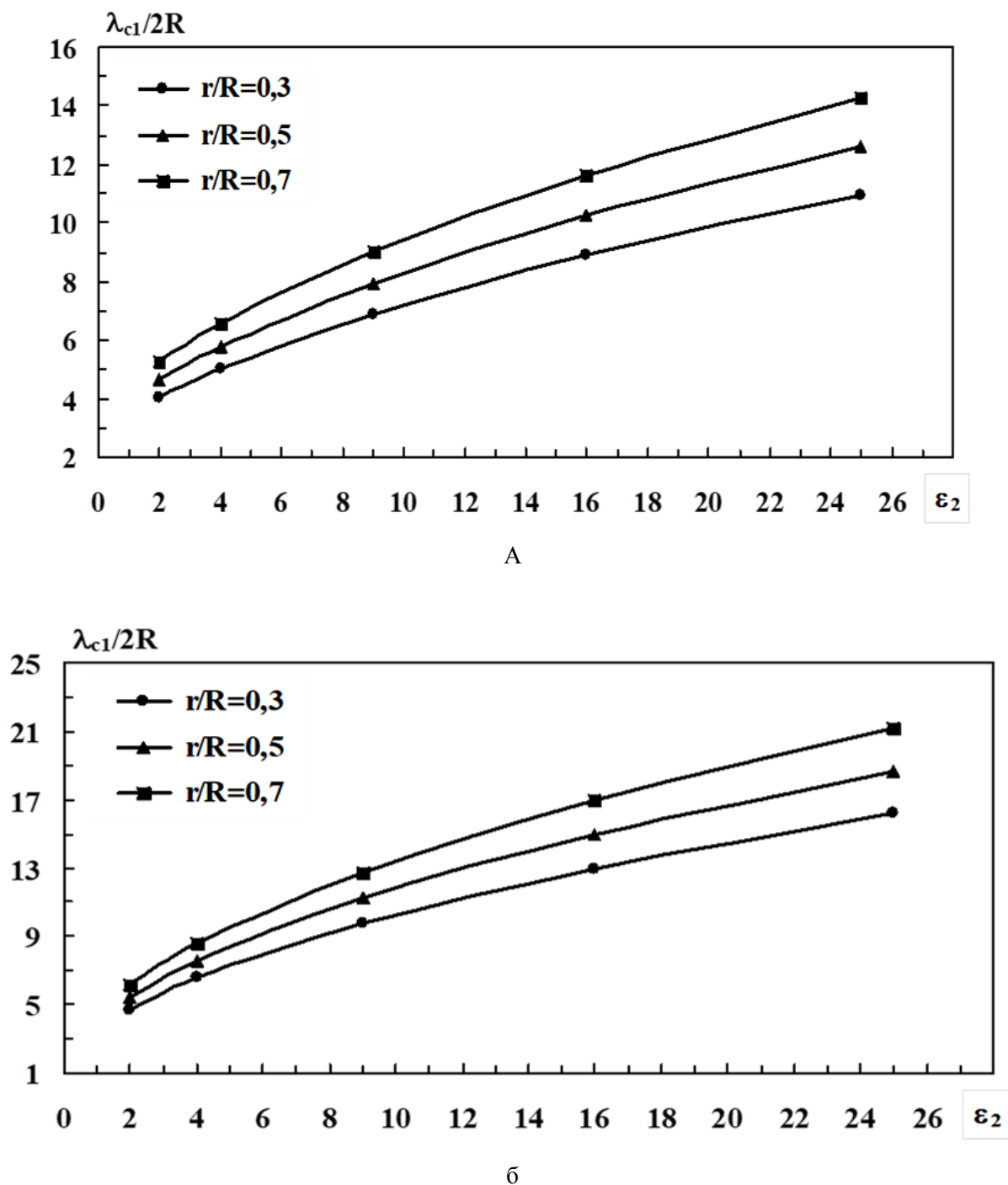


Рис. 2. Зависимость нормированной критической длины основной волны КСВ от ε и r/R при $\varphi = \pi/3$ (а) и $\varphi = \pi$ (б)

Таким образом, рассмотренная в настоящей работе методика позволила установить в явном виде зависимость критической длины основной волны КСВ от его геометрических размеров и электрофизических

параметров неоднородного диэлектрического заполнения, которая может быть с успехом использована при проектировании СВЧ систем различного назначения, выполненных на основе рассматриваемой ЛП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коломейцев В.А.** Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч. 1 / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров. Саратов: СГТУ, 1997. 160 с.

2. Волноводы с поперечным сечением сложной формы / под ред. В.М. Седых. Харьков: Вища школа, 1979. 128 с.

3. Расчет характеристик линий передачи / В.Б. Каток, В.И. Лозяной, А.Б. Олексенко и др. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1985. 100 с.

4. Линии передачи сложных сечений / Г.Ф. Заргано, А.М. Лерер, А.М. Ляпин, Г.П. Синявский. Ростов-н/Д.: Изд-во РГУ, 1983. 320 с.

5. **Сатаров И.К.** Микроволновые устройства с бегущей волной для термообработки диэлектрических материалов /

И.К. Сатаров, В.В. Комаров. Саратов: СГТУ, 2000. 119 с.

6. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.

7. **Скворцов А.А.** Квазианалитические выражения для расчета волнового сопротивления коаксиально-секторного волновода / А.А. Скворцов // Антенны. 2017. Вып. 8. С. 26-29.

8. **Chukhov V.V.** One method of propagation constants measurement / V.V. Chukhov // Proceedings of the 4-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'01). Kharkov, Ukraine. 2001. Vol. 2. P. 820-822.

Скворцов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Иванов Михаил Дмитриевич – курсант Военной академии воздушно-космической обороны имени маршала Советского Союза Г.К. Жукова

Aleksei A. Skvortsov – PhD, Associate Professor Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mikhail D. Ivanov – Air Force cadet, Military Academy of Aerospace Defense GK Zhukov

Статья поступила в редакцию 11.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ С НЕОДНОРОДНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ СВЧ УСТРОЙСТВ

А.А. Скворцов

APPLICATION OF RECTANGULAR WAVEGUIDES WITH HETEROGENEOUS DIELECTRIC MEDIA AS COUPLING ELEMENTS IN MICROWAVE DEVICES

A.A. Skvortsov

Для уменьшения перепада передаточных характеристик СВЧ устройств на связанных линиях передачи предложено применение в качестве шлейфов прямоугольных волноводов с неоднородным диэлектрическим заполнением, отличающихся повышенными значениями критической длины основной волны и диапазона одноволнового режимы работы. Рассмотрена методика расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ устройства на связанных по широкой стенке посредством прямоугольных волноводов с неоднородным диэлектрическим заполнением линиях передачи.

Ключевые слова: СВЧ устройство, коэффициент передачи, шлейфовое разветвление, прямоугольный волновод связи, основная волна, первая высшая волна, неоднородное диэлектрическое заполнение, эффективная диэлектрическая проницаемость

В настоящее время все большее применение в СВЧ технике находят микроволновые устройства на связанных по широкой стенке посредством шлейфовых разветвлений линиях передачи (ЛП) различных поперечных сечений [1-5]. При выборе элементов связи анализируемых СВЧ устройств необходимо учитывать, что для получения малого перепада характеристики переходного ослабления критическая длина основной волны используемых в качестве шлейфов волноводов должна быть больше

To decrease variations in transfer characteristics of microwave devices over coupled transmission lines, it is proposed to apply rectangular waveguide loops with heterogeneous dielectric media that are characterized for enhanced values for the critical length of the primary wave and single-wave operation ratio. Special focus is made on the methodology for estimating transfer efficiency of loop junctions in microwave devices over coupled rectangular waveguides with heterogeneous dielectric media in transmission lines.

Keywords: microwave device, transfer efficiency, loop junction, rectangular waveguide coupler, primary wave, heterogeneous dielectric media, efficient dielectric permeability.

критических длин основных волн связываемых ЛП [1]. С учетом сказанного выше в качестве шлейфов достаточно часто используют волноводы сложных сечений, отличающиеся не только малыми габаритами, но и повышенными значениями критической длины основной волны и диапазона одноволнового режима работы [1, 6, 7].

Необходимо отметить, что имеется еще одна принципиальная возможность уменьшения перепада передаточных характеристик шлейфовых разветвлений,

связанная с применением в качестве элементов связи прямоугольных волноводов (ПрВ) с диэлектрическим заполнением [1]. Однако в отличие от элементов связи сложных сечений у шлейфов, выполненных на ПрВ с однородным диэлектрическим заполнением, увеличивается критическая длина не только основной, но и первой высшей волн, что при определенных условиях может привести к одновременному возбуждению двух типов волн. При этом критическая длина первой высшей волны будет расположена в рабочем диапазоне связываемых волноводов.

Одним из путей уменьшения изменения критической длины первой высшей волны элементов связи СВЧ устройств является применение в качестве шлейфов ПрВ с неоднородным диэлектрическим заполнением. Пусть связь между каналами СВЧ устройства осуществляется через некоторое

$$|\dot{K}_{ш}| = \frac{a_1 b_1 \lambda_{\epsilon_{ш}} Z_{0ш}}{2\sqrt{k^*} \left(\Phi_1^{-1} \Phi_2^{-1} \lambda_{\epsilon_1} \lambda_{\epsilon_2} Z_{01} Z_{02} \right)^{1/2}} \left[(\cos(\chi_{c11} h_1) \sin \gamma_1)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\lambda_{\epsilon_1}}{\lambda_{c11}} \times \sin(\chi_{c11} h_1) \cos \gamma_1 \right)^2 \right]^{1/2} \left[(\cos(\chi_{c12} h_2) \sin \gamma_2)^2 + \left(\frac{\lambda_{\epsilon_2}}{\lambda_{c12}} \sin(\chi_{c12} h_2) \cos \gamma_2 \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\sqrt{k^*} \approx 1$; Φ_1 и Φ_2 – параметры, зависящие от формы поперечного сечения первичного и вторичного волноводов; h_1, h_2 – смещение центра шлейфа относительно средней линии соответственно первичного и вторичного волноводов; γ_1, γ_2 – углы поворота волновода связи относительно средних линий тех же волноводов; $\lambda_{\epsilon_1}, \lambda_{\epsilon_2}$ и $\lambda_{\epsilon_{ш}}$ – длины основных волн в первичном, вторичном волноводах и шлейфе; $\chi_{c11} = 2\pi/\lambda_{c11}$ и $\chi_{c12} = 2\pi/\lambda_{c12}$ – поперечные волновые числа основной волны в первичном и вторичном волноводах; λ_{c11} и λ_{c12} – критические длины основной волны в первичном и вторичном волноводах; $Z_{01} = \sqrt{\mu_1 \mu_0 / \epsilon_1 \epsilon_0}$, $Z_{02} = \sqrt{\mu_2 \mu_0 / \epsilon_2 \epsilon_0}$ и $Z_{0ш} = \sqrt{\mu_{ш} \mu_0 / \epsilon_{ш\text{эфф}} \epsilon_0}$ – волновые сопротивления материалов, заполняющих первичный, вторичный волноводы и шлейф; ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоян-

ные; $\epsilon_1, \epsilon_2, \mu_1$ и μ_2 – относительные диэлектрические и магнитные проницаемости материалов, заполняющих первичный и вторичный волноводы; λ – рабочая длина волны в свободном пространстве; $\epsilon_{ш\text{эфф}}$ и $\mu_{ш} = \mu_{ш1} = \mu_{ш2}$ – относительные эффективная диэлектрическая и магнитная проницаемости материалов, заполняющих прямоугольный волновод связи.

Для ПрВ связи с центральным симметричным расположением слоистого диэлектрического материала ($\epsilon_{ш1} < \epsilon_{ш2}$), границы раздела сред которого расположены параллельно силовым линиям напряженности поперечного электрического поля (рис. 1), критические длины основной ($\lambda_{c1ш}$) и первой высшей ($\lambda_{c2ш}$) волн с учетом результатов, полученных в работах [8, 9], определяются выражениями

$$\lambda_{c1ш} = 2a \sqrt{\epsilon_{ш\text{эфф}} H_{10} \mu_{ш}}, \quad (2)$$

$$\lambda_{c2ш} = a \sqrt{\epsilon_{ш\text{эфф}} H_{20} \mu_{ш}}, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon_{шэффH_{10}} = \varepsilon_{шэфф} = \varepsilon_{ш1} + (\varepsilon_{ш2} - \varepsilon_{ш1}) \frac{w_{ш}}{a_{ш}} \left(1 + \frac{\sin(\pi w_{ш}/a_{ш})}{\pi w_{ш}/a_{ш}} \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{шэффH_{20}} = \varepsilon_{ш1} + (\varepsilon_{ш2} - \varepsilon_{ш1}) \frac{w_{ш}}{a_{ш}} \left(1 - \frac{\sin(2\pi w_{ш}/a_{ш})}{2\pi w_{ш}/a_{ш}} \right) \quad (5)$$

– относительные эффективные диэлектрические проницаемости неоднородного заполнения шлейфа для основной и первой

высшей волн; $\varepsilon_{ш1}$ и $\varepsilon_{ш2}$ – относительные диэлектрические проницаемости слоистого заполнения шлейфа.

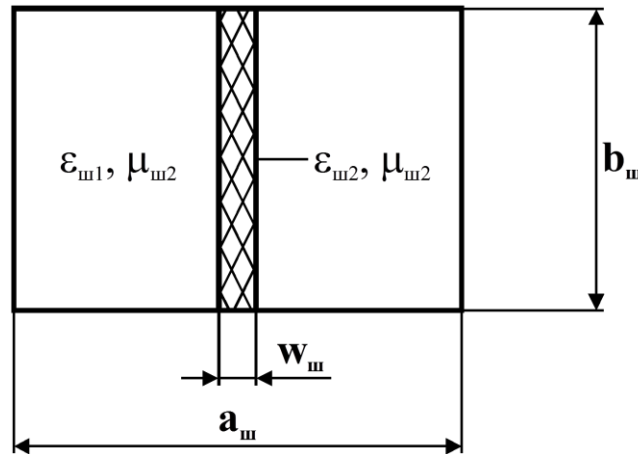


Рис. 1. Поперечное сечение ПрВ связи с центральным симметричным расположением слоистого диэлектрического материала, границы раздела сред которого расположены параллельно силовым линиям поперечной электрической составляющей поля его основной волны

В результате коэффициент широкополосности шлейфа, определяющий диапазон его одноволновой работы, вычисляется по формуле

$$\xi_{ш} = \frac{\lambda_{с1ш}}{\lambda_{с2ш}} = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon_{шэффH_{10}}}{\varepsilon_{шэффH_{20}}}} = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon_{ш1} + (\varepsilon_{ш2} - \varepsilon_{ш1}) \left(1 + \text{sinc}(\pi w_{ш}/a_{ш}) \right) w_{ш}/a_{ш}}{\varepsilon_{ш1} + (\varepsilon_{ш2} - \varepsilon_{ш1}) \left(1 - \text{sinc}(2\pi w_{ш}/a_{ш}) \right) w_{ш}/a_{ш}}}. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что при любых значениях $\varepsilon_{ш1}$ и $\varepsilon_{ш2}$ ($\varepsilon_{ш1} < \varepsilon_{ш2}$)

$$\xi_{ш} = 2 \text{ при } w_{ш} = 0 \text{ или } w_{ш} = a_{ш}. \quad (7)$$

Для более детального анализа поведения коэффициента широкополосности ПрВ связи была исследована его зависимость от нормированного размера $w_{ш}/a_{ш}$ при $\varepsilon_{ш1} = \mu_{ш1} = \mu_{ш2} = 1$, графики которой представлены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что в отличие от шлейфа, заполненного однородным диэлектрическим материалом, коэффициент широкополосности шлейфа прямоугольного поперечного сечения с рассматриваемым видом неоднородного

диэлектрического заполнения $\xi_{ш} > 2$ при $0 < w_{ш}/a_{ш} > 1$.

При этом графики зависимости $\xi_{ш}(\varepsilon_{ш2}, w_{ш}/a_{ш})$ при фиксированных значениях $\varepsilon_{ш2}$ имеют максимумы, которые с увеличением $\varepsilon_{ш2}$ смещаются в область меньших значений $w_{ш}/a_{ш}$. Необходимо также отметить, что коэффициент широкополосности в зависимости от $\varepsilon_{ш2}$ наиболее сильно изменяется при $w_{ш}/a_{ш} \leq 0,3$ и практически не изменяется при $w_{ш}/a_{ш} \geq 0,5$. Объясняется это тем, что при малых значениях $w_{ш}/a_{ш}$ диэлектрическая пластина располагается в максимуме поперечной электрической составляющей поля основной волны и ми-

нимуме поперечной электрической составляющей поля первой высшей волны [10]. Из вышесказанного следует, что проанализированное слоистое диэлектрическое заполнение в установленном интервале зна-

чений $w_{ш}/a_{ш}$ существенно увеличивает критическую длину основной волны и расширяет диапазон одноволновой работы, мало влияя на критическую длину первой высшей волны.

