

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (34)
Март 2022

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Главный редактор	КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Научный редактор	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ответственный секретарь	МОЛОТ СВЕТЛАНА ВИКТОРОВНА старший преподаватель, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Редакционная коллегия

В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
А.А. ЗАХАРОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.Б. КАЗАКОВ	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. ФОМИН	д.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (34)
March 2022

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief	KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Assistant to the Editor-in-Chief	BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Scientific Editor	ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Chief Executive Officer	MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA Senior Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

V.V. VAKHNINA	Dr.Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti
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
A.A. ZAKHAROV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.B. KAZAKOV	Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo
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
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu.B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.A. FOMIN	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
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

Птицына Е.В., Кувалдин А.Б., Птицын Д.В. Характеристики обрабатываемых изделий при питании инфракрасных и газоразрядных излучателей током сложной формы.....	5
Егоров И.С., Фомин А.А. Исследование влияния электро- технологических режимов контактной сварки и последующей индукционной обработки на формирование композиционной «сталь-титан- оксидной» структуры.....	13
Коняев А.Ю., Зязев М.Е., Багин Д.Н., Ильинская А.О. Оценка энергоэффективности установок электродинамической сепарации на основе линейных индукторов на стадии проектирования	22
Трухин П.О., Васинкина Е.Ю., Калганова С.Г., Кадыкова Ю.А. Математическое моделирование СВЧ модификации композиционных материалов в камере с бегущей волной меандрового типа	30
Фризен В.Э., Антипин А.С. Взаимное влияние элементов дисперсной загрузки при индукцион- ном нагреве массива изолированных стальных шаров.....	34
Андрянова Н.В., Маркелова О.А., Пичхидзе С.Я. Исследование влияния электротехнических режимов микродугового оксидирования на структуру и механические свойства ниобий-оксидных покрытий.....	42

Щелкунов А.Ю. Влияние электротехнологических параметров индукционно-термической обработки на температуру титановых образцов при формировании оксидных покрытий	49
--	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Царев В.А., Акафьева Н.А. Призматический трехзачорный резонатор для низковольтных многолучевых клистронов	57
Стариков А.В., Доманов В.И., Певчева Е.В. Математическая модель теплицы как объекта управления электротехническим комплексом.....	66
Артюхов И.И., Пыльская Е.К., Земцов А.И. Мультигенераторная СВЧ-установка конвейерного типа с электропитанием от автономного источника энергии.....	75

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Пиксаев В.М., Алямкина М.С., Пьянзин Д.В. Система диагностики мощных диодных выпрямителей.....	85
--	----

ПАМЯТИ УЧЕНОГО.

Архангельский Юрий Сергеевич.....	91
К сведению авторов	93

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

Ptitsyna E.V., Kuvaldin A.B., Ptitsyn D.V. Characteristics of processed products at power supply of infrared and gas-discharge emitters with complex shapes	5
Egorov I.S., Fomin A.A. Effect of electrical process modes in resistance welding and subsequent induction treatment on formation of a composite «steel-titanium-oxide» structure	13
Konyaev A.Yu., Zyazev M.E., Bagin D.N., Ilyinskaya A.O. Evaluation of energy efficiency of eddy-current separation plants based on linear inductors at the design stage	22
Trukhin P.O., Vasinkina E.Yu., Kalganova S.G., Kadykova Yu.A. Mathematical modeling of microwave modification of composite materials in a chamber with meander type traveling wave.....	30
Frizen V.E., Antipin A.S. Mutual influence of dispersed loading elements during induction heating of an array of insulated steel balls	34
Andriyanova N.V., Markelova O.A., Pichkhidze S.Ya. Influence of micro-arc oxidation modes on the structure and mechanical properties of niobium oxide coatings	42

Shchelkunov A.Yu. Influence of electrotechnological parameters of induction heat treatment on the temperature of titanium samples during formation of oxide coatings	49
---	----

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Miroshnichenko A.Yu., Chernyshev M.A., Tsarev V.A., Akafyeva N.A. Prismatic three-gap resonator for low-voltage multibeam klystrons.....	57
Starikov A.V., Domanov V.I., Pevcheva E.V. Mathematical model of a greenhouse as an object of control of an electrical complex.....	66
Artyukhov I.I., Pylskaya E.K., Zemtsov A.I. Multi-generator conveyor microwave installation powered by autonomous energy source.....	75

POWER ELECTRONICS

Piksaev V.M., Alyamkina M.S., Pyanzin D.V. Diagnosis system for powerful diode rectifiers	85
--	----

IN MEMORY OF THE SCIENTIST.

Arkhangelskiy Yuri Sergeevich.....	91
Information for Authors.....	93

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПИТАНИИ ИНФРАКРАСНЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Е.В. Птицына, А.Б. Кувалдин, Д.В. Птицын

CHARACTERISTICS OF PROCESSED PRODUCTS AT POWER SUPPLY OF INFRARED AND GAS-DISCHARGE EMITTERS WITH COMPLEX SHAPES

E.V. Ptitsyna, A.B. Kuvaldin, D.V. Ptitsyn

Разработана методика исследования спектральных характеристик обрабатываемых изделий (поверхностей) при питании установок с инфракрасными и газоразрядными излучателями током сложной формы.

Ключевые слова: установка с инфракрасным (газоразрядным) излучателем, обрабатываемые изделия, спектральные характеристики, ток сложной формы

Для получения обрабатываемых изделий (поверхностей) с требуемыми свойствами используются разнообразные методы обработки. Так, поверхности аморфных сплавов, широко применяемые в электротехнических устройствах, подвергаются магнитоимпульсной обработке. Последующее исследование изменения состояния поверхности проводят методом автоэлектронной эмиссии в камере газоразрядной визуализации. При этом фотографии треков отображают неоднородности на поверхности исследуемых образцов [1, 2]. При обработке пищевых продуктов используется инфракрасный нагрев, СВЧ нагрев, токи постоянной или низкой частоты [3].

Таким образом, при обработке изделий (поверхностей) принимают во внимание

A method for studying the spectral characteristics of processed products (surfaces) when feeding installations with infrared and gas-discharge emitters with a complex shape is developed.

Keywords: installation with infrared (gas-discharge) emitter, processed products, spectral characteristics, complex current

химические или физические свойства веществ. Эти свойства позволяют выбирать и различные физико-химические методы анализа веществ (спектральные, электрохимические, термические, хроматографические). Так, в установках с инфракрасными излучателями возмущающим воздействием на обрабатываемое изделие является электромагнитное излучение. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом лежит и в основе оптических методов анализа изделий (поверхностей) [4].

Известно [4-6], что явления, обусловленные корпускулярными свойствами электромагнитного излучения, лежат в основе спектроскопических методов анализа. Интенсивность электромагнитного излучения изменяется при взаимодействии с веще-

ством, так как атомы и молекулы вещества (обрабатываемых изделий, поверхностей) могут испускать, поглощать квант света – фотон. За счет энергии проходящего через вещество света увеличивается внутренняя энергия вещества: электромагнитная энергия излучения передается атомам и молекулам вещества и переводит их из основного состояния в возбужденное состояние. Имеет место абсорбция излучения. Из-за поглощения энергии света веществом поток излучения ослабляется. Увеличение внутренней энергии вещества обуславливает увеличение энергии вращения молекул, энергии колебаний атомов в молекулах или энергии колебаний электронов в атомах. Так, в атомах внутренняя энергия определяется энергией валентных электронов. Так как меняется частота и амплитуда колебаний заряженных частиц, то изменяются спектры излучения или поглощения (число пиков, их расположение, высота, форма). Характеристиками спектральных линий являются длина волны (частота). Интенсивность спектральных линий определяется количеством лучистой энергии определенной частоты, испускаемой (или поглощаемой) частицей в единицу времени, то есть спектральная линия определяется совокупностью всех фотонов одной частоты.

Следовательно, методы спектроскопии позволяют получить информацию о составе вещества, его строении, количестве содержащихся веществ. Интенсивность сигнала важная характеристика и связана с количеством анализируемого соединения. Установлено, что в разбавленных растворах понижение интенсивности излучения подчиняется закону Бургера – Ламберта – Бера. При использовании методов фотометрии, например, колориметрическом методе анализа требуется растворение анализируемого образца, введение в раствор реактивов и получения окрашенного соединения [4, 7, 8].

Среди спектральных методов анализа выделяют метод молекулярно-абсорбционного спектрального анализа, основанный на измерении интенсивности светового потока излучения при прохождении через поглощающую среду (ослабленного светового потока при

избирательном поглощении света исследуемым веществом). Методы атомной спектроскопии основаны на исследовании спектров испускания и поглощения вещества, только после его перевода в атомарное состояние. Например, эмиссионная спектроскопия позволяет при воздействии высоких температур дуги до 7000°C переводить валентные электроны атомов вещества на высокие энергетические уровни с последующим переходом в основное состояние. При этом в эмиссионной пламенной фотометрии используется свойство легко возбуждаемых в пламене газовой горелки элементов давать характеристические линии в видимой части спектра [4, 7, 8].

Однако в литературе отсутствуют методики исследования спектральных характеристик обрабатываемых изделий (поверхностей), учитывающие электрические режимы работы установок с инфракрасными и газоразрядными излучателями [4, 7, 8].

В данной работе объектом исследования являются режимы работы установок с инфракрасными и газоразрядными излучателями и различными типами обрабатываемых изделий (поверхностей) при питании ТСФ.