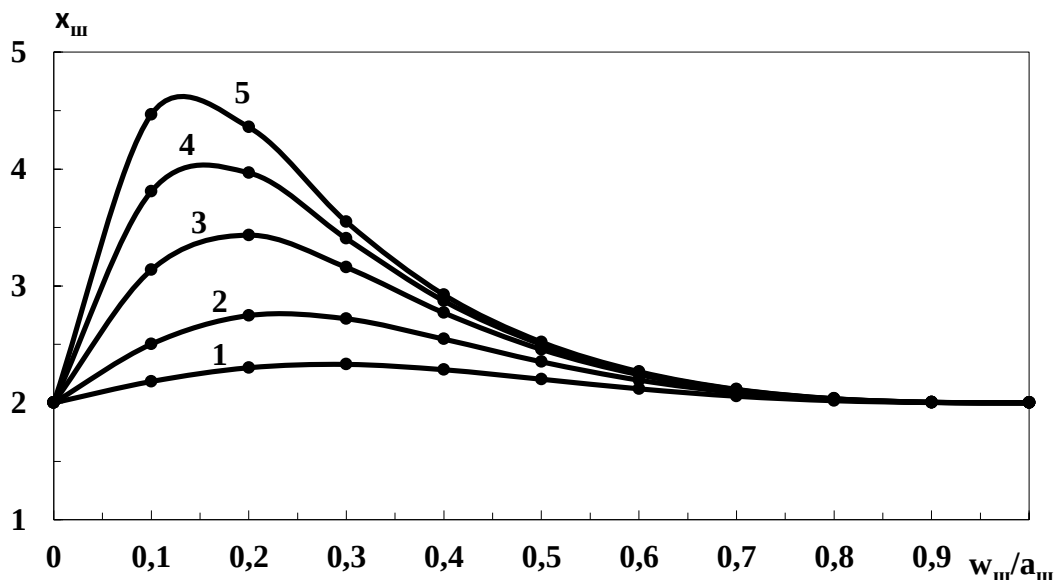


Рис. 2. Зависимость коэффициента широкополосности ПрВ связи от $w_{ш}/a_{ш}$ при от различных $\epsilon_{ш2}$: 1 – $\epsilon_{ш2} = 2$; 2 – $\epsilon_{ш2} = 4$; 3 – $\epsilon_{ш2} = 9$; 4 – $\epsilon_{ш2} = 16$; 5 – $\epsilon_{ш2} = 25$

Таким образом, проведенные выше исследования показали, что ПрВ связи с рассмотренной конфигурацией неоднородного диэлектрического заполнения отличается повышенными значениями критической длины основной волны и диапазона одно-

волнового режима работы и может быть с успехом использован в качестве шлейфов СВЧ устройств на связанных ЛП для уменьшения перепада их передаточных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сосунов В.А.** Шлейфовые волноводные разветвления и устройства на их основе / В.А. Сосунов. Саратов: СГТУ, 1995. 104 с.

2. **Сосунов В.А.** СВЧ устройство на связанных прямоугольном и полукруглом волноводах для термообработки жидких и сыпучих диэлектрических материалов / В.А. Сосунов, А.А. Скворцов, Д.А. Иовов // Элементы и устройства систем низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2004. С. 45-47.

3. **Скворцов А.А.** СВЧ устройство на связанных прямоугольных и шестигранном волноводах для термообработки диэлектрических материалов / А.А. Сквор-

цов // Вестник СГТУ. 2006. № 1. Вып. 1. С. 144-148.

4. **Скворцов А.А.** Разработка СВЧ-устройства на связанных волноводах для равномерного нагрева диэлектрических материалов / А.А. Скворцов, М.А. Соловьев, Е.А. Торгашов // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXV Междунар. науч. конф. Харьков: Нац. техн. ун-т, 2012. Т. 9. С. 165-167.

5. **Скворцов А.А.** Применение делителей мощности на связанных посредством шлейфовых разветвлений волноводах для термообработки диэлектрических материалов / А.А. Скворцов // Радиотехника. 2015. № 7. С. 70-75.

6. **Скворцов А.А.** Приближенно-аналитические соотношения для расчета передаточных характеристик шлейфовых разветвлений СВЧ устройств на связанных прямоугольных волноводах / А.А. Скворцов, А.А. Евсейкин // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 10. С. 39-45.

7. **Скворцов А.А.** Особенности приближенно-аналитического расчета коэффициентов передачи шлейфовых разветвлений СВЧ устройств на двугребневом волноводе с элементами связи сложных сечений / А.А. Скворцов, Г.И. Сидоров // Вестник СГТУ. 2010. № 1. С. 168-174.

8. **Почерняев В.Н.** Постоянная распространения частично заполненного

волновода / В.Н. Почерняев, Л.В. Скрыпник // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31. № 5. С. 63-64.

9. **Chukhov V.V.** One method of propagation constants measurement / V.V. Chukhov // Proceedings of the 4-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'01). Kharkov, Ukraine. 2001. Vol. 2. P. 820-822.

10. **Бергер М.Н.** Прямоугольные волноводы с диэлектриками / М.Н. Бергер, Б.Ю. Капилевич. М.: Сов. радио, 1973. 256 с.

Скворцов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksei A. Skvortsov – PhD, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 09.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Экземпляры номеров журнала «Вопросы электротехнологии» можно приобрести в редакции журнала 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 (СГТУ им. Гагарина Ю.А., кафедра ЭЛЭТ, корпус 1, первый этаж, ком. 133 а, тел.: 8 (8452) 99-87-63).

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ СЕРЕБРА

И.В. Перинская

ELEMENTAL COMPOSITION OF THE TITANIUM SURFACE IMPLANTED WITH SILVER IONS

I.V. Perinskaya

Исследован способ формирования биосовместимого серебросодержащего слоя с антимикробным эффектом методом ионно-лучевого модифицирования и рассмотрено влияние облучения ионами серебра на твердость, усталостную прочность и элементный состав поверхности титановых элементов медицинской техники.

Ключевые слова: ионно-лучевое модифицирование, твердость, усталостная прочность

Научно-технический прогресс в области создания медицинской техники, в том числе внутрикостных имплантатов нового поколения, требует совершенствования существующих и разработки принципиально новых технологических процессов, направленных на повышение их надежности и долговечности. При этом финишные методы обработки, формирующие физико-химическое состояние поверхностного слоя медицинских изделий, играют в большинстве случаев определяющую роль.

Внутрикостные имплантаты относятся к наиболее востребованным изделиям медицинской техники при ортопедическом лечении и функционируют в весьма широком диапазоне знакопеременных циклических, динамических и статических нагрузок, возникающих при установке и функционировании конструкций. Они подвержены воз-

The investigation deals with the method applied to form the biocompatible silver-containing coatings with antimicrobial effect by means of ion-beam modification. The influence of irradiation with silver ions for hardness, fatigue strength and elemental composition of the titanium surface elements in medical equipment is analysed.

Keywords: ion-beam modification, hardness, fatigue strength

действию окислительных продуктов окружающей биологической ткани и патогенной среды.

Для улучшения характеристик материала внутрикостных имплантатов, зависящих от состояния поверхности и определяющих твердость, усталостную прочность, биосовместимость, существует целый набор технологических процессов: вакуумное напыление, микродуговое оксидирование, азотирование, электроплазменные покрытия, однако каждый из них в отдельности либо недостаточно эффективен и управляем, либо не является универсальным [1, 2].

Метод ионно-лучевой модификации обладает рядом преимуществ:

– не лимитируется диффузионным процессом, так что химические и структурные характеристики поверхности могут быть изменены в широком диапазоне величин;

– механические свойства в объеме материала сохраняются на заданном уровне при одновременной оптимизации химического состава и структуры поверхности, при этом резкой границы между зоной ионной имплантации и основой материала нет.

Антимикробные серебросодержащие покрытия, синтезированные на внутрикостных имплантатах, позволяют избежать многих осложнений после операций вживления, связанных с воспалительными процессами, сократить число ревизионных операций, ускорить приживание имплантата. В настоящее время серебро рассматривается не только как вещество, обладающее антимикробными свойствами, но и как микроэлемент, который является необходимой составной частью тканей любого живого организма [3-5].

Научная задача состоит в экспериментальном исследовании способа формирования биосовместимого антимикробного серебросодержащего покрытия, которое обеспечивает создание развитой морфологии поверхности на наноуровне с антимикробным эффектом в прилегающих к эндопротезу тканях с высокой воспроизводимостью и управляемостью, присущей методу ионной модификации, что способствует увеличению выхода годных изделий при остеointegrации имплантата.

Образцы титана ВТ1-0 «титан технический» [6] представляли пластины 25×20 мм

толщиной 2 мм, вырезанные из листа электроискровым способом. Механически обработанную, полированную поверхность титановых образцов облучали в вакуумной среде углекислого газа (CO_2) ионами серебра Ag^+ на установке ионного легирования «Везувий-5» с ускоряющим напряжением 40-150 кВ и дозой до 10^{17} ион/см² с образованием углеродной серебросодержащей алмазоподобной беспористой пленки с антимикробными свойствами.

Микротвердость поверхностных слоев измеряли методом вдавливания алмазного индентора на установке ПМТ-3 при нагрузке 20 г в течение 15 с. Испытания на усталостную прочность осуществляли методом знакопеременного консольного изгиба до разрушения с частотой 22,5 Гц. Распределение элементов по глубине определяли методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

Экспериментально полученными параметрами модификации ионами серебра Ag^+ являются: ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = 100\text{-}150$ кВ и доза $\Phi = (1\text{-}4) \cdot 10^{17}$ ион/см², причем за пределами данного диапазона не происходит формирования углеродного серебросодержащего алмазоподобного покрытия титановой поверхности, снижается твердость и усталостная прочность изделий (рис. 1, 2), как и в случае облучения титана ионами аргона [7].

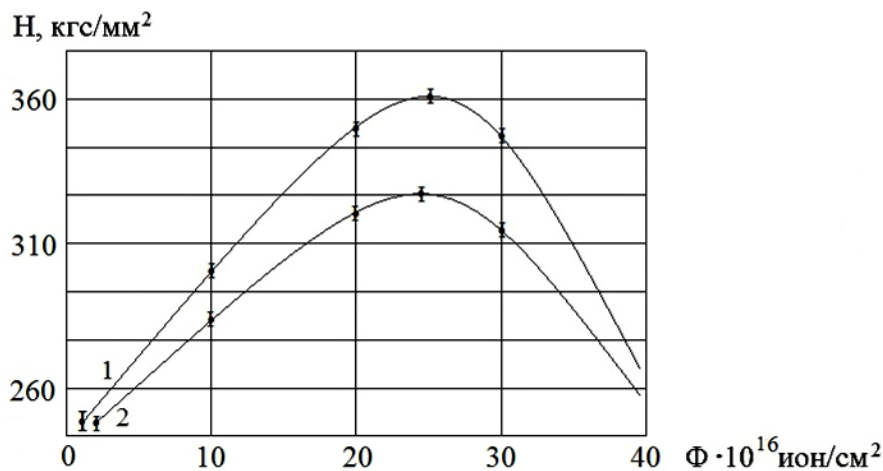


Рис. 1. Дозовая зависимость микротвердости титана при имплантации ионов серебра Ag^+ : 1 – $U_{\text{уск}} \text{Ag}^+ = 150$ кВ; 2 – $U_{\text{уск}} \text{Ag}^+ = 100$ кВ

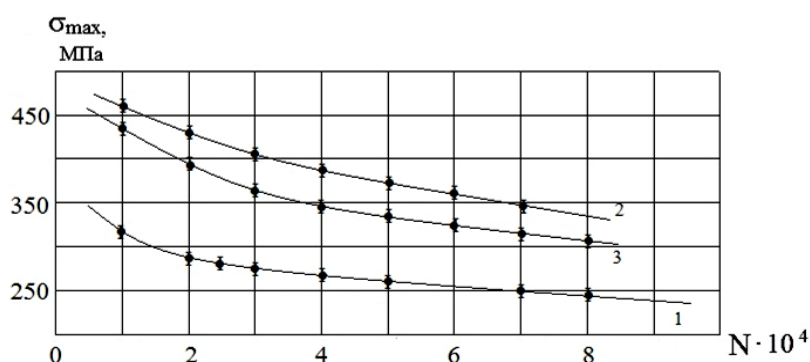


Рис. 2. Влияние имплантации ионов Ag^+ на усталостную прочность титана: 1 – Ti; 2 – $\Phi_{\text{Ag}^+} = 2,5 \cdot 10^{17}$ ион/см², $U_{\text{уск Ag}^+} = 150$ кВ; 3 – $\Phi_{\text{Ag}^+} = 2,5 \cdot 10^{17}$ ион/см², $U_{\text{уск Ag}^+} = 100$ кВ

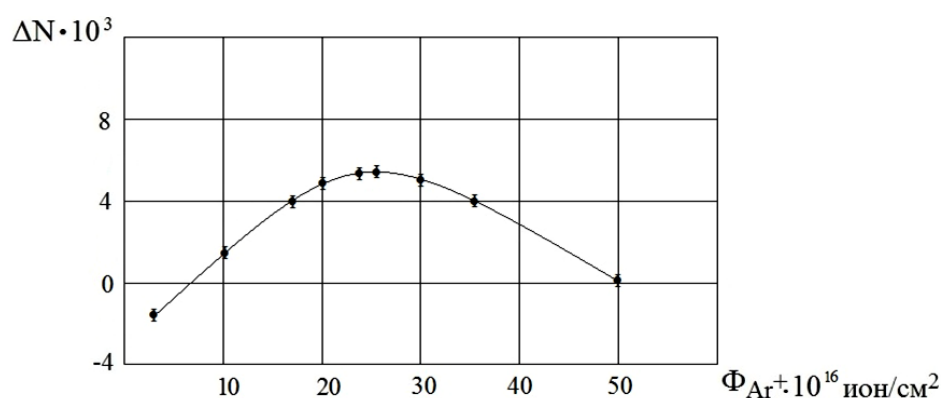


Рис. 3. Зависимость усталостной прочности титана ВТ1-0 от дозы ионов Ag^+

Зависимость микротвердости от дозы и ускоряющего напряжения ионов серебра имеет вид (рис. 1), соответствующий представлениям [8], что увеличение микротвердости при ионно-лучевой обработке связано с образованием радиационных дефектов, закрепляющих дислокации.

Увеличение усталостной прочности при облучении титана ионами имеет вид, соответствующий представлениям [7].

Максимальное увеличение усталостной прочности происходит при дозе имплантации ионов Ag^+ $\Phi = (1-4) \cdot 10^{17}$ ион/см², то есть совпадает с максимумом дозовой зависимости твердости. Зависимость от ускоряющего напряжения ионов в исследованном диапазоне незначительна. Это связано с механизмами формирования углеродной серебросодержащей пленки на титане. Удаление этого слоя химическим травлением приводит к изменению морфологии, ухудшению усталостных свойств и уменьшению микротвердости [9].

По данным вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) поверхность по-

лученных титановых имплантатов с серебросодержащим биосовместимым покрытием характеризовалась распадом окислов, увеличением концентрации свободного кислорода и повышением концентрации углерода и углеродсодержащих соединений (углеводородов), значительным повышением концентрации серебра, причем концентрация углерода и серебра вырастала и в приповерхностном объеме титана (см. таблицу).

В результате при таких технологических условиях на поверхности титанового имплантата формируется серебросодержащее биосовместимое покрытие с повышенными значениями микротвердости и усталостной прочности.

Итак, максимальное увеличение усталостной прочности происходит при дозе имплантации ионов серебра Ag^+ $\Phi = (1-4) \cdot 10^{17}$ ион/см² и совпадает с максимумом зависимости микротвердости от дозы одноименных ионов при ионно-лучевой модификации титановой основы имплантатов.

Элементный состав по данным ВИМС

Элемент, соединение	Масса, а.е.м.	Содержание, отн. ед.		Относительное приращение
		исходн.	облучен.	
C	12	500	600	1,2
CH	13	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	1,0
CH ₂ , (N)	14	190	230	1,2
CH ₃ , (NH)	15	250	300	1,2
O, (CH ₄)	16	180	220	1,2
H ₂ O	18	300	700	2,3
N ₂ , (CO)	28	1600	4700	2,9
O ₂	32	18	13	0,7
CO ₂	44	250	750	3,0
Fe	56	60	400	6,7
FeO	72	170	130	0,76
Ag	108	26	1200	46

Увеличение микротвердости и усталостной прочности ионно-модифицированной титановой основы имплантатов связано с формированием углеродной серебросодержащей пленки при облучении ионами серебра (Ag^+) в вакуумной среде углекислого газа.

Данные вторичной ионной масс-спектрометрии свидетельствуют о формировании на поверхности титановых имплантатов углеродной серебросодержащей пленки при энергетическом воздействии

ионов серебра в процессе ионно-лучевого модифицирования в вакуумной среде углекислого газа.

Формируемое серебросодержащее биосовместимое покрытие обладает антимикробными свойствами, которые обусловлены комплексом терапевтических свойств, присущих серебросодержащим покрытиям и препаратам серебра, что будет способствовать быстрому и надежному приживлению имплантата в биологических тканях за счет наименьшего процента их отторжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ройх И.Л.** Нанесение защитных покрытий в вакууме / И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунова, С.Н. Федосов. М.: Машиноведение, 1976. 362 с.

2. **Брынзан А.П.** Применение микродугового оксидирования для получения диэлектрических покрытий / А.П. Брынзан, Ч.Т. Канцер, В.А. Каплин // Электронная обработка металлов. 1990. № 4. С. 20-21.

3. **Родионов И.В.** Имплантационные материалы с антисептическими и антитромбогенными свойствами / И.В. Родионов // Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2009: Materiały V Międzynar. nauk.-prakt. konf. Przemyśl, Polska: Nauka i studia. Vol. 8 (Medycyna). S. 3-20.