Целью исследований является определение характеристик установок с инфракрасными и газоразрядными излучателями и характеристик обрабатываемых изделий при изменении амплитуды и частоты питающего напряжения (тока) для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов работы и разработки систем автоматического управления такими установками.

В работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработать методику исследований обрабатываемых изделий (поверхностей) на физических моделях установок с инфракрасными и газоразрядными излучателями при различных электрических режимах;

- по результатам исследований энергетических показателей, спектров излучения, фотометрических, радиационных и др. параметров исследований разработать рекомендации по выбору эффективных режимов работы установок и параметров обрабатываемых изделий.

Экспериментальные исследования

Представленные в работе исследования выполнены для двух электрических режимов: обычного режима с питанием током частотой 50 Гц и нового режима с питанием ТСФ без постоянной составляющей. В обычном режиме питание нагрузки осуществлялось от однофазного трансформатора 220/110 В с переключением ступеней напряжения без возбуждения А-Х₁, А-Х₃. В новом режиме питание реализовано через однофазный трансформатор и дроссель, работающий в режиме насыщения и использованный для регулирования формы, т. е. гармонического состава питающего напряжения (тока). Он позволяет изменять спектр тока (напряжение) с содержанием четных и нечетных гармонических составляющих с частотами $10^2 \div 10^3$ Гц [5, 6].

Эксперименты выполнены на физических моделях установок с инфракрасным и газоразрядным излучателями:

1) температурный излучатель мощность 100 Вт, цоколь Е27;

2) энергосберегающая лампа LUXRAY мощность 20 Вт, цоколь Е27.

В качестве обрабатываемых изделий (поверхностей) выбраны прозрачные изделия из матированного стекла, изготовленного на основе бесцветного стекла и содержащего кремнезем, силикаты натрия, калия, кальция и др.), которое не имеет ярко выраженной кристаллической решетки и определенной температуры плавления:

1) типа 1 – плоская поверхность 250×250 мм (матовая), толщина 4 мм ТУ 5921-002-96646333-2007;

2) типа 2 – плоская поверхность 250×250 мм (матовая), толщина 4 мм ТУ 5921-002-09438560-2014 (производитель: ООО «Мир зеркал», 603163, г. Нижний Новгород, Казанское шоссе, д. 5).

Обрабатываемые изделия размещали на фиксированном расстоянии от излучателя. По спектральным характеристикам количественно оценивали энергетические параметры при распространении электромагнитной волны от излучателя (радиационные, колориметрические и др.):

Используемые приборы: оптоволоконный спектрометр типа AvaSpec-ULS 2048-USB2, в комплекте – программное обеспечение AvaSoft-ALL [10]; для измерения электрических параметров – анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060 (диапазон измеряемых токов 40, 400, 2000 А; разрешение 0,01, 0,1, 1 А; погрешность тока $\pm 1,5\%$; диапазон измеряемых напряжений 4, 40, 400, 750 В; разрешение 0,001, 0,01, 0,1, 1 В; погрешность напряжения $\pm 1,0\%$; диапазон измерения мощности 4, 40, 400, 1200 кВт; разрешение 1, 10, 100, 1000; диапазон измерения коэффициента мощности 0,3-1,0; разрешение 0,01, погрешность коэффициента мощности $\pm 3\%$, диапазон измерения частоты 10 Гц – погрешность 40-70 Гц $\pm 0,5\%$; диапазон измерения энергии 4-40 кВт·ч; погрешность расхода электроэнергии $\pm 3\%$), и в режимах амперметра и вольтметра. Функциональная схема лабораторной установки экспериментов в новом режиме с питанием ТСФ представлена на рис. 1.

В работе выполнены три серии экспериментов. **В первой серии** исследовали режимы работы установки со светлым инфракрасным излучателем. Составляющие мощности, потребляемой из сети, значение коэффициента мощности в сети установки с инфракрасным излучателем даны в табл. 1. В работе для оценки эффективности установки со светлым излучателем исследованы спектры излучения, фотометрические и радиометрические, колориметрические параметры. Основным энергетическим параметром фотометрии является поток излучения Φ , имеющий физический смысл, средней мощности, переносимой электромагнитным излучением. Пространственное распределение потока Φ описывается величинами, производными от потока излучения по площади, – это освещенность E , лк. Радиометрическим параметром является число фотонов, рассчитываемое из зависимости энергии фотона от длины волны и измеряемой световой энергии.

Для установки с инфракрасным излучателем значение коэффициента мощности в сети

увеличилось в исследуемых режимах с 0,42 до 0,90. При цветовой температуре $T_{ci} = 1845,0$ К световой поток и освещенность в обычном режиме составили 1925,0 лм и 153,0 лк, а в новом – соответственно 1900,8 лм и 150,0 лк. Выход фотонов с по-

верхности диффузора в сравниваемых режимах был $4,47 \cdot 10^{-4}$ и $450 \cdot 10^{-4} \mu\text{Mol}$.