4. **Карпов С.В.** Антисептические свойства оксидированных остеофиксаторов, обогащенных ионами меди и серебра / С.В. Карпов // Vědecký pokrok na přelomu tisíciletí – 2011: materiály VII Mezinár. vědecko-prakt. konf. Praha, Czech Republic: Publishing House «Education and Science» s.r.o. Díl 20. S. 46-48.

5. **Родионов И.В.** Исследование приживаемости медицинских титановых имплантатов с паротермическим серебросодержащим оксидным покрытием / И.В. Родионов // Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2011: materiały VII Międzynar. nauk.-prakt. konf. Przemyśl, Polska: Nauka i studia. Vol. 40 (Medycyna). S. 72-75.

6. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав. Структура. Свойства / А.А. Ильин, Б.А. Калачев, И.С. Полькин. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 186 с.

7. Перинская И.В. Ионно-модифицированный титан для медицинских изделий / И.В. Перинская, В.П. Мещанов, В.В. Перинский // Технология металлов, 2016. № 5. С. 34-39.

8. Влияние параметров облучения ионами Si^+ и Ar^+ на механические свой-

ства и состав поверхности слоев титанового сплава / П. В. Быков и др. // Известия Академии наук. Сер. физическая. 2004. Т. 68. № 3. С. 443-446.

9. Перинская И.В. Ионно-лучевое конструирование материалов СВЧ микроэлектроники / И.В. Перинская, В.В. Перинский, И.В. Родионов. Саратов: ИЦ «Наука», 2016. 244 с.

Перинская Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Perinskaya – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 09.09.17, принята к опубликованию 20.09.17

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛОВ

И.В. Родионов, С.К. Сперанский

INVESTIGATING THE PROPERTIES OF FUNCTIONAL ELCTROTHERMAL OXIDE COATINGS USING FRACTALS

I.V. Rodionov, S.K. Speransky

Представлены результаты экспериментального исследования микроструктуры и твердости термически оксидированных поверхностей образцов из стали 12X18H9T, а также предложено описание морфологии получаемых покрытий с помощью фрактального анализа. Показаны зависимости фрактальной размерности от температуры и продолжительности оксидирования стальных образцов в цилиндрической печи сопротивления, а также установлена взаи-

The article presents the results of experiments relating the research into microstructure and hardness of thermally oxidized surface of the steel sample 12X18H9T. Additionally, it was proposed to use the techniques of fractal analysis to describe the morphology of obtained coatings. The dependence of fractal dimension on the temperature and length of oxidized steel samples in the cylinder resistance furnace was demonstrated. The relationship between

мощность твердости оксидных покрытий и фрактальной размерности.

Ключевые слова: функциональные покрытия, фракталы, электротермическое оксидирование, цилиндрическая печь сопротивления

Проблема формирования качества поверхности и, в частности, такой важнейшей ее характеристики, как морфология, приобретает актуальность в связи с созданием новых технологий обработки материалов [1-9]. Морфологический анализ позволяет дать количественную оценку структуры поверхностного слоя при технологическом воздействии на материал различных процессов.

При использовании газотермических методов оксидирования для получения функциональных покрытий возникают трудности в описании и оценке морфологии поверхности зондовым и оптико-микроскопическим методами [5]. Форма элементов морфологии, их распределение на обработанной площади поверхности значительно отличаются от традиционного представления о них. Например, считается, что в условиях процесса обработки резанием при анализе структуры сформированной поверхности рассматривается периодическое чередование «выступов» и «впадин», описываемых в рамках евклидовой геометрии (определяется характерный размер). Однако элементы морфологии, возникающие при воздействии на материал концентрированных потоков энергии, высоких давлений, механических нагрузок весьма специфичны и имеют необычную форму, в частности грибообразную, гребешковую, чешуйчатую, бутылкообразную и т.п. [10]. Распределение этих элементов по поверхности, как правило, не носит периодического характера и имеет различные плотности вероятностей. Не имея методики оценки топографических свойств таких поверхностей и их геометрических характеристик, адекватно отражающей реальные процессы формирования поверхностного рельефа, невозможно удовлетворительно предсказать поведение этой поверхности в процессе эксплуатации детали или изделия. Осо-

hardness of oxidized coatings and fractal dimension was determined.

Keywords: functional coating, fractals, electrothermal oxidation, cylinder furnace, resistance.

бая заинтересованность в такой оценке проявляется в прогнозировании эксплуатационных характеристик сложных технических систем с повышенными требованиями по надежности и безопасности функционирования. Все это ставит задачу разработки новых подходов к оценке морфологии функциональных поверхностей.

Одним из возможных направлений поиска таких подходов является использование теории фракталов, а в качестве оценочного количественного параметра – фрактальной (дробной) размерности D [10].

Методика выполнения экспериментальных исследований. Для эксперимента были изготовлены опытные образцы в виде прямоугольных пластин площадью 200 мм^2 и толщиной 3 мм. Материалом образцов являлась нержавеющая хромоникелевая сталь 12X18Н9Т (ГОСТ 5632-2014). Перед процессом оксидирования поверхность пластинчатых образцов подвергалась абразивно-струйной обработке частицами корундового абразива Al_2O_3 дисперсностью 150-250 мкм при давлении воздушно-абразивной струи 0,67 МПа в течение 30 с для формирования исходной микрошероховатости и создания множества энергетически неоднородных участков, которые при оксидировании являлись центрами кристаллизации и повышали химическую активность поверхности. После предварительной абразивно-струйной обработки стальные образцы проходили ультразвуковую очистку в спиртовом моющем растворе при частоте УЗ-колебаний 22 кГц в течение 3 мин с целью удаления имеющихся жировых загрязнений, ухудшающих взаимосвязь создаваемых оксидных покрытий с металлической основой. Термическое оксидирование стальных образцов осуществлялось в экспериментальной цилиндрической печи сопротивления, выполненной в виде одно-

камерной конструкции с нихромовым спиральным нагревательным элементом и специальной теплоизоляцией (рис. 1). Значения напряжения на нихромовом нагревателе задавались с помощью лабораторного автотрансформатора и соответствовали определенным значениям температуры

воздушной окислительной атмосферы в рабочей зоне печи. Режим электротермического оксидирования предусматривал нагрев образцов в печи до температуры 250, 300, 350, 400°C с выдержкой 0,5; 1,0 и 1,5 ч при каждой температуре.

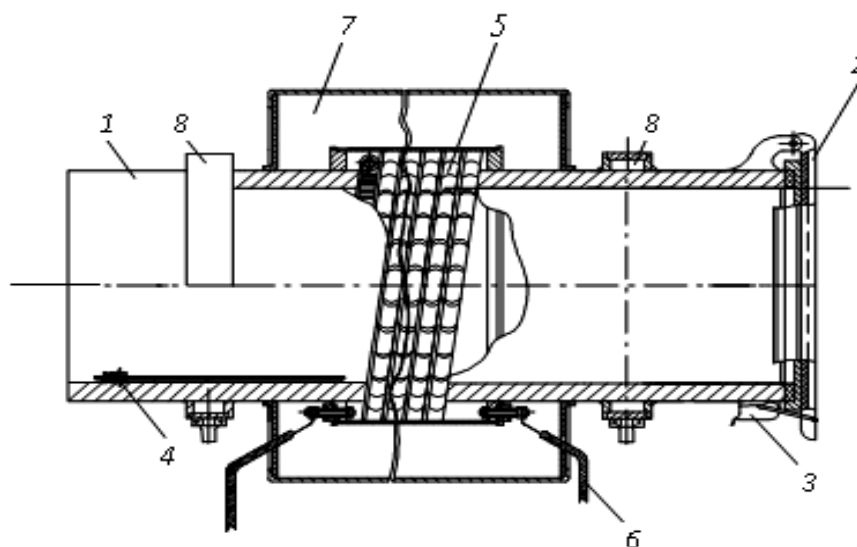


Рис. 1. Цилиндрическая однокамерная печь сопротивления для воздушно-термического оксидирования: 1 – камера; 2 – крышка; 3 – защелка; 4 – термопара; 5 – нагревательный элемент; 6 – электрические выводы; 7 – кожух; 8 – система охлаждения

Разработанная электропечь состоит из цилиндрической камеры 1, открытой с одной стороны для поступления воздушной среды в рабочий объем и закрытой – с другой, противоположной стороны крышкой 2 с помощью защелки 3. Внутри камеры 1 расположена термопара 4, а снаружи на корпусе – система нагрева в виде нагревательного элемента 5, соединенного с токоизолированными электрическими выводами 6 источника питания и закрытого с внешней стороны кожухом 7 с прокладками из теплоизолирующего материала, а также система охлаждения в виде двух охлаждающих контуров 8 со штуцерами для обеспечения циркуляции жидкой среды.

Выполнение камеры оксидирования открытой с одной стороны и закрытой крышкой – с другой создает возможность заполнения всего объема камеры воздушной окислительной средой, необходимой для осуществления процесса оксидирования металлоизделия. При этом камера 1 закры-

та с одной стороны крышкой 2 для предотвращения рассеивания теплоты и возникновения погрешности задаваемого температурного режима в камере.

Образование покрытий при электротермической обработке стальных образцов в печи происходило за счет взаимодействия металлической основы с кислородом воздуха при определенной температуре в печи. В результате такого реакционного взаимодействия на обрабатываемой поверхности формировались металлооксидные соединения, которые придавали ей комплекс повышенных физико-химических и механических свойств, отличных от свойств основного металла. Происходило термоупрочнение модифицированных поверхностных слоев образцов при сохранении химического состава и свойств основной металлической матрицы. За счет термохимических процессов фазообразования осуществлялось формирование на поверхности нержавеющей стали воздушно-

термического металлооксидного покрытия без использования дополнительных материалов для его получения.

Обработка результатов экспериментов. Получение покрытий из газовой фазы – сложный многостадийный процесс, включающий стадии массо- и теплопереноса, адсорбции и десорбции, собственно ста-

дию химической реакции термораспада металлоорганических соединений, а также стадии формирования твердой фазы и кристаллизации. По своему содержанию контуры всех фрактальных газотермических оксидных покрытий отражают суть протекающих при их формировании динамических процессов (рис. 2).

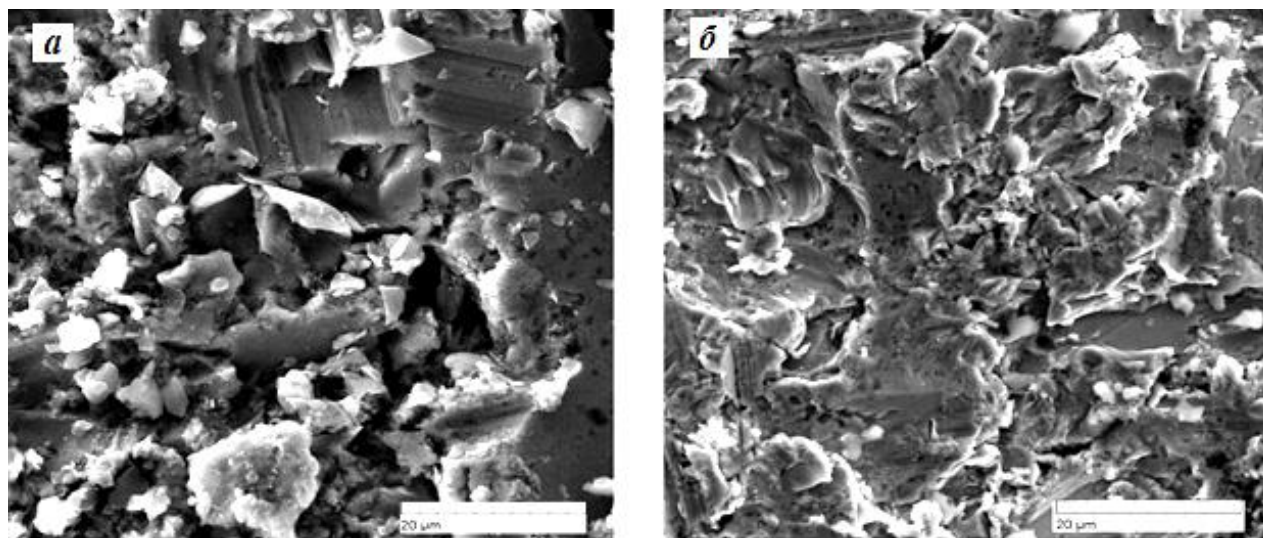


Рис. 2. Структура металлокерамических оксидных покрытий, полученных при разных температурах и имеющих разную фрактальную размерность D : а – 300°C, $D = 1,833$; б – 350°C, $D = 1,708$

При исследовании газотермических процессов, связанных с формированием металлооксидных поверхностных слоев изделий реакционным взаимодействием металлической матрицы с газовой средой (атмосфера воздуха, перегретый водяной пар, смеси газов), установлено, что характерным для них является образование зернистой структуры, состоящей из множества крупных микрочастиц пластинчатой формы и мелких ультрадисперсных частиц шаровидной формы [11, 12]. Возникновение таких форм рельефа связывается с проявлением нелинейных кинетических закономерностей в условиях, далеких от термодинамического равновесия при температурах оксидирования, находящихся в диапазоне от 150°C до 1100°C, и различном давлении среды. Результаты экспериментов приведены в таблице.

На основании результатов измерений с помощью специальной программы [13] были получены математическая модель и гра-

фическая зависимость твердости покрытия HV (ГПа) от входных параметров: температуры t (°C) и продолжительности оксидирования τ (ч) (рис. 3 а), а также математическая модель и график зависимости фрактальной размерности покрытия D от аналогичных параметров (рис. 3 б).

Как видно из таблицы, наибольшие значения микротвердости получены при режимах электротермического оксидирования $t = 350^\circ\text{C}$ и $\tau = 1,5$ ч, а также при $t = 400^\circ\text{C}$ и $\tau = 1,0$ ч, что позволяет эффективно использовать сформированные покрытия для работы в гидроабразивных средах [14, 15]. Зависимость твердости оксидного покрытия от ее фрактальной размерности при различных температурах приведена на рис. 4.

На основании проведенных экспериментов предложен метод оценки качества морфологии оксидированных стальных образцов с использованием фрактальной размерности.

Результаты экспериментов
по электротермическому оксидированию поверхности стали 12Х18Н9Т

Номер	Температура, °С	Время выдержки, ч	Фрактальная размерность, D	Твердость по Викерсу, V (ГПа)
1	250	0,5	1,649	284
2	250	1	1,742	199
3	250	1,5	1,811	152
4	300	0,5	1,691	134
5	300	1	1,833	362
6	300	1,5	1,752	185
7	350	0,5	1,708	322
8	350	1	1,815	334
9	350	1,5	1,786	380
10	400	0,5	1,711	344
11	400	1	1,699	575
12	400	1,5	1,828	97

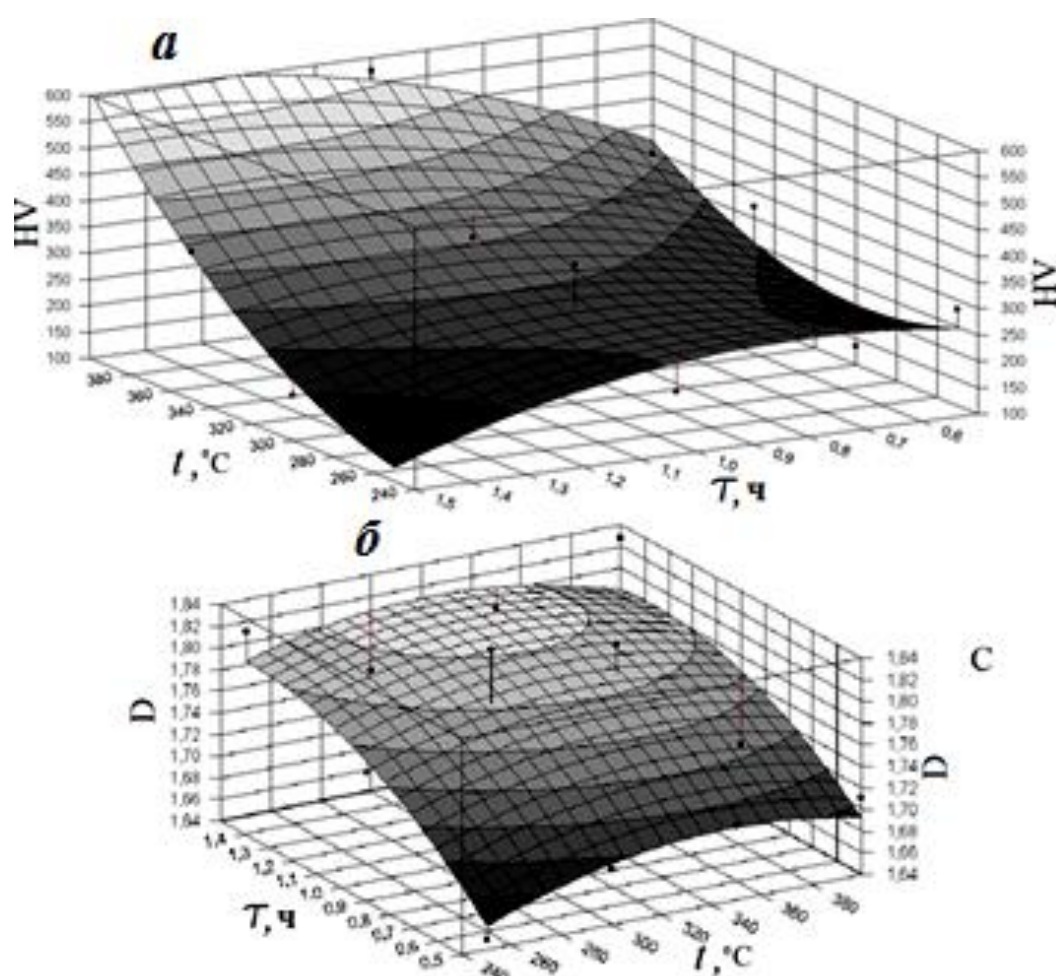


Рис. 3. Математическая модель: а – зависимость твердости HV (ГПа) оксидного покрытия от температуры t (°С) и продолжительности оксидирования τ (ч); б – графическая зависимость фрактальной размерности D оксидного покрытия от аналогичных входных параметров