Согласно табл. 1, эффективность установки с инфракрасным излучателем возросла в режиме при питании ТСФ.

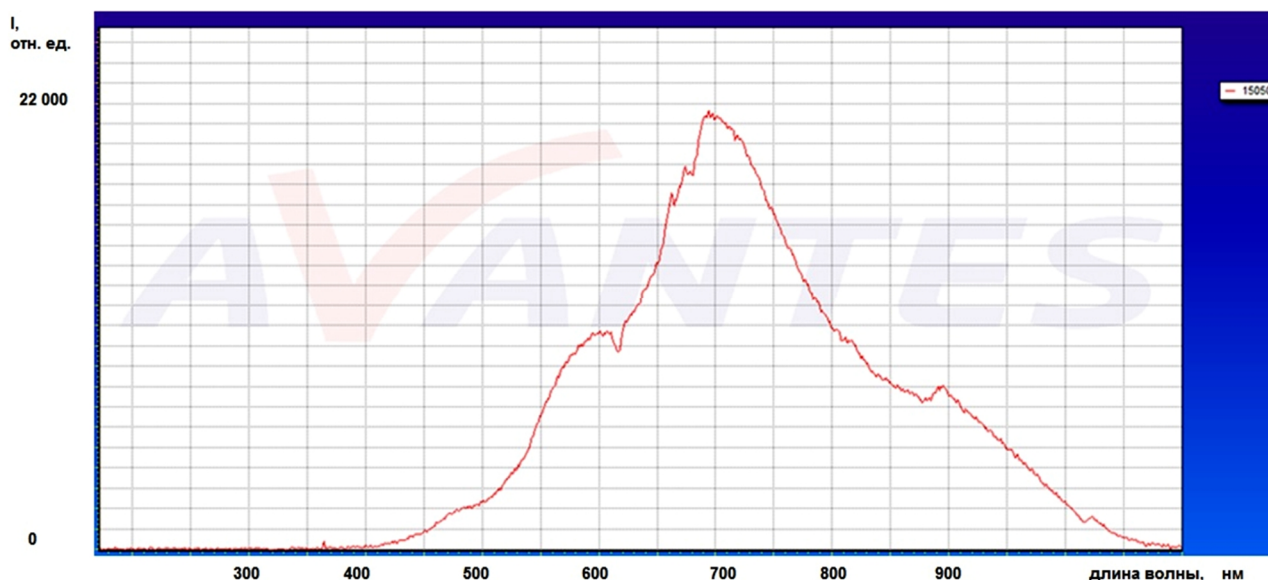


Рис. 1. Окно спектра излучения светлого инфракрасного излучателя мощностью 100 Вт в обычном режиме работы при частоте тока 50 Гц: интенсивность излучения при длине волны 700 нм – 22 000 отн. ед.

Таблица 1. Показатели работы в сети в исследуемых электрических режимах работы установки со светлым инфракрасным излучателем

Электрический режим	Мощность из сети			$\cos \varphi$	U в узле питания, В
	P , кВт	Q , квар	S , кВА		
Обычный: переменный ток 50 Гц	0,045	0,0957	0,106	0,42	115
Новый: ТСФ	0,036	0,0176	0,040	0,90	115

Индивидуальные значения коэффициентов мощности в исследуемых режимах для исследуемого излучателя не менялись и составили – 0,974 (0,970) (см. табл. 2).

Во второй серии исследовали влияние режимов работы установки с инфракрасным излучателем на характеристики обрабатываемых изделий (поверхностей). На рис. 1 дано окно спектра излучения инфракрасного излучателя в обычном режиме. В сравниваемых режимах интенсивность излучения при длине волны 700 нм составила 22000 отн. ед.

Окна спектров для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 1 и типа 2 показаны на рис. 2 и 3. Установлено снижение интенсивности в спектре при длине волны 700 нм для первого типа обрабатываемого изделия до 18000 отн. ед. и второго типа обрабатываемого изделия до 16000 отн. ед. При регулировании частоты и амплитуды питающего напряжения (тока) эти показатели интенсивности в спектрах исследуемых обрабатываемых изделий (поверхностей) не изменялись и принимали значение, как в обычном режиме.