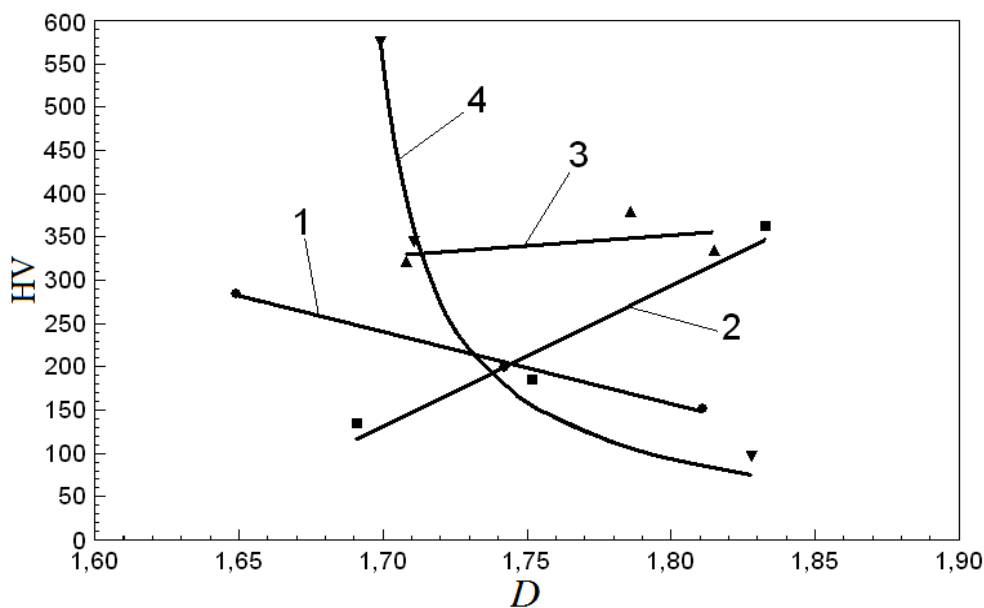


Рис. 4. Зависимости твердости HV (ГПа) оксидного покрытия от фрактальной размерности D при продолжительности 0,5, 1,0, 1,5 ч и температурах оксидирования: 1 – 250°C; 2 – 300°C; 3 – 350°C; 4 – 400°C

Дальнейшее исследование должно вестись в направлении создания базы данных покрытий, полученных различными способами (плазменным, газовым, ионно-пучковым и т.д.) при различных режимах нанесения с их количественной характеристикой – фрактальной размерностью. Имея такую информацию, можно задавать рациональные технологические режимы обра-

ботки и получать покрытия с прогнозируемой структурой и требуемым комплексом свойств.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект № 11.1943.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Родионов И.В.** Физико-химические и механические характеристики пароксидных биосовместимых покрытий титановых имплантатов / И.В. Родионов // Материаловедение. 2009. № 10. С. 25-34.

2. **Родионов И.В.** Получение оксидных биосовместимых покрытий на чрескостных титановых имплантатах методом паротермического оксидирования / И.В. Родионов // Перспективные материалы. 2009. № 5. С. 35-44.

3. Поверхностно-структурные характеристики термооксидных биопокровтий остеофиксаторов из стали 12Х18Н9Т / И.В. Родионов, К.Г. Бутовский, В.В. Анников, Т.С. Хапрова // Наноструктурные функциональные покрытия и материалы для промышленности: сб. докл. 2-го Междунар. науч.-техн. симпозиума Харьков-

ской нанотехнологической ассамблеи. Харьков, 2007. Т. 1. С. 139-145.

4. **Родионов И.В.** Костные металлоимплантаты с оксидными биосовместимыми покрытиями / И.В. Родионов // Современная техника и технологии: сб. трудов XV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: Томск: Изд-во ТПУ, 2009. Т. 1. С. 569-571.

5. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina et al. // Ceramics International. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

6. Nanocrystalline Structure of Surface Layer of Technical-Purity Titanium Subjected to Induction-Thermal Oxidation / A.A. Fomin,

A.B. Steinhauer, I.V. Rodionov et al. // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 39. № 11. P. 969-971.

7. **Родионов И.В.** Морфологические характеристики оксидных биопокровов, получаемых паротермическим оксидированием костных титановых имплантатов / И.В. Родионов, К.Г. Бутовский // Технологии живых систем. 2006. Т. 3. № 5-6. С. 66-73.

8. **Catledge S.A.** Nanostructured surface modifications for biomedical implants / S.A. Catledge, M. Fries, Y.K. Vohra // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology, edited by H.S. Nalwa. 2004. Vol. 10. P. 1-22.

9. **Rupp L.M.** Microstrain and self-limited grain growth in nanocrystalline ceria ceramics / L.M. Rupp, A. Infortuna, L.J. Gauckler // Acta materialia. 2006. Vol. 54. P. 1721-1730.

10. **Speransky S.K.** Intelligent fractal classifier of coatings / S.K. Speransky, I.V. Rodionov // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. № 1. С. 51-58.

11. **Родионов И.В.** Исследование паротермических оксидных покрытий на медицинских титановых имплантатах / И.В. Родионов // Медицинская техника. 2012. № 2 (272). С. 16-20.

12. **Родионов И.В.** Технология получения термооксидных биосовместимых по-

крытий дентальных имплантатов в аргоно-кислородной газовой смеси / И.В. Родионов // Материалы и упрочняющие технологии – 2006: сб. материалов XIII Российской науч.-техн. конф. с междунар. участием. Курск: Изд-во Курск. гос. техн. ун-та, 2006. Ч. 2. С. 155-160.

13. **Сперанский С.К.** Программа расчета фрактальной размерности покрытий различного функционального назначения / С.К. Сперанский, И.В. Родионов, К.С. Сперанский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663144. Опубл. 24.11.2017.

14. Структура упрочняющих термических покрытий на основе металлооксидной керамики / И.В. Родионов, А.Н. Ромахин, Е.Ю. Пошивалова, А.А. Фомин // Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов: сб. статей II Междунар. конф. мол. уч. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 1. С. 341-346.

15. Металлокерамические оксидные покрытия в производстве шнековых осадительных центрифуг из нержавеющей хромоникелевых сталей / А.Н. Ромахин, И.В. Родионов, А.А. Фомин, Е.Ю. Пошивалова // Инжиниринг Техно: сб. трудов II Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2014. Т. 2. С. 49-57.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Rodionov – Dr.Sc., Professor Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сперанский Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergei K. Speransky – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛАВА X20H80
В КАЧЕСТВЕ РАСКИСЛИТЕЛЯ МЕДИ
ПРИ КОЛЬЦЕВОЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НА ПРОЧНОСТЬ
И ВАКУУМНУЮ ПЛОТНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ**

А.А. Тищенко, Р.В. Соловьев, О.Д. Тищенко

**IMPACT OF NI80CR20 ALLOY USED AS A DEOXIDIZER
FOR ARGON ARC WELDING ON WELD STRENGTH
AND VACUUM TIGHTNESS OF SEAL WELDS**

A.A. Tishchenko, R.V. Solovyov, O.D. Tishchenko

Для решения проблемы нарушения вакуумной плотности сварных швов, полученных методом аргонодуговой сварки, вследствие циклического нагрева электровакуумных приборов в сварной шов вводится технологическая прокладка X20H80 (нихром). Для определения структуры сварного шва был проведен металлографический анализ образцов сварного соединения базовой конструкции и конструкции сварного шва с технологической прокладкой. Для определения механической прочности сварные соединения были исследованы на разрыв. Установлено, что в соединениях без технологической прокладки присутствуют цепочки пор, что является недопустимым дефектом, приводящим к снижению прочности и нарушению вакуумной плотности сварных швов, после нескольких циклов нагрева электровакуумного прибора во время обработки его на вакуумном посту.

Ключевые слова: медь, аргонодуговая сварка, X20H80, металлографическое исследование

В электронике СВЧ актуальна проблема снижения брака электровакуумного прибора (ЭВП) по аргонодуговым швам свариваемых медных деталях в результате натекания прибора на операции откачки [1, 2]. Нарушение вакуумной плотности сварного шва на операции откачки происходит в ре-

To solve the problems related with failures in vacuum tightness of weld seals fabricated by means of argon arc welding technology, the temporary spacer X20H80 (nichrome) is inserted into seal welds as a result of cyclic heating of vacuum devices. To determine the structure of a seal weld, we conducted metallographic examination of seal weld patterns in the basic structures and seal weld structures with temporary spacers. A breakdown test was applied to determine mechanical strength of the seal welds. The test showed that without temporary spacers, the seals are characterized for linear porosity, which is an intolerable flaw resulting in lower strength ratio and deficiency in the vacuum tightness of seal welds.

Keywords: copper, argon arc welding, Cr20Ni80, metallographic analysis

зультате циклического нагрева прибора во время его обезгаживания.

Целью настоящей работы является получение вакуумно-плотных сварных соединений ЭВП СВЧ, выдерживающих циклический нагрев во время откачки и на последующих технологических операциях.

Анализ литературных данных показал, что для повышения качества аргонодугового сварного соединения медных деталей в соединение вводится технологическая прокладка из сплава Х20Н80 (нихром), которая выступает в качестве раскислителя (связывает кислород, растворенный в объеме материала) [3-5].

Для экспериментальной проверки влияния нихрома на качество сварного соединения было решено:

- изготовить макеты ЭВП базовой конструкции и конструкции, содержащие сварной шов с технологической прокладкой из сплава Х20Н80;
- провести металлографический анализ структуры сварных соединений базовой конструкции и конструкции сварного шва с технологической прокладкой из сплава Х20Н80;
- определить прочностные характеристики сварных соединений, так как в про-

цессе эксплуатации сварные соединения испытывают механические нагрузки.

Были сварены шесть макетов ЭВП, которые были разделены на 3 группы, в каждой из которых был один образец с технологической прокладкой из сплава Х20Н80, изготовленной из фольги толщиной 0,1 мм, шириной 2 мм и один – без прокладки. Сварка производилась по режимам, приведенным в табл. 1. После процесса сварки из макетов ЭВП были вырезаны образцы для изготовления шлифов и проведения металлографического анализа структуры сварного соединения. В результате металлографического анализа на образцах без технологической прокладки из нихрома присутствовали зазоры между свариваемыми кромками размером от 0,08 до 0,184 мм, уменьшающие глубину проплавления свариваемых кромок.

Таблица 1

Режимы сварки образцов

Обозначение образцов	Режим сварки	
	Ток сварки, А	Скорость сварки, об/мин
Образцы 1 и 2*	150	3
Образцы 3 и 4*	155	3
Образцы 5 и 6*	160	3
* образцы 2, 4 и 6 были сварены с применением технологической прокладки из сплава Х20Н80.		

На образцах 2 и 4 глубина проплавления составляла от 0,68 до 0,816 мм соответственно, что ниже нормы 1,0-1,4 мм для толщины кромок исследуемых образцов [6].

В образцах 2, 4 и 6 технологическая прокладка в процессе сварки расплавилась не полностью, нерасплавленной осталась от 25 до 60% первоначальной ширины прокладки. Анализ шлифов всех шести образцов показал, что увеличение сварочного тока выше значения 155 А не приводит к увеличению глубины проплавления свариваемых кромок. Сварка при величине сварного тока 150-155 А даёт достаточную для обеспечения вакуумной плотности величину проплавления кромок.

Для полного расплавления технологической прокладки и увеличения глубины проплавления были изготовлены макеты с уменьшенными зазорами между свариваемыми

кромками и уменьшенной шириной технологической прокладки с 2 мм до 0,8 мм. Как и в предыдущем случае, для анализа сварного шва из полученных макетов были вырезаны образцы. Всего было сделано 4 образца (шлифа): 1 и 2 – без технологической прокладки, 3 и 4 – с технологической прокладкой из сплава Х20Н80. В результате металлографического анализа на образцах было выявлено, что между свариваемыми кромками присутствуют зазоры размером от 0,032 до 0,04 мм. Глубина проплавления составила от 1,2 до 1,4 мм, что соответствует требованиям (1,0-1,4 мм), установленным ОСТ 11 054.017-79 «Приборы электровакуумные СВЧ. Сварка аргонодуговая» для толщины кромок исследуемых образцов.

В процессе анализа также было установлено, что уменьшение зазора между

свариваемыми кромками привело к увеличению глубины проплавления, а уменьшение ширины технологической прокладки привело к ее полному расплавлению в отличие от образцов, сваренных ранее. Значительных отличий в микроструктуре сварных швов образцов с технологической прокладкой нихрома и без нее не обнаружено. Глубина проваров кромок в макетах, сваренных с применением технологической прокладки нихрома и без нее, отличается незначительно, при этом во всех случаях величина глубины провара соответствует требованиям ОСТ 11 054.017-79.

Для определения механической прочности сварных соединений были изготовлены детали (рис. 1), из которых были сварены образцы (рис. 2) для проведения испытаний. Испытания на разрыв проводились на

разрывной машине Р-50, результаты которых приведены в табл. 2.

Сваренные швы образцов 2 и 3 (рис. 3 а) имели мелкочешуйчатую структуру, а 1 и 4 – имели гладкую структуру без чешуек (рис. 3 б).

В результате визуального осмотра зоны разрушения было выявлено следующее.

1. На образцах 2, 3, сваренных без применения технологической присадки из сплава Х20Н80 (рис. 4 а), присутствуют цепочки пор, что является недопустимым дефектом, который может привести к нарушению вакуумной плотности сварных швов.

2. В образцах 1, 4 (рис. 4 б) дефектов не обнаружено, разрушение прошло как в сварном шве, так и в околошовной зоне, что свидетельствует о прочности сварного шва, сравнимой с прочностью основного материала.

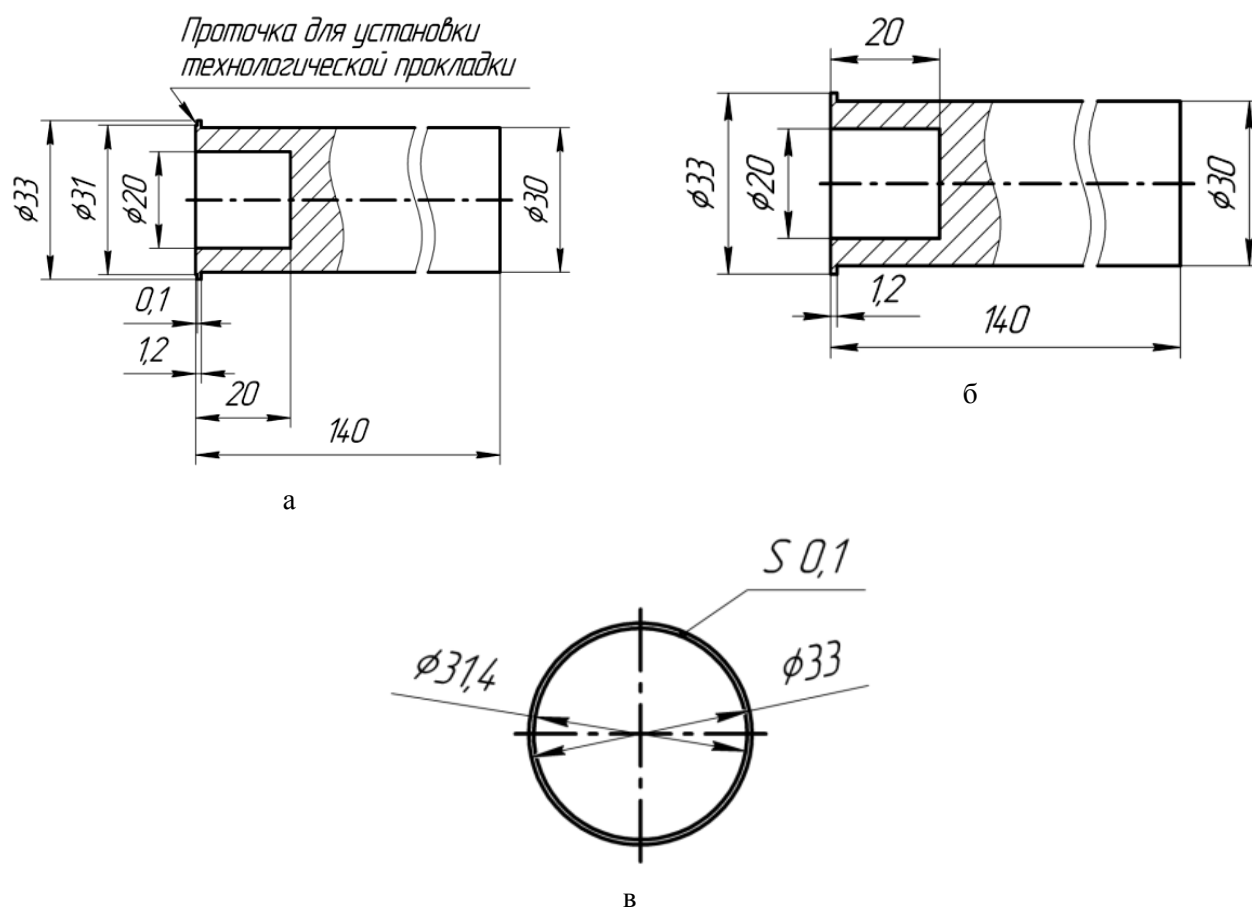


Рис. 1. Конструкции деталей для изготовления образцов: а – с проточкой для установки технологической прокладки из сплава Х20Н80; б – без проточки; в – технологическая прокладка из сплава Х20Н80

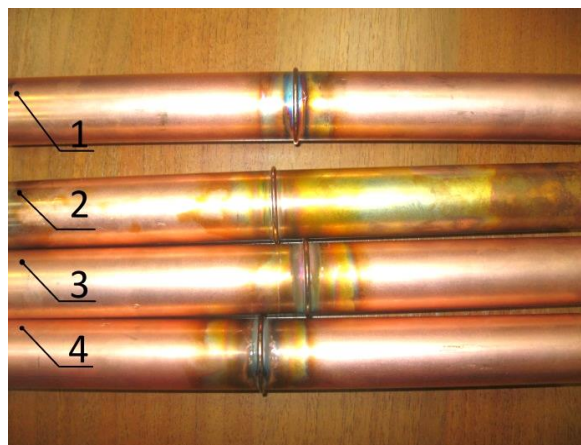


Рис. 2. Образцы для проведения испытаний на механическую прочность (1, 4 – с технологической прокладкой из сплава Х20Н80, 2, 3 – без технологической прокладки)

Таблица 2

Результаты механических испытаний на разрыв

Номер образца	Максимальное усилие, Н	Временное сопротивление, Н/мм ²	Относительное удлинение, %	Место разрыва
1	14800	193,97	5,0	металл шва
2	12200	159,89	3,57	металл шва
3	14000	183,48	3,57	металл шва
4	18000	235,91	7,14	металл шва, околошовная зона



а



б

Рис. 3. Сварные швы образцов для испытаний на механическую прочность: а – без технологической прокладки, б – с технологической прокладкой из сплава Х20Н80



а



б

Рис. 4. Сварные швы после испытаний на разрыв: а – без технологической прокладки; б – с технологической прокладкой из сплава Х20Н80

Итак, введение при аргонодуговой сварке технологической прокладки из сплава Х20Н80 (нихром) позволило:

– в значительной степени устранить возникновение пор и пустот в сварном шве, что существенно повысило качество сварного

соединения и дало возможность проводить многократный циклический нагрев ЭВП без нарушения его вакуумной плотности;

– увеличить механическую прочность сварного соединения, что значительно повысило надежность приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корепин Г.Ф.** Критическое время обезгаживания ЭВП СВЧ / Г.Ф. Корепин // Вакуумная техника и технология. 2007. Т. 17. № 3. С. 167-175.

2. **Корепин Г.Ф.** Проблемы откачки металлокерамических ЭВП СВЧ / Г.Ф. Корепин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ техника. 2008. № 4. С. 23-46.

3. **Кононенко В.Я.** Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся

электродом / В.Я. Кононенко. Киев: Ника-Принт, 2007. 266 с.

4. **Черканов Ф.А.** Аргонодуговая сварка и её применение / Ф.А. Черканов, Ф.А. Богданов. Л.: Судпромгиз, 1958. 219 с.

5. **Юхин Н.А.** Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах / Н.А. Юхин. М.: СОУЭЛО, 2007. 48 с.

6. ОСТ 11 054.017-79. Приборы электровакуумные СВЧ. Сварка аргонодуговая.

Тищенко Артем Александрович – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.; ведущий технолог АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» НППЦ-5, Саратов

Соловьев Роман Вячеславович – начальник сектора специальных технологий АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» НППЦ-5, Саратов

Тищенко Ольга Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.; инженер-технолог АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» НППЦ-5, Саратов

Artem A. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Leading Engineer at Mints Radiotechnical Institute NPTs-5, Saratov

Roman V. Solovyov – Mints Radiotechnical Institute NPTs-5, Saratov, Head: Division of Special Technologies, Mints Radiotechnical Institute NPTs-5, Saratov

Olga D. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Manufacturing Engineer at Mints Radiotechnical Institute NPTs-5, Saratov

Статья поступила в редакцию 03.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.365.4:621.3.078

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

В.Д. Суркова, Н.И. Круглов, В.С. Алексеев

THE SOFTWARE AND TECHNICAL COMPLEX FOR VARIOUS TYPES OF RESISTANCE FURNACES

V.D. Surkova, N.I. Kruglov, V.S. Alekseyev

Рассматриваются этапы разработки программно-технического комплекса для функционирования печей сопротивления различных типов. Проведен анализ работоспособности разрабатываемой системы.

Ключевые слова: печь сопротивления, система автоматического управления, программно-технический комплекс

В последнее время системы управления печами и термическим оборудованием претерпели значительные изменения. Современная автоматизация основывается на использовании цифровых и компьютерных технологий, которые непрерывно развиваются. Применение современной контроллерной техники позволяет не только улучшить качество конечного продукта за счет точности поддержания заданных параметров, но и уменьшить влияние человеческого фактора на технологию процесса. Тенденции последних лет показывают, что растут запросы на автоматический режим работы печей, в том числе для подготовки, вывода на рабочий режим, аварийного и планового отключения. Требуется надежная система защиты и сигнализации, возможность архивирования событий и графиков ведения процессов. Использование сетевых решений для удаленного управления и мониторинга позволяет не только повысить гибкость управления, но и сократить количество обслуживающего персонала.

The article describes the stages in development of the software and technical complex applied in the operation of resistance furnaces of various types, and analyzes operability of the developed system.

Keywords: resistance furnace, automatic control system, software and hardware complex

Создание многофункционального программно-технического комплекса для функционирования печей сопротивления различных типов, который должен включать соответствующие элементы, входящие в структуру печи, учитывать различные режимы работы печи, является актуальной задачей. Таким образом, следует учесть методический и периодический режимы работы, наличие вентиляторов для охлаждения и вынужденной конвекции, насосов для создания особой атмосферы в печи путем изменения давления воздуха, различные типы транспортных систем, аварийные режимы системы, индикацию и др.

Для решения поставленной задачи разработана система управления печами сопротивления и проведена проверка работоспособности каждого отдельного элемента (рис. 1). При этом была использована среда программирования, создающая алгоритмы работы контроллеров «Конграф» [1].

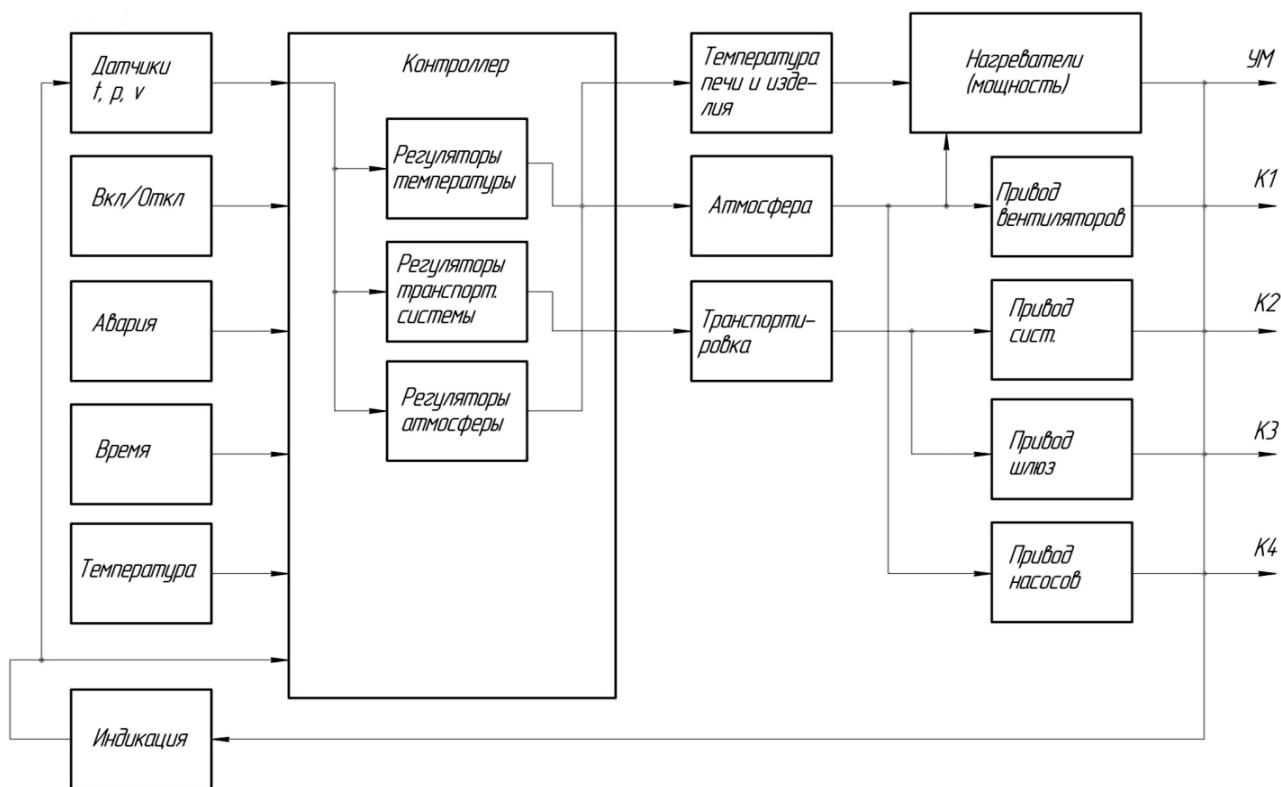


Рис. 1. Схема системы управления печами сопротивления

Инструментальная система «Конграф» предназначена для разработки алгоритмов управления для приборов комплекса «Контар». Программа дает пользователю возможность на доступном технологическом языке функциональных блоков запрограммировать свою задачу, создавать проекты как для одного контроллера, так и группы контроллеров, объединённых в единую приборную сеть. Программа дает возможность произвести отладку всего алгоритма или его части и устранить ошибки до загрузки в контроллеры. После разработки алгоритма проводится компиляция, результатом которой являются файлы с исполняемым кодом (они загружаются в приборы) [1].

Для решения поставленных задач в проектируемую систему управления вводится микроконтроллер MC8 и релейный модуль расширения MR8.

Контроллеры измерительные MC8 предназначены для реализации разнообразных алгоритмов автоматизированного управления технологическими процессами и являются основным элементом программно-технического комплекса «Контар». Функциональная схема контроллера пред-

ставлена на рис. 2. Контроллеры выполняют следующие основные функции [1]:

а) измерение и преобразование в цифровую форму сигналов, поступающих от аналоговых и дискретных датчиков технологических параметров;

б) формирование дискретных и аналоговых выходных сигналов для воздействия на технологический процесс;

в) реализация алгоритмов функционирования, необходимых для управления конкретными технологическими процессами (например, аналоговое или импульсное ПИД-регулирование, различные виды формирования задания, в том числе с возможностью изменения в реальном времени, программно-логическое управление, автоматическое включение резервного оборудования и т.д.);

г) вывод информации на дисплей пульта оператора или на экран монитора компьютера, КПК или другого средства через интерфейс RS232C, Ethernet;

д) обеспечение связи через интерфейс RS232C (на основной плате) с периферийными устройствами (модем и т.д.); ПК не подключается;

е) обеспечение связи с сервером через интерфейс Ethernet при работе в локальной сети и сети Интернет.

На рис. 3 представлены используемые в работе контроллер MC8 и релейный модуль MR8M.

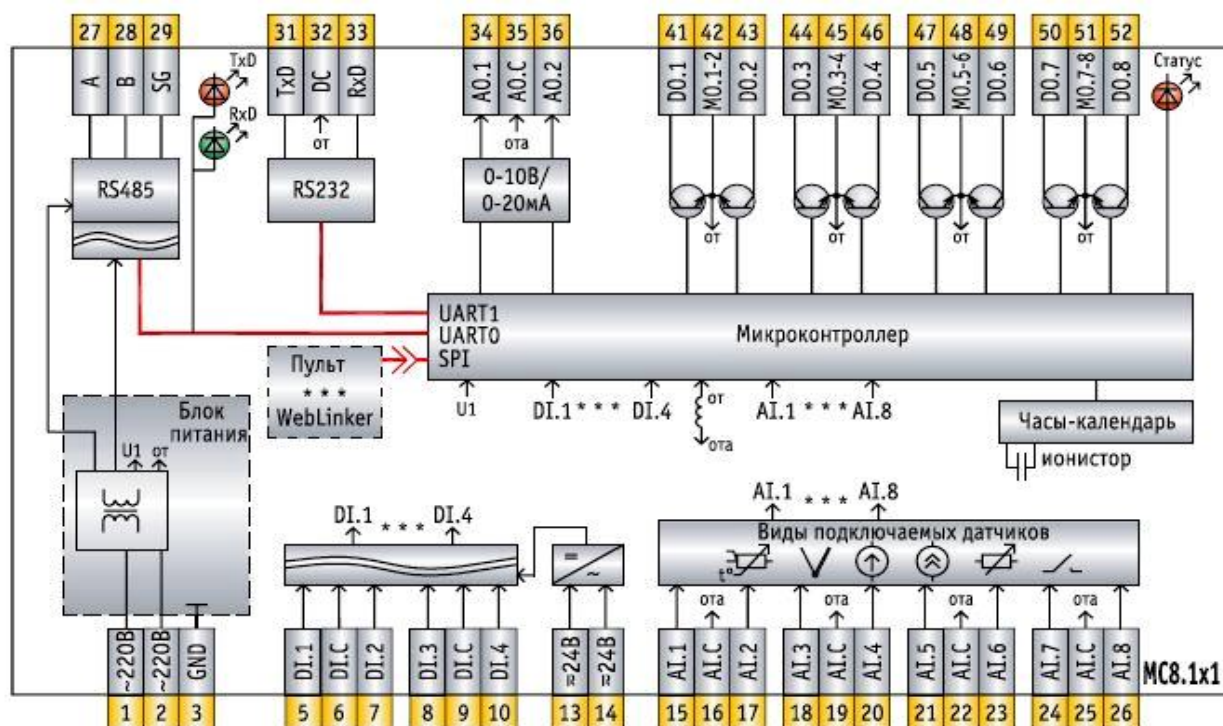


Рис. 2. Функциональная схема микроконтроллера MC8

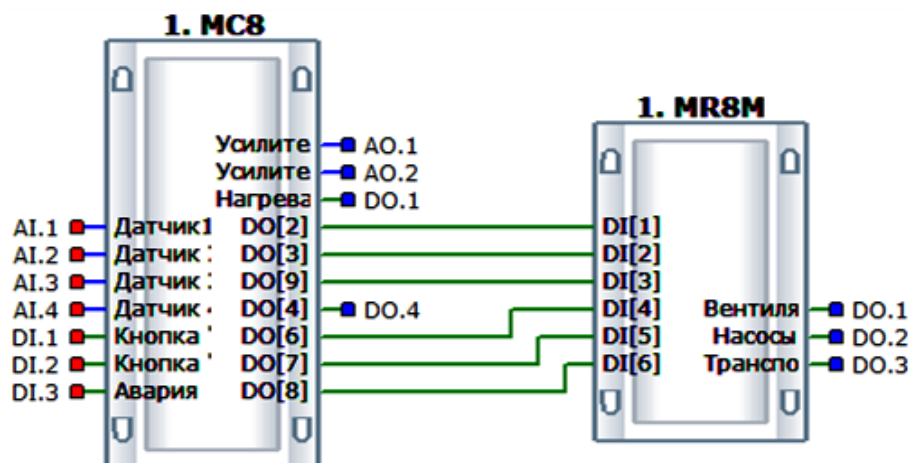


Рис. 3. Схема алгоритма системы управления

Контроллер MC8 включает такие функциональные блоки, как «Пуск-Стоп», «Регуляторы», «Нагреватели» и «Индикация». Они отвечают за подачу сигналов на кнопки включения (выключения), регуляторы температуры печи, скорости вентиляторов и насосов, подачу сигнала на нагреватели и светодиоды индикации соответственно. Модуль релейный MR8M включает функ-

циональные блоки «Вентиляторы», «Насосы» и «Транспорт».

Функциональный блок (ФБ) «Контроллер MC8» представлен на рис. 4.

Функциональный блок «Регуляторы» включает регуляторы температуры печи, температуры изделия, регуляторы насосов, вентиляторов и скорости транспортирующих систем. Сигнал на регуляторы поступает от

четырёх соответствующих датчиков (температуры печи, температуры изделия, скорости и давления). С регуляторов температуры

аналоговый сигнал поступает на усилители, дискретный – на нагреватели (рис. 5).