Таблица 2. Показатели работы в нагрузке исследуемых электрических режимах работы установки со светлым инфракрасным излучателем

Электрический режим	Мощность из сети			$\cos \varphi$	U в узле питания, В
	P , кВт	Q , квар	S , кВА		
Обычный: переменный ток 50 Гц	0,030	0,0070	0,0308	0,974	115
Новый: ТСФ	0,027	0,0074	0,0280	0,970	115

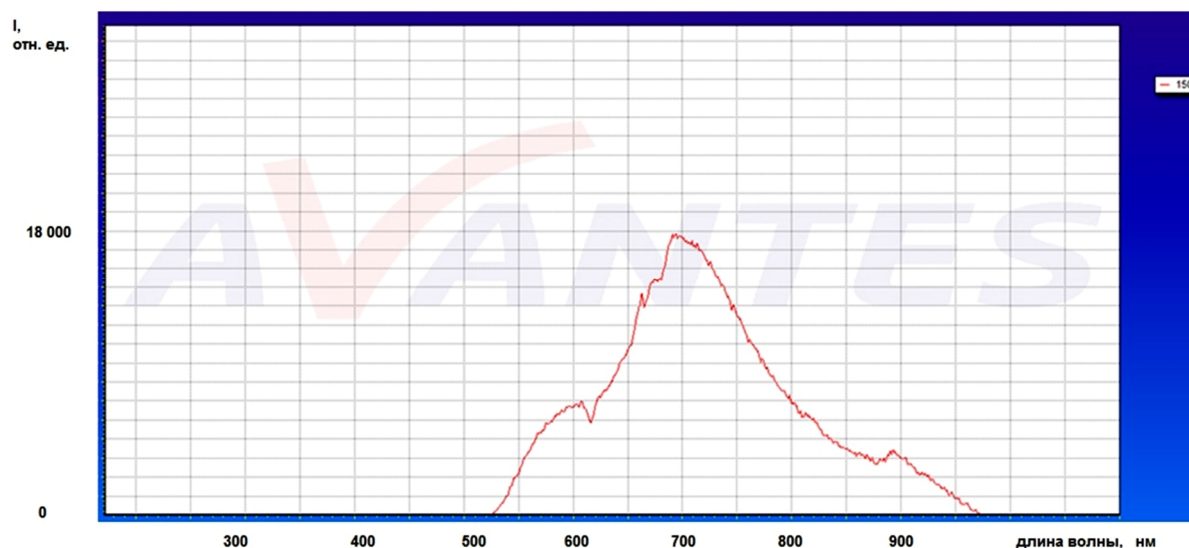


Рис. 2. Окно спектра для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 1 в обычном режиме работы при частоте тока 50 Гц: интенсивность излучения при длине волны 700 нм – 18000 отн. ед.

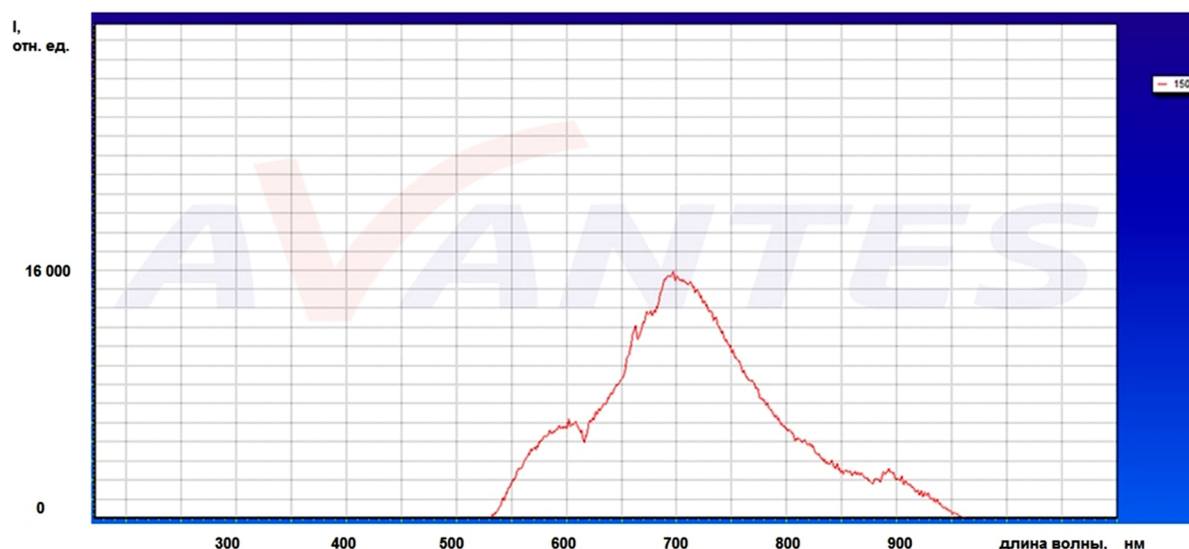


Рис. 3. Окно спектра для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 2 в обычном режиме работы при частоте тока 50 Гц: интенсивность излучения при длине волны 700 нм – 16000 отн. ед.

Для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 1 при цветовой температуре $T_u = 1836,0$ К световой поток и освещенность в обычном режиме составили 1546,0 лм и 123,0 лк, а в новом –

при температуре 1830.0 К составили 1565,5 лм и 124,0 лк. Выход фотонов с поверхности диффузора в сравниваемых режимах был равен $3,52 \cdot 10^{-4}$ и $3,570 \cdot 10^{-4}$.