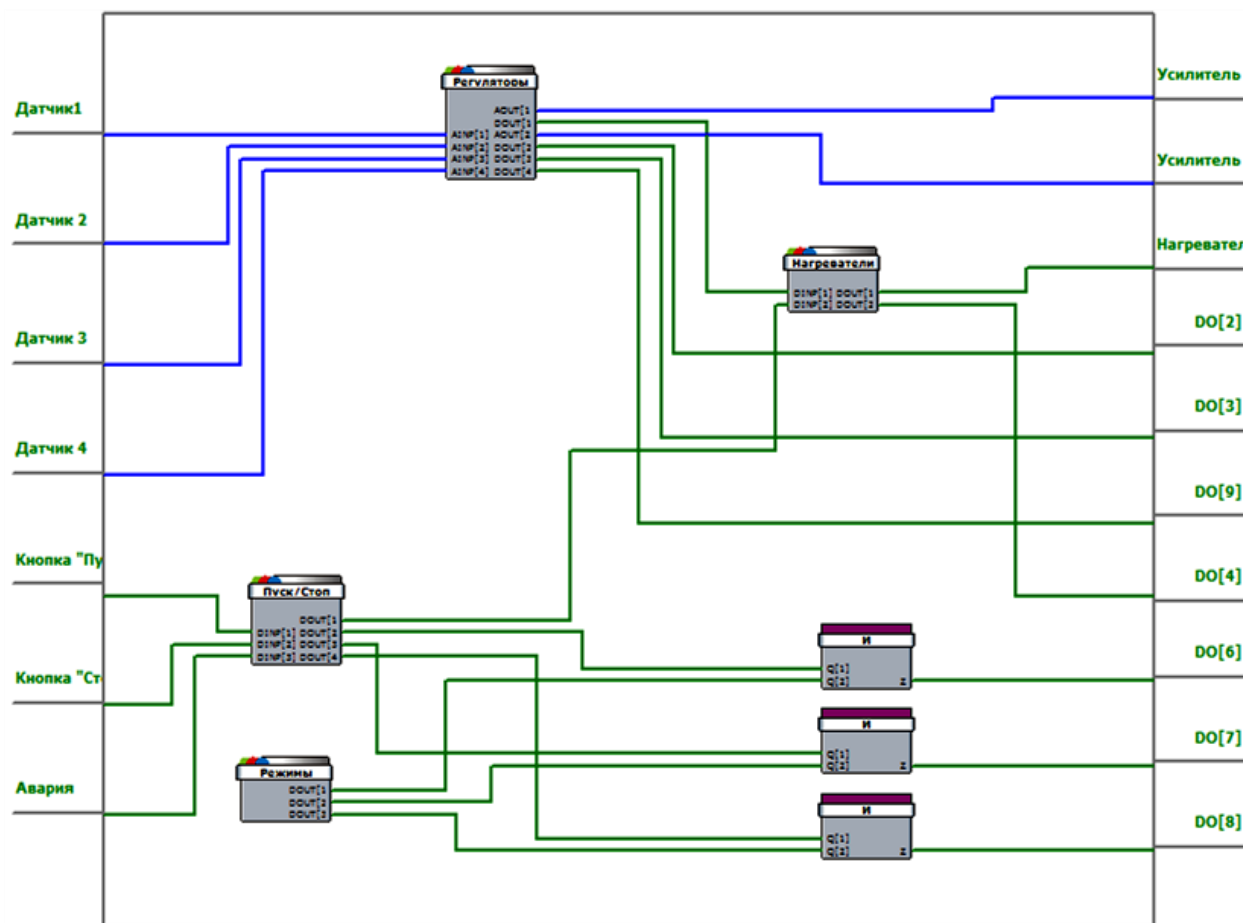


Рис. 4. Функциональный блок «Контроллер MC8»

Рассмотрим подробно функциональный блок «Регулятор температуры печи» (рис. 6). Остальные блоки регуляторов построены по той же схеме с отличием в датчиках. Для температурных регуляторов установлен датчик температуры TCM 50. Алгоритмический блок предназначен для нормализации измерений медного термометра сопротивлением 50 Ом ($W_{100} = 1,428$ ГОСТ 6651-2009), подключенного по двухпроводной схеме, то есть преобразования измеренного сопротивления датчика в значение температуры. Алгоритмический блок учитывает сопротивление провода, которым датчик температуры подключен к контроллеру MC8/MC12, и корректирует измеренное значение температуры.

Сопротивление провода в зависимости от температуры определяется по формуле

$$R(T)_L = RC[1 + B(T - TC)], \quad (1)$$

где RC – сопротивление провода при калибровке, Ом; B – температурный коэффициент проводимости соединительного провода (для медного провода равный 0,0428 1/K); T – температура окружающей среды, К; TC – температура окружающей среды при калибровке, К [1].

Алгоритмический блок «ФИЛЬТР» выполняет функцию апериодического звена. Передаточная функция блока имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{TFp + 1}, \quad (2)$$

где TF – постоянная времени апериодического звена, с [1, 2].

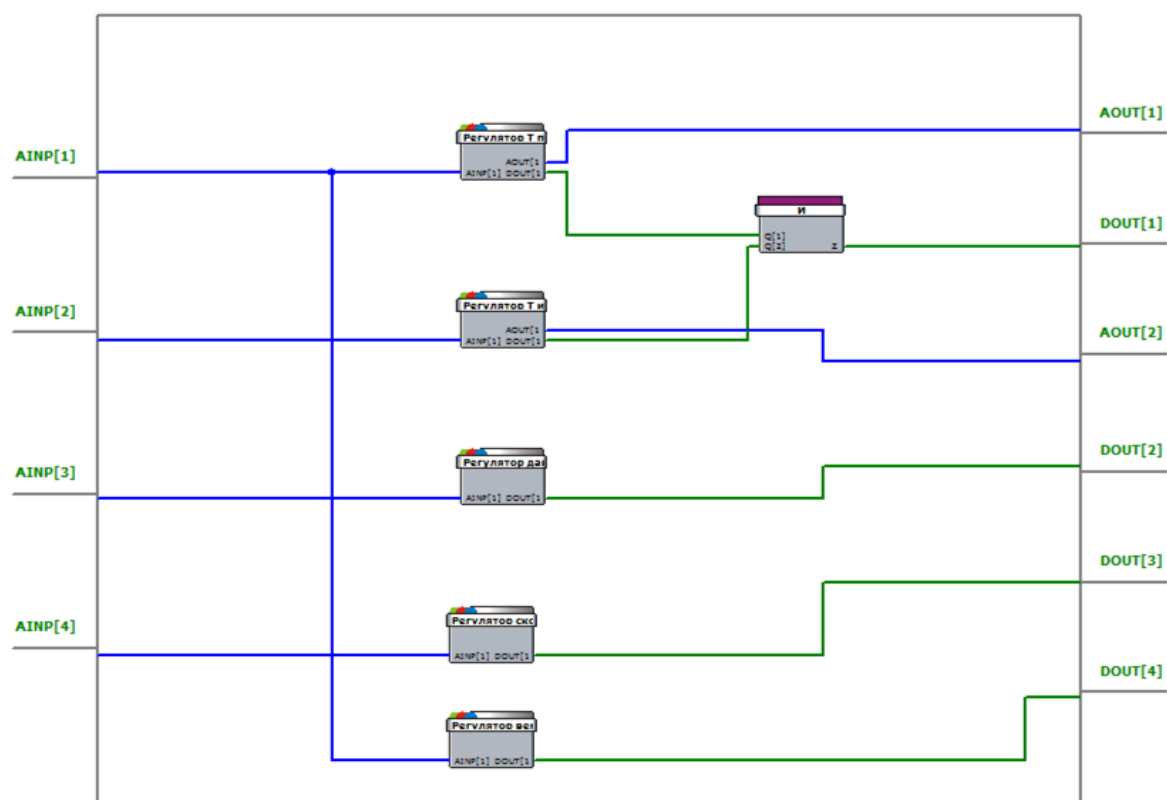


Рис. 5. Функциональная схема алгоритма ФБ «Регуляторы»

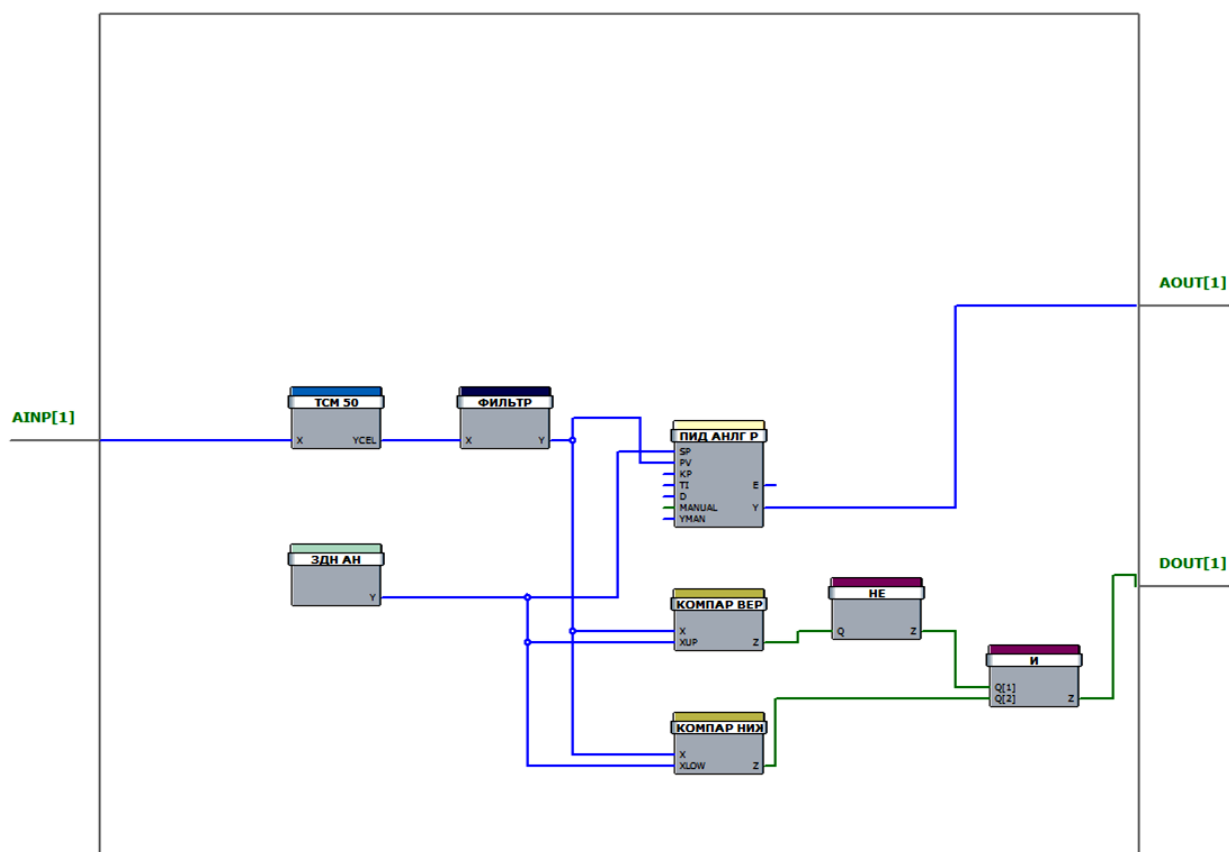


Рис. 6. Функциональная схема элемента системы автоматического управления «Регулятор температуры печи»

Алгоритмический блок «ЗДН АН» предназначен для задания аналоговой уставки на входах, используемых в алгоритме других блоков. В этом блоке происходит копирование значения, заданного на входе X , на выход Y . Вход алгоритмического блока по умолчанию сделан невидимым. Входной параметр может быть задан в качестве константы или включен в приборный список [1].

Алгоритмический блок «ПИД АНЛГ Р» предназначен для управления входной величиной по ПИД-закону регулирования пропорциональным исполнительным механизмом или аналоговым усилителем мощности.

Передаточная функция для элемента ПИД-регулятора:

$$W(p) = KP \left[1 + \frac{1}{TIp} + \frac{DTIp}{1 + \frac{DTIp}{8}} \right], \quad (3)$$

где KP – коэффициент пропорциональности; TI – постоянная времени интегрирования;

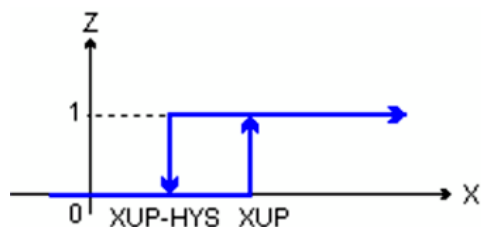


Рис. 7. График работы алгоритмического блока «КОМПАР ВЕРХ»: XUP – уровень срабатывания (пороговое значение верхнего уровня); HYS – величина гистерезиса

В функциональном блоке «Режимы» реализовано управление различными режимами работы печи сопротивления, такими как методический и периодический. Также предусмотрены режимы «Вакуум», сигнал с которого подается на насосы, и «Циркуляция», при котором включаются вентиляторы. Наличие того или иного режима в установке обуславливается ее конструкцией.

Проведена проверка работы функциональных блоков в программной среде «КОНГРАФ Симулятор». Приведен пример

ния; D – коэффициент дифференциальной составляющей [1, 2].

Если выход регулятора подключен непосредственно к аналоговому выходу контроллера, то используются значения верхнего и нижнего пределов ограничения выхода, установленные с помощью пульта управления [1].

Алгоритмический блок «КОМПАР ВЕРХ» (рис. 7) предназначен для сравнения входного параметра X с пороговым значением верхнего уровня XUP . Величина Z принимает значение «1», если X становится больше XUP , и Z принимает значение «0», если X становится меньше $XUP-HYS$ [1].

Алгоритмический блок «КОМПАР НИЖ» (рис. 8) предназначен для сравнения входного параметра X с пороговым значением нижнего уровня $XLOW$. Величина Z принимает значение «1», если X становится меньше $XLOW$, и Z принимает значение «0», если X становится больше $XLOW+HYS$ [1].

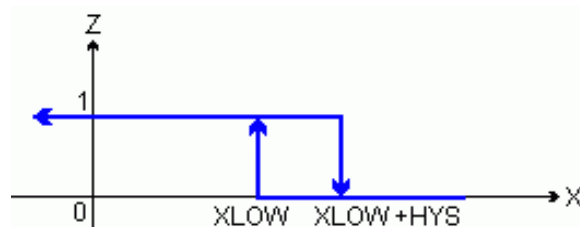


Рис. 8. График работы алгоритмического блока «КОМПАР НИЖ»: $XLOW$ – уровень срабатывания (пороговое значение нижнего уровня); HYS – величина гистерезиса

на основе элемента системы автоматического управления «Таймер».

На рис. 9 представлены графики, отображаемые в симуляторе.

На первом графике отображается изменение параметра на выходе элемента «ЗДН ЛОГ» (включение таймера). По умолчанию на выходе установлено значение 0. Второй график показывает оставшееся время до выключения таймера. На выходе (рис. 9 в) сигнал идет через алгоритмический блок «ИЛИ» на кнопку «Стоп». Заданное время таймера составляет 10 с. Как видно из гра-

фиков (рис. 9), по истечении заданного времени на выход элемента «Таймер» поступает сигнал «1», который воздействует на кнопку «Стоп» и все системы установки

отключаются (включенными могут остаться вентиляторы вынужденной циркуляции воздуха в печи, если установлена их задержка отключения).

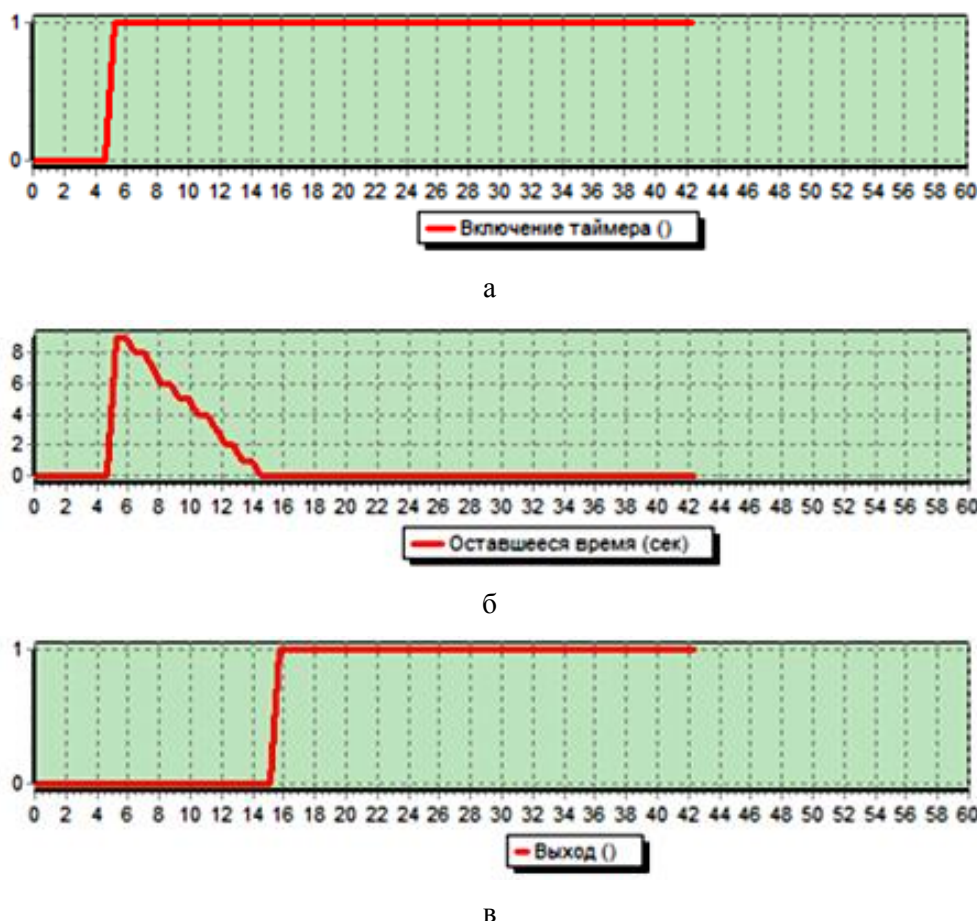


Рис. 9. Графики симулятора элемента «Таймер»: а – сигнал на входе; б – работа таймера; в – сигнал на выходе

Таким образом, разработанный программно-технический комплекс для функционирования печей сопротивления различных типов полностью удовлетворя-

ет требованиям задания и является актуальной разработкой в своей области за счет применения в печах сопротивления различных типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kongraf. Инструментальная система разработки функциональных алгоритмов. М.: ПТК КОНТАР, 2015. 105 с.

2. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.

Суркова Виктория Дмитриевна – студентка магистратуры кафедры «Электро-снабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Viktoria D. Surkova – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita I. Kruglov – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim S. Alekseyev – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 07.12.17, принята к опубликованию 20.12.17

УДК 621.365.4:621.3.078

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Н.И. Круглов, В.Д. Суркова, В.С. Алексеев, Д.А. Давыдов

SIMULATION OF A MULTIFUNCTIONAL SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF RESISTANCE FURNACES

N.I. Kruglov, V.D. Surkova, V.S. Alekseyev, D.A. Davydov

Рассматривается применение программного комплекса Matlab Simulink для моделирования процесса работы системы автоматического управления, применимой к большому количеству печей сопротивления. Приведены компьютерная модель системы и результаты моделирования.

Ключевые слова: *печь сопротивления, система автоматического управления, моделирование*

Термообработка является неотъемлемой операцией широкого спектра технологических процессов. Широкое распространение для реализации этой операции получили печи сопротивления (ПС). Печи сопротивления разрабатываются под конкретный технологический процесс, и для каждой такой установки необходима индивидуальная

The article considers application of the Matlab Simulink software complex for simulation of the automatic control system applied to a large number of electric resistance furnaces. A computer-based model of the system and the results of modelling are shown.

Keywords: *resistance furnace, automatic control system, simulation*

система автоматики со своей элементной базой и программным обеспечением.

Современные ПС характеризуются широким диапазоном параметров технологического процесса. В первую очередь, это масса и геометрия обрабатываемого изделия, рабочие температуры, наличие или отсутствие защитной атмосферы, точность

регулирования температуры, давления и ряда других параметров.

Для контроля и регулирования вышеприведенных параметров разрабатываются системы автоматического управления (САУ), обеспечивающие требуемое качество конкретного технологического процесса.

По режиму работы ПС подразделяются на установки периодического (сачные) и непрерывного (методические) действия. Основным регулируемым параметром является температура.

В печах периодического действия регулирующим параметром является подводимая к печи мощность. В печах методического действия температуру можно регулировать скоростью передвижения исполнительного привода.

Процесс термообработки может проходить как с естественной, так и с вынужденной конвекцией, а также в вакууме, что требует контролировать давление насосов и скорость вращения вентиляторов.

В данной работе предлагается вариант многофункциональной САУ, которая удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к технологическим процессам, осуществляемым в ПС.

Преимуществом такой САУ является сокращение трудозатрат при разработке САУ для каждого конкретного технологического процесса.

При разработке такой САУ необходимо воспользоваться математическим моделированием. Это экономит материальные затраты на физический эксперимент, позволяет моделировать гипотетические, опасные и трудновоспроизводимые режимы, изучить процессы во времени, а также спрогнозировать и выявить общие закономерности САУ.

Для исследования использован пакет прикладных программ MATLAB, имеющий графическую среду имитационного моделирования Simulink, что позволяет построить имитационную модель многофункциональной САУ.

Примем за основные параметры, которыми управляет САУ, температуру изде-

лия, температуру печи, давление (в процессах вакуумной термообработки), скорость вращения электродвигателей (для перемещения транспортной ленты в методических печах) и вентиляторов (в процессах электронагрева с вынужденной конвекцией). Для управления каждым параметром используется собственный регулятор. Поддержание обратной связи обеспечивают датчики. С помощью логических элементов можно комбинировать управляемые параметры, что позволяет применять эту систему к широкому классу ПС.

Структурная схема имитационной модели регулятора предлагаемой САУ (рис. 1), включает:

- блок «Задание», позволяющий задать системе числовое значение, которое она примет на выходе, работая в автоматическом режиме;
- блок «Фильтр»;
- блок «Датчик», обеспечивающий сигнал обратной связи;
- блоки «КОМПАР ВЕРХ» и «КОМПАР НИЖ», ограничивающие подачу сигнала;
- блок «ПИД Регулятор», формирующий управляющий сигнал на основе полученных данных;
- блок «ИЛИ», выполняющий функцию логического сложения;
- блок «РЕЗ» – осциллограф, изображающий форму выходного сигнала.

Имитационная модель регулятора температуры печи, построенная в MATLAB Simulink, изображена на рис. 1, 2.

Полная компьютерная модель многофункциональной САУ изображена на рис. 3.

На рис. 4 и 5 отображена работа регуляторов при заданном входном сигнале 200 единиц. Переходный процесс имеет затухающий характер, следовательно, данная система устойчива.

При нормальных условиях переходный процесс длится 17 секунд (рис. 4). Если в системе присутствуют шумы и внешние возмущения, длительность переходного процесса составляет 25 секунд (рис. 5).

В силу инерционности проходящих в ПС процессов характеристика регулятора не оказывает влияния на устойчивость системы в целом. С добавлением внешних возмущающих факторов увеличивается колебательность переходного процесса, что показано на рис. 5.

Помимо регулирования, в этой системе предусмотрено аварийное отключение при возникновении короткого замыкания.

К недостаткам данного подхода можно отнести избыточность регулируемых па-

раметров, что приводит к усложнению всей системы в целом.

Однако в связи с постоянным удешевлением элементной базы избыточность параметров не приводит к существенному увеличению стоимости САУ. Подобный вариант САУ может быть использован для широкого класса печей сопротивления в базовой комплектации. В силу стоимости микропроцессорной техники избыточное количество входов и выходов не играет роли с точки зрения цены.

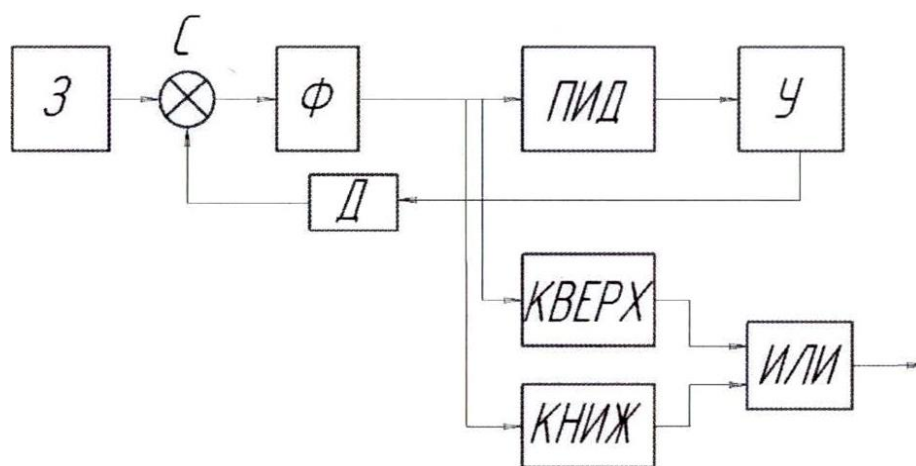


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели регулятора: З – задание, Σ – сумматор, Ф – фильтр, ПИД – ПИД регулятор, КВЕРХ и КНИЖ – компараторы верхнего и нижнего уровня, Д – датчик, ИЛИ – операция логического сложения, У – усилитель (исполнительный механизм)

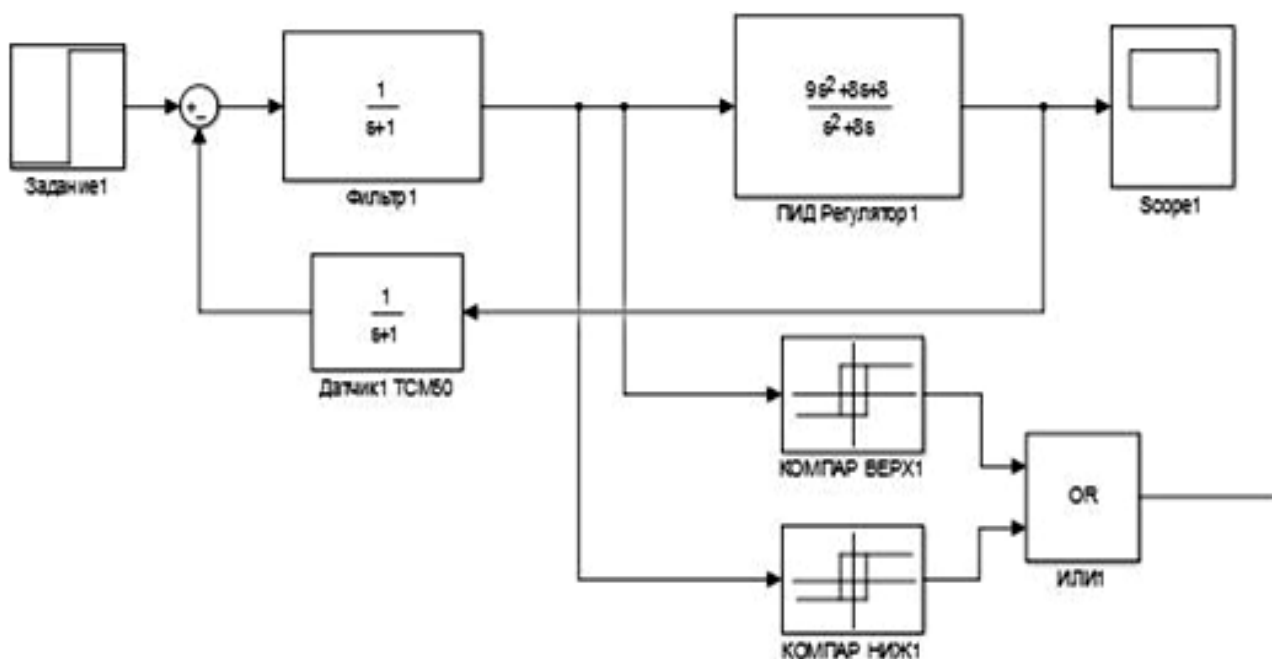


Рис. 2. Имитационная модель регулятора температуры печи (изделия)

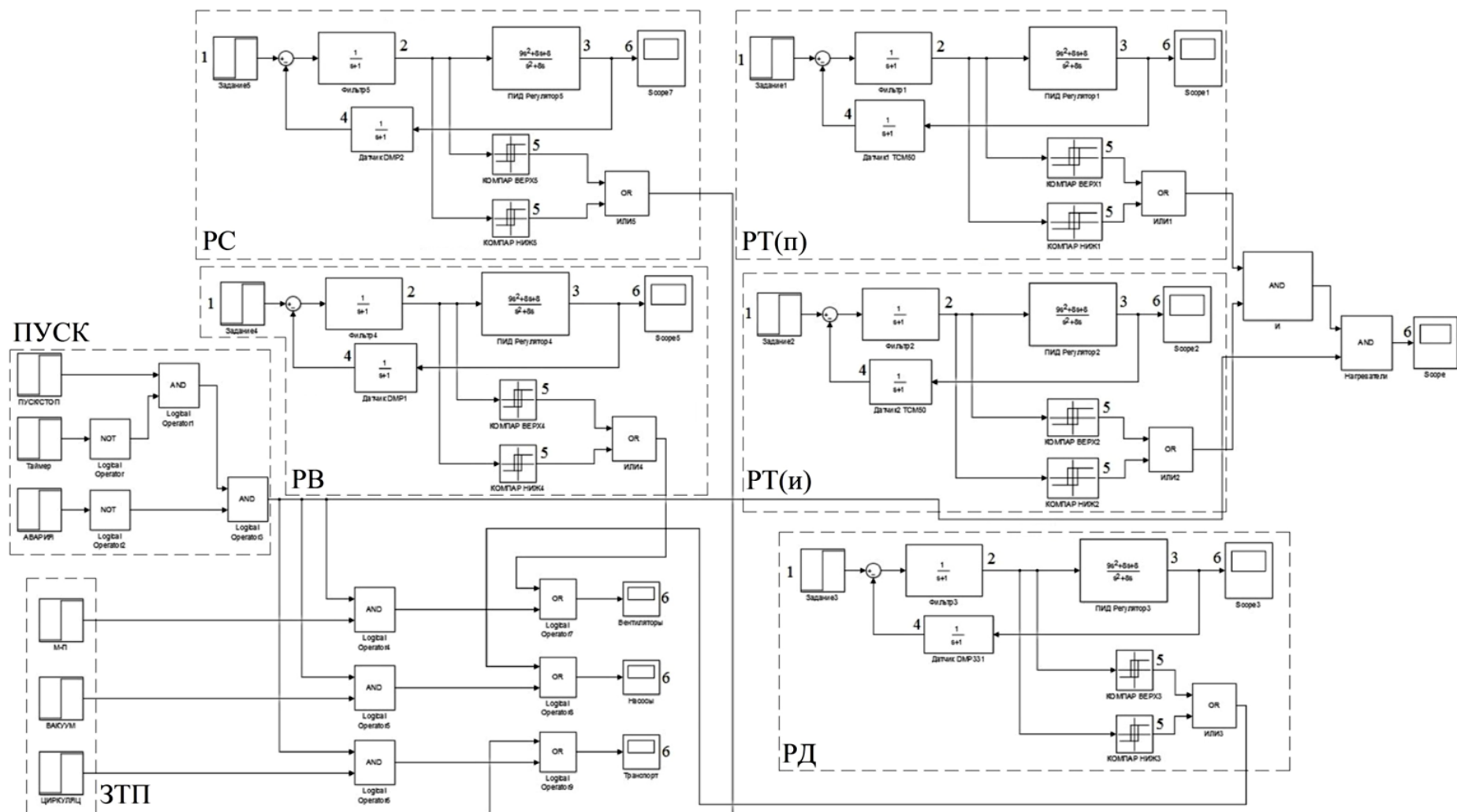


Рис. 3. Структура математической модели многофункциональной САУ: PT(п) – регулятор температуры печи, PT(и) – регулятор температуры изделия, РД – регулятор давления, PV – регулятор скорости вращения вентиляторов, PC – регулятор скорости вращения электродвигателей транспортной ленты, ПУСК – блок запуска/остановки системы, таймер и отслеживание аварийных режимов, ЗТП – блок задания типа печи, 1 – входные величины, 2 – фильтры, 3 – ПИД-регуляторы, 4 – датчики, 5 – компараторы, 6 – приборы наблюдения

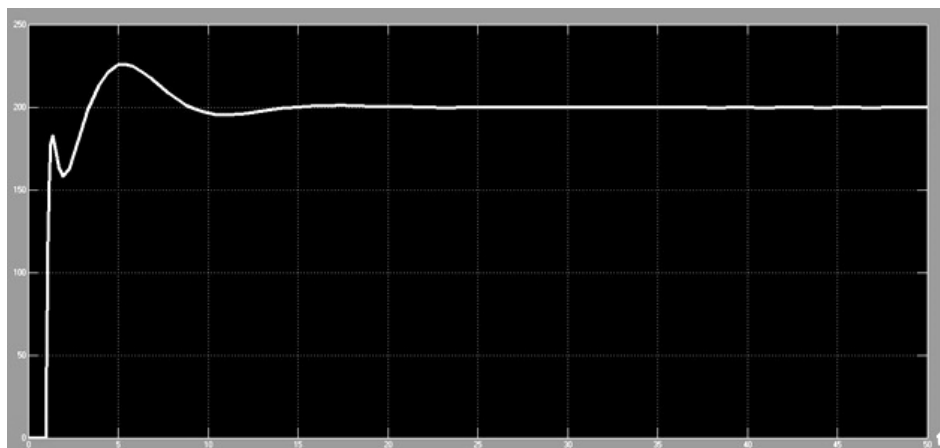


Рис. 4. График работы регулятора при нормальных условиях

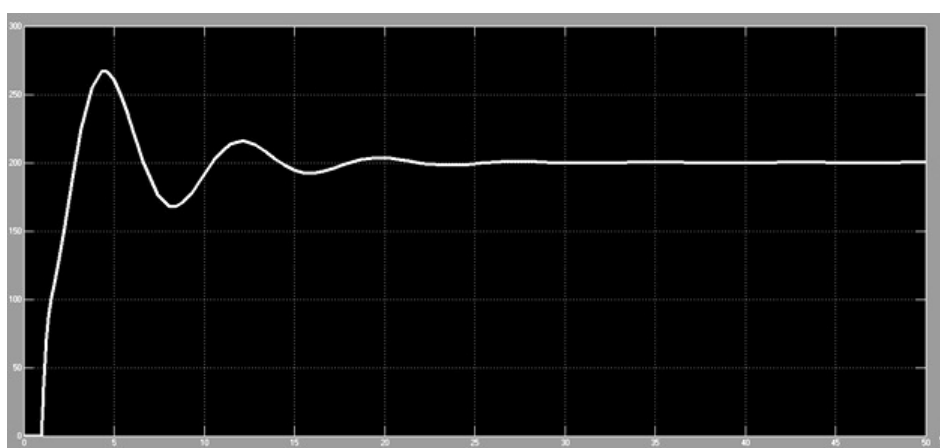


Рис. 5. График работы регулятора при измененных параметрах ПИД-регулятора и фильтра (шум и внешние возмущения)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чердниченко В.С.** Электрические печи сопротивления: конструкции и эксплуатация электропечей сопротивления / В.С. Чердниченко, А.С. Бородачев, В.Д. Артемьев. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 572 с.