Для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 2 при цветовой температуре $T_{\text{ц}} = 1847,0$ К световой поток и освещенность в обычном режиме составили 1434,0 лм и 114,0 лк, а в новом – при температуре 1845,0 К составили 1470,0 лм и 117,0 лк. Выход фотонов с поверхности диффузора в сравниваемых режимах был равен $3,271 \cdot 10^{-4}$ и $3,280 \cdot 10^{-4}$.

Экспериментально установлено, для исследуемых поверхностей 1 и 2 типов имело место изменение интенсивности электромагнитного излучения после вза-

имодействия с веществом. Но оно различно с учетом качественного и количественного состава вещества в обрабатываемых изделиях.

В третьей серии исследовали влияние режимов работы установки с газоразрядным излучателем на характеристики спектров излучения. В обычном режиме линейчатый спектр газоразрядного излучателя мощностью 20 Вт представлен на рис. 4. Окна спектров для обрабатываемого изделия (поверхности) 1 и 2 типов показаны соответственно на рис. 5 и 6.

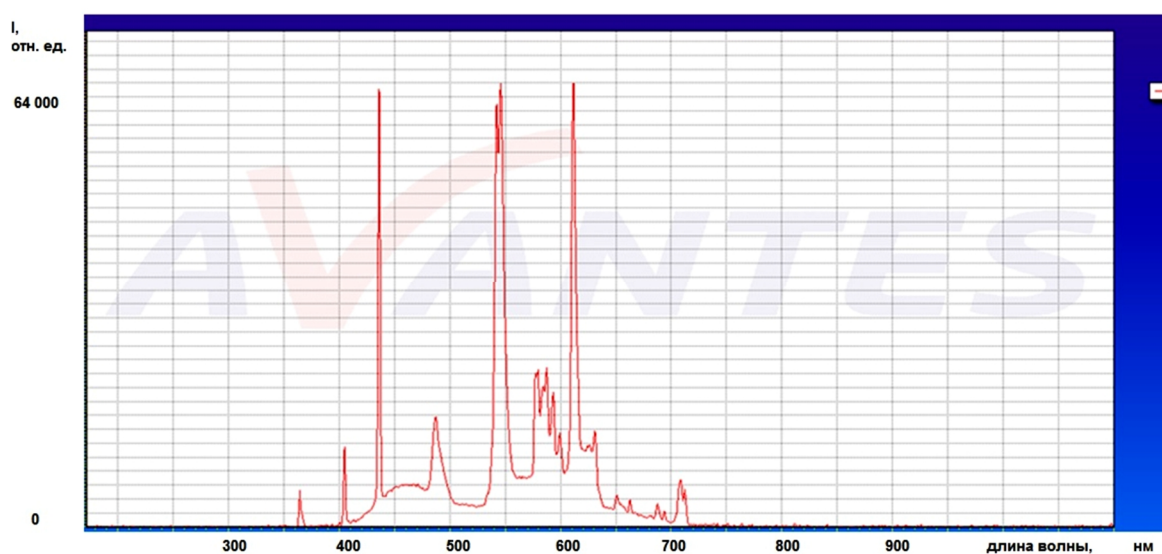


Рис. 4. Окно спектра излучения газоразрядного излучателя мощностью 20 Вт в обычном режиме работы при частоте тока 50 Гц: интенсивность излучения при длине волны 430 нм, 550 нм, 625 нм – 64000 отн. ед.

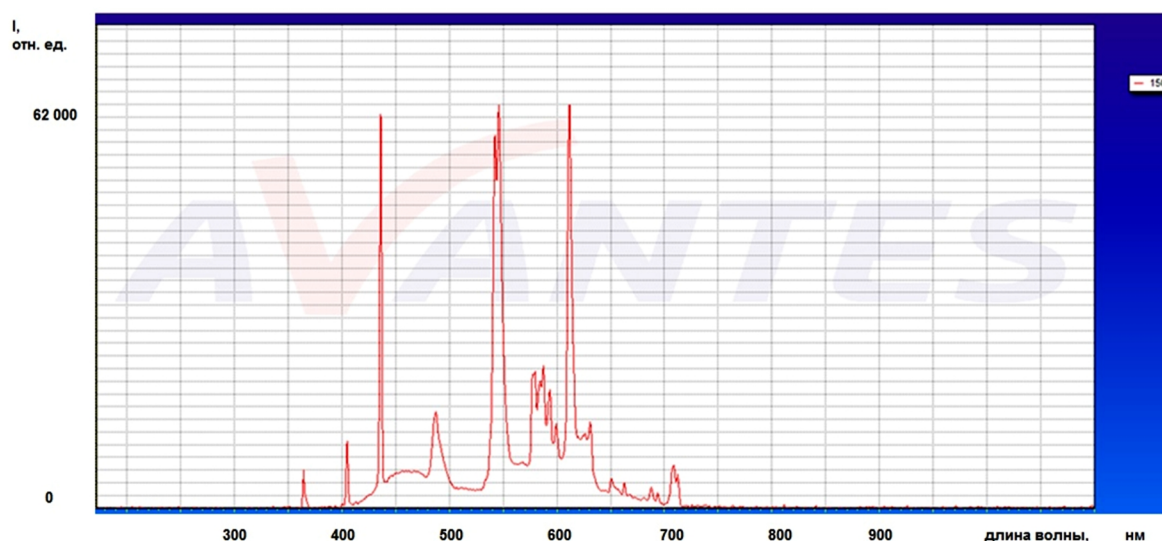


Рис. 5. Окно спектра для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 1 в обычном режиме работы при частоте тока 50 Гц: интенсивность излучения при длине волны 430 нм – 62000 отн. ед.

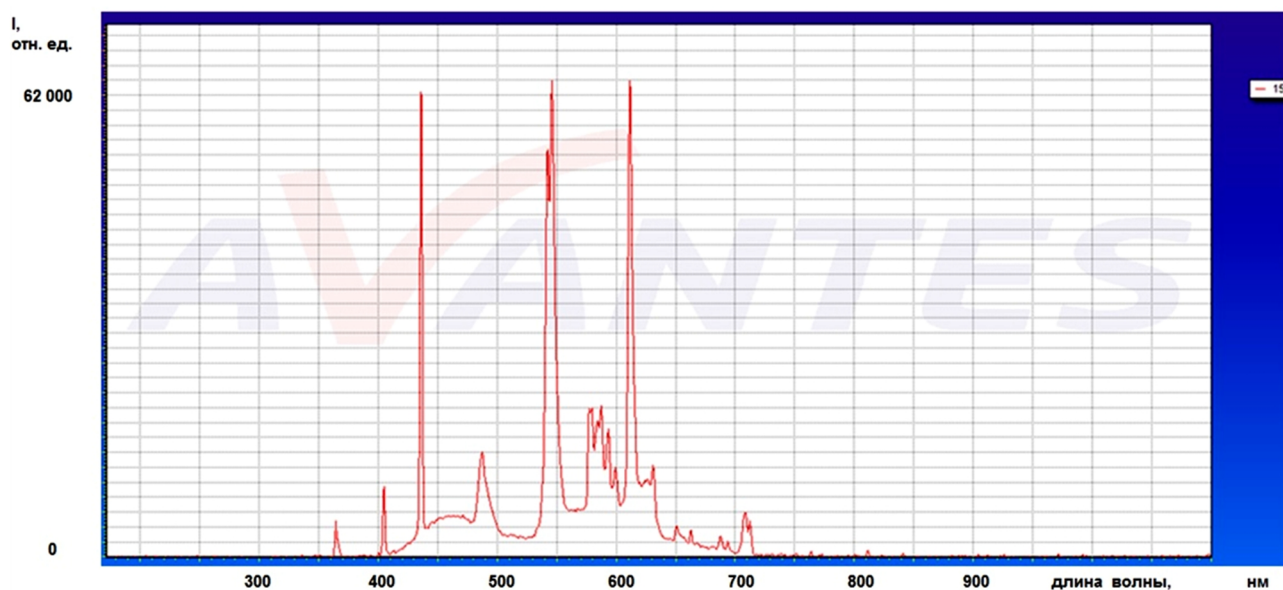


Рис. 6. Окно спектра для обрабатываемого изделия (поверхности) типа 2 в обычном режиме работы при частоте тока 50 Гц: интенсивность излучения при длине волны 430 нм – 62000 отн. ед.

Установлено снижение интенсивности отдельных линий в спектре при длине волны 430 нм для первого типа обрабатываемого изделия с 64000 до 62000 отн. ед. и второго типа обрабатываемого изделия с 64000 до 62000 отн. ед. При регулировании частоты и амплитуды питающего напряжения (тока) эти показатели интенсивности в спектрах исследуемых обрабатываемых изделий (поверхностей) не изменялись и принимали значение, как в обычном режиме.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что применение ТСФ позволяет получить положительные эффекты: обеспечить работу установок с оптическими излучателями на более низкой ступени ПБВ (РПН) силового трансформатора, с более высоким значением коэффициента мощности при снижении индуктивности его обмоток. Индивидуаль-

ные показатели работы установок с оптическими излучателями разных типов не снижаются в режиме с питанием ТСФ.

2. Установлено, что типы излучателей (инфракрасные или газоразрядные) влияют на характеристики спектров обрабатываемых изделий (поверхностей). Интенсивность излучения спектров обрабатываемых изделий (поверхностей) изменяется для разных типов изделий при воздействии электромагнитного излучения от одного и того же излучателя. Регулируя амплитуду и частоту питающего напряжения (тока), можно обеспечить требуемые характеристики поглощения и др.