2. **Бесекерский В.А.** Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекер-

ский, Е.П. Попов. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.

3. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

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

Суркова Виктория Дмитриевна – студентка магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita I. Kruglov – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Viktoria D. Surkova – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim S. Alekseyev – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry A. Davydov – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.12.17, принята к опубликованию 20.12.17



К ВОПРОСУ О ТЕПЛОВОЙ СМЕРТИ ВСЕЛЕННОЙ

Ю.С. Архангельский

ПРОДОЛЖЕНИЕ

Философское обоснование неизбежности прогресса в эволюции Вселенной. Решение такой грандиозной проблемы, как проблема эволюции Вселенной, должно быть компетенцией лишь космологии, которую академик Г. Наан справедливо называет «пограничной отраслью науки, ведущей исследования на стыке астрономии с физикой и философией» [1]. Тем более, нам кажется, недопустимо сеять иллюзии, что никакой проблемы прогресса в эволюции («тепловой смерти») Вселенной, по сути дела, нет, или пытаться решить эту проблему на основе одних лишь общих философских соображений. Сторонники таких поспешных решений проблемы по сути дела оказываются от всестороннего осмысливания всей запутанности загадки Клаузиуса. Обычно в работах, посвященных философским вопросам естествознания, проблеме «тепловой смерти» уделяется абзац, два, реже страница или более. Часто философы с плеча решают эту проблему.

Так, одни ссылаются на работы И. Плоткина и К. Станюковича или на их идеи о невозможности равновесного состояния во Вселенной. Другие вообще не желают долго останавливаться на этом вопросе, ибо вслед за Ландау утверждают недопустимость распространения законов термодинамики на Вселенную или даже отдельные ее части, так как «звездный мир... это изолированная система» в философском, а не в термодинамическом смысле [2].

У Х. Фаталиева читаем [3]:

«... Если рассматривать процессы энергетических превращений в Солнечной системе или Галактике, то нет никаких оснований применять к ним понятие изолированной системы. Тем более недопустимо

применение этого понятия к бесконечной Вселенной».

По Х. Фаталиеву, «Теория тепловой смерти на деле представляет плод извращенного толкования второго начала термодинамики». На это можно возразить: наша Галактика является членом системы из 17 галактик и расстояние от нее до ближайшей галактики Андромеды составляет около полутора миллионов световых лет, а ближайшая галактика за пределами этих семнадцати находится на расстоянии уже восьми миллионов световых лет, следовательно, скопления горячего вещества в космосе разнесены на столь огромное расстояние друг от друга, что Вселенную можно разделить как бы на большие или меньшие по объему системы до некоторой степени замкнутые. Транспорт энергии между такими системами, безусловно, существует, однако межзвездная среда значительно разрежена и это затрудняет перенос энергии от одной системы к другой.

К этому добавим, что никто не отрицает правомерности приближений в космологии. Известна, например, гипотеза Воронцова-Вельминова о нарушении всеобщности закона всемирного тяготения, а академик В. Фок считает, что для космологических масштабов, возможно, потребуется изменение или обобщение общей теории относительности.

Итак, понятие замкнутости систем может рассматриваться как хорошее приближение к реальным свойствам реальных систем. Но тогда к этим системам применимо второе начало термодинамики. Такой же точки зрения придерживается профессор Н. Козырев [4].

Любопытно, что авторы, утверждающие некорректность вопроса о «тепловой смер-

ти» Вселенной, не ограничиваются приведенными рассуждениями о незамкнутости системы во Вселенной. Они подкрепляют их рядом других аргументов, отчего их позиция не становится прочнее.

Так, профессор Х. Фаталиев говорит о неотделимости материи от движения, ссылаясь на незыблемость закона сохранения энергии. На закон сохранения энергии ссылаются многие авторы, тогда как и этот закон есть такая же экстраполяция закономерности, подмеченной для ряда явлений, на все явления и процессы в мире, как и экстраполяция второго начала на космос, чем мы обязаны появлению загадки Клаузиуса. А вот мнение по поводу закона сохранения энергии академиков Л. Арцимовича, Л. Капицы и П. Тамма:

«Конечно, тот факт, что закон сохранения энергии строго выполняется во всех процессах, протекающих в масштабах нашей планеты, не дает основания теоретически отрицать возможность того, что явления космических масштабов подчиняются каким-либо иным закономерностям» [5].

Не ограничивается «незамкнутостью» Вселенной и К. Путилов. Характерно, что уже на третьей странице параграфа «О так называемой «тепловой смерти» мира...» книги К. Путилова после ссылки на незамкнутость Вселенной автор заявляет, что «грубейшая ошибка в постановке самого вопроса о «тепловой смерти» мира лишает эту ложную проблему какого бы то ни было интереса», но после этого следует еще четыре страницы попыток объяснить невозможность «тепловой смерти» саморазвитием явлений природы, которые в конце концов приводят автора в спасательную гавань гипотезы Больцмана.

Можно привести и другие примеры решения проблемы прогресса в эволюции Вселенной [6]. Ю. Перель видит решение проблемы в многообразии форм движения материи, в бесконечности количества энергии, ссылаясь при этом на Ф. Энгельса.

На Ф. Энгельса ссылаются за редким исключением все, кто пишет о «тепловой смерти» Вселенной. Обычно цитируются его слова о многообразии форм движения,

о возможностях их неограниченного взаимопревращения. Но уж если цитировать Ф. Энгельса, то надо начинать с той мысли, что приведена эпиграфом, и ещё одной [7]:

«Так же мало в преодолении трудностей помогает общее утверждение, что общее количество (*die masse*) движения бесконечно, то есть неисчерпаемо, таким путём мы... не придём к возрождению умерших... Круговорот здесь не получается!»

Можно подвести некоторый итог. Ни гипотеза Больцмана, ни попытки физиков-статистиков, ни попытки философского решения проблемы не могут быть, на наш взгляд, признаны удовлетворительными.

Гипотеза Больцмана, вскрывая диалектику обратимости и необратимости, в то же время обедняет процесс развития и мало чем отличается от теории «тепловой смерти» в чистом виде.

Работы физиков-статистиков, ценные самой постановкой вопроса о распространении идей статистической физики на бесконечные системы, страдают односторонностью в трактовке вопроса о развитии, так как в общем признают преимущественное нарастание энтропии в конечных частях Вселенной, что, заметим, не согласуется с положением диалектики развития: как единства двух противоположностей регресса и прогресса.

Совершенно недопустимы натурфилософские попытки решения проблемы. Именно об этом говорит Ф. Энгельс [7]: «...нельзя отделяться при помощи негодных отсрочек векселей и увиливанием от ответа...».

Принципиальная обратимость явлений. Концентрация рассеянной энергии. Работы Больцмана нанесли ощутимый удар по пророчествам Клаузиуса. Однако наиболее принципиальную научную позицию в вопросе эволюции Вселенной заняли такие мыслители и ученые как Ф. Энгельс, Н. Чернышевский, Н. Умов, К. Циолковский и др. Они, подчеркивая односторонность концепции возрастания энтропии, в то же время понимали всю грандиозность проблемы, которую надо решить, чтобы найти ответ на загадку Клаузиуса.

Резко выступили против теории «тепловой смерти», подчёркивая односторонность концепции возрастания энтропии, Г. Гельмгольц, Д. Максвелл, В. Нернст, Р. Милликен и др.

Но только Ф. Энгельсу удалось первому чётко сформулировать задачу отыскать конкретный механизм тех процессов, которые обеспечивают круговорот материи в космосе. Да, во втором начале термодинамики проявляется вполне тенденция к смерти, но такова диалектика процессов, что должна ещё иметь место тенденция, ответственная за восходящую ветвь процессов, ветвь концентрации энергии, ветвь жизни. Ф. Энгельс так обосновал эту мысль:

«...приходят все же к исчерпанию и к прекращению движения. Вопрос будет окончательно решён лишь в том случае, если будет показано, каким образом излученная в мировое пространство теплота становится снова используемой... Вопрос о том, что делается с потерянной как будто бы теплотой, поставлен... лишь в 1867 г... возможно, что пройдёт ещё немало времени, пока мы своими скромными средствами добьёмся решения его» [7].

К такому же выводу пришёл Н. Чернышевский [8]:

«Формула, предвещающая конец движения во Вселенной, противоречит факту существования движения в наше время... Из того факта, что конец ещё не настал, очевидно, что ход процесса прерывался бесчисленное число раз действием процесса, имеющего обратное направление...».

И вот, наконец, в 1902 г. Н. Умов в речи на II съезде русских натуралистов высказал мысль о наличии третьего начала термодинамики, ответственного за тенденцию концентрации энергии: «Мы имеем два закона термодинамики, но мы не имеем закона, который устранил бы Wazmetod и включил бы в себя процессы жизни... Существование в природе приспособлений, восстанавливающих стройность... должно, по видимому, составлять содержание этого третьего закона...».

Оба эти закона ни в коей мере не исключают друг друга: примат третьего нача-

ла означал бы безостановочную убыль энтропии. Вселенной снова грозила бы смерть, но на этот раз от жары. Любопытно, что ещё в 1947 г. профессор А. Гухман показал, что закон возрастания энтропии в пределах его логической формулировки может быть замечен противоположным ему по смыслу законом убывания энтропии [9].

Только наличие одновременно проходящих и уравновешенных процессов нарастания и убывания энтропии приводит к вечному круговороту материи, энергии в космосе.

Исследованию проблемы всеобщего круговорота энергии отдал около 40 лет творческой деятельности К. Циолковский. Именно ему принадлежит гипотеза об обратимости явлений природы, связанных с рассеянием энергии. Вопрос о концентрации энергии учёный неразрывно связывал с проблемами жизни [10]:

«История развития техники и перспективы этого развития всерьёз ставят вопрос об источниках энергии, обеспечивающей существование всего живого, ибо сейчас человечество сжигает за сутки столько же топлива, сколько было создано на Земле за 1000 лет... Если же научиться использовать рассеиваемую в пространстве энергию, то это означало бы не только крушение теории «тепловой смерти» Вселенной, а главное... подтвердит вечную юность Вселенной и даст великие технические перспективы сосредоточения энергии».

Гипотеза К. Циолковского важна ещё и тем, что относится к области знаний, где научная теория находится в стадии становления. Времена Ньютона с отрицательным отношением к гипотезам канули. История науки показывает, что без гипотез научному знанию не обойтись.

Наиболее полно идеи К. Циолковского, касающиеся второго начала термодинамики, изложены в двух его работах [11, 12] и в ряде статей и заметок. Он первым обратил внимание на «оговорки», имеющиеся в формулировках второго начала у Клаузиуса и Томсона, указал на меньшую, чем у первого начала, строгость этих формулировок [10]: «Постулат Клаузиуса ... говорит: «теп-

лота не может сама собой перейти от более холодного тела к более тёплому» ... слова постулата «сама собой» делают его не совсем ясным ... не происходит ... перехода теплоты от холодных тел к тёплым. Если бы это могло происходить каким-нибудь способом ..., тогда мы могли бы воспользоваться этим ... люди могли бы получить всё необходимое без посредства солнечной энергии... Невозможность этого Томсон выразил так: нельзя получить при помощи неодушевлённой материи работу от какой-либо материи, охлаждая её ниже температуры наиболее холодного из окружающих тел... Это положение ... также содержит, по-видимому, странную оговорку: при помощи неодушевлённой материи ... Если же теплота может переходить при каких-либо условиях от более холодных тел к более нагретым, то это должно иметь огромное не только философское и общенаучное значение, но ... и чисто практическое».

Обосновывая свою теорию, К. Циолковский указал, как на одно из условий обратимости взаимодействие гравитационного поля с частицами вещества, ибо «... всемирное тяготение, одна из самых вездесущих сил природы, ... возбуждает неравномерность температур» [10]. Современная космология подтверждает эту догадку К. Циолковского. Получило признание воззрение на природу галактик, развитое академиком В. Амбарцумяном, согласно которому наблюдаемые группы и даже скопления галактик неустойчивы, энергия движения их компонентов превышает силы тяготения и поэтому они удаляются друг от друга, эти группы и скопления распадаются. А если такие группы компонентов ещё существуют, значит они моложе остальных. Следовательно, галактики не возникли все одновременно. В космосе есть не только новые и сверхновые звёзды, а целые галактики. Это можно считать свидетельством возможности концентрации энергии из-за взаимодействия гравитационного поля с частицами вещества.

Сторонник идеи прогресса в эволюции Вселенной К. Циолковский был также сторонником идеи диалектического единства

микромира, макромира и космоса, а потому выступал против применения теории «тепловой смерти» к масштабам Земли. С ним солидарны академик Н. Белов и профессор В. Лебедев, которые считают, что в земной коре происходит постоянный прогресс обратимости земного вещества при участии солнечной энергии [13]:

«... ясной также становится несостоятельность выводов о «тепловой смерти» Земли, во всяком случае ранее, чем угаснет Солнце».

Большое внимание К. Циолковский уделял вопросу взаимодействия электромагнитного поля и вещества как второму условию осуществления обратимости энергии, так как электромагнитное поле проще сконцентрировать, сделать более мощным, чем гравитационное, им легче управлять.

Проблеме концентрации энергии в пространстве как залого прогресса в эволюции Вселенной большое внимание уделял П. Ощепков [14].

Профессор П. Ощепков среди предпосылок правомерности говорить о процессах концентрации энергии называет, на наш взгляд, такие наиболее интересные предпосылки, как свойство движущегося электрона переносить тепловую энергию от одной границы двух химически разнородных проводников до другой их границы со скоростью света, тогда как обратное её распространение (выравнивание температурного поля) происходит только за счёт теплопроводности, то есть очень медленно. И, наконец, он указывает на живые организмы, где перемещение электрических зарядов происходит в весьма малых объёмах и в этом микромире, по П. Ощепкову, разгадка процессов, приводящих к концентрации энергии.

На живой организм чаще всего ссылаются все противники теории «тепловой смерти». Задолго до П. Ощепкова эту мысль неоднократно высказывали Н. Умов, К. Тимирязев, В. Вернадский. Живые организмы, разумеется, подчиняются действию второго начала, однако всем известна способность живых организмов к саморегулированию, восстановлению после болезни. Сам факт существования и деятельности

человека означает с термодинамической точки зрения некомпенсированную убыль энтропии. Отсюда следует вывод, к которому пришли Н. Умов, К. Тимирязев и другие, – изучение биоэнергетики воссоздает суть третьего начала термодинамики. По К. Циолковскому, в живой природе воз-

можно то, чего не может неживая природа, – концентрация энергии.

На наш взгляд, биофизика, стоящая на стыке физики и биологии, станет в дальнейшем ареной таких открытий, с которыми не идёт ни в какое сравнение открытие атомной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Наан Г.** О бесконечности Вселенной / Г. Наан // Вопросы философии. 1961. № 6. С. 105.

2. **Путилов К.** Курс физики / К. Путилов. М.: ГИТТЛ, 1954. Т. 1. 653 с.

3. **Фаталиев Х.** Марксизм-ленинизм и естествознание / Х. Фаталиев. М.: Изд-во МГУ, 1962.

4. **Козырев Н.** Причинная или несимметричная механика в линейном приближении / Н. Козырев. Пулково, 1958.

5. **Арцимович Л.** О легкомысленной погоне за научными сенсациями / Л. Арцимович, Л. Капица, И. Тамм // Правда. 22 ноября 1959.

6. **Перель Ю.** Развитие представлений о Вселенной / Ю. Перель. М.: ГИФИЛ, 1962. 391 с.

7. **Энгельс Ф.** Диалектика природы / Ф. Энгельс. М.: Госполитиздат, 1955. 228 с.

8. **Чернышевский Н.** Избранные философские сочинения / Н. Чернышевский. М.: Госполитиздат, 1951. Т. 3.

9. **Гухман А.** Об основаниях термодинамики / А. Гухман. Алма-Ата: Изд-во АН Каз. ССР, 1947. С. 77-80.

10. **Циолковский К.** Обратимость явлений вообще / К. Циолковский // Рукопись, 1935. Моск. отд. архива АН СССР. Ф. 555, 1, № 13-в.

11. **Циолковский К.** Второе начало термодинамики / К. Циолковский. Калуга: Изд-во Калуж. обл-ва изучения природы, 1914.

12. **Циолковский К.** Кинетическая теория света / К. Циолковский. Калуга: Изд-во Калуж. обл-ва изучения природы, 1919. Кн. 3.

13. **Белов Н.** Источники энергии геохимических процессов / Н. Белов, В. Лебедев // Природа. 1957. № 5.

14. **Ощепков П.** Закон концентрации энергии – фундаментальный закон природы / П. Ощепков, В. Рыбалко, Б. Осанов // Рукопись, 1951. Фонд Ин-та металлургии АН СССР, 1951.

Продолжение следует

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 (927) 623-03-25 – Тригорлый Сергей Викторович (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.

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 естественно-научных 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, Ю.Л. Жупилова
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 26.12.2017
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 13,0 Уч. изд. л. 5,5
Тираж 500 экз. Заказ 78 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 1-е полугодие 2018 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina, Yu.L. Zhupilova
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: 26.12.2017
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 13,0 Publication base sheet 5,5
Circulation: 500 printed copies Order 78 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*