3. Таким образом, для получения позитивных технологических и энергетических эффектов в установках с оптическими излучателями целесообразно регулировать форму и амплитуду питающего напряжения (тока).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. The Use of Gas Discharge Visualization for Identifying Structured Peculiarities of Blood Components: Plasma, Platelets and Erythrocytes / M.A. Stepovich, O.M. Maslennikova, M.N. Shipko et al. // Journal of Cardiology and Cardiovascular Therapy. March 2018. Vol. 9. Issue 4. P. 555770.

2. Староверов Б.А., Степанович М.А., Шипко М.Н. Автоматизация процессов импульсной магнитной обработки металлов и прецизионных сплавов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 8. С. 1-4.

3. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продук-

тов. Москва: Пищевая промышленность, 1974. 583 с.

4. Харитонов Ю.А., Джабаров Д.Н., Григорьев В.Ю. Количественный анализ, физико-химические методы анализа: практикум: учеб. пособие. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 368 с.

5. Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б. Влияние электромагнитной составляющей на процессы в темных и светлых инфракрасных излучателя // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования: материалы XXVII Междунар. конф. Москва, 19 ноября 2019 г. Москва: Изд-во МЭИ, 2019. С. 494-504.

6. Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б. Электромагнитная составляющая

и ее влияние на процессы в технологической и силовой нагрузке // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные исследования): материалы XXVIII Междунар. конф. Москва: Изд-во МЭИ, 2020. С. 333-344.

7. [http: www.avantes.ru](http://www.avantes.ru) – официальный сайт ООО «ЛОКАМЕД» официального дистрибьютора голландского холдинга AVANTES B.V. в России (дата обращения 10.08.2020 г.).

8. [http: www.renishaw.ru](http://www.renishaw.ru) – официальный сайт в России международной компании с компетенциями в областях измерений, контроля перемещений, здравоохранения, спектроскопии и прецизионной обработки (дата обращения 20.01.2021 г.).

Птицына Елена Витальевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ)

Кувалдин Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», действительный член Российской академии электротехнических наук

Птицын Дмитрий Вячеславович – ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ)

Elena V. Ptitsyna – Dr.Sc., Professor, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Omsk State Technical University (OmSTU)

Alexander B. Kuvaldin – Dr.Sc., Professor, Department of Electric Supply of Industrial Enterprises, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Member of the Russian Academy of Electrical Sciences

Dmitry V. Ptitsyn – Assistant Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Omsk State Technical University (OmSTU)

Статья поступила в редакцию 14.12.21, принята к опубликованию 12.01.22

УДК 621.791, 621.365.52, 621.794.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ «СТАЛЬ-ТИТАН-ОКСИДНОЙ» СТРУКТУРЫ

И.С. Егоров, А.А. Фомин

EFFECT OF ELECTRICAL PROCESS MODES IN RESISTANCE WELDING AND SUBSEQUENT INDUCTION TREATMENT ON FORMATION OF A COMPOSITE «STEEL-TITANIUM-OXIDE» STRUCTURE

I.S. Egorov, A.A. Fomin

Для снижения производственных затрат при металлообработке в настоящее время прибегают к разработке технологий по производству инструментов, рабочая часть которых имеет сменные элементы с функциональной композиционной структурой. В данной работе исследован метод получения слоистой «сталь-титан-оксидной» структуры сменных пластин режущего инструмента (СПРИ). Метод заключается в применении точечной контактной сварки стальной основы СПРИ с тонколистовым титаном, формообразующей механообработки и последующей индукционно-термической обработки (ИТО) полученной конструкции. Приведены результаты исследования влияния электротехнологических режимов ИТО на физико-механические и эксплуатационные характеристики слоистой «сталь-титан-оксидной» системы.

Ключевые слова: инструментальная сталь, технический титан, контактная сварка, индукционно-термическая обработка, титан-оксидное покрытие, режущий инструмент

В настоящее время наблюдается возрастание спроса на использование ресурсосберегающих и энергоэффективных техноло-

Currently to reduce the metal-working costs, advanced technologies for manufacturing tools with replaceable composite structure elements in the working parts have been developed. This work presents a research into a method applied to obtain a layered "steel-titanium-oxide" structure of replaceable cutting tool inserts (RCTI). The method implies the use of spot resistance welding for the steel base of RCTI with thin-sheet titanium, shaping machining and subsequent induction heat treatment (IHT) of the obtained structure. The results of research into the influence of the IHT electrotechnological modes on physical-mechanical and operational characteristics of the layered "steel-titanium-oxide" system are provided.

Keywords: tool steel, commercial titanium, resistance welding, induction heat treatment, titanium-oxide coating, cutting tool

гий обработки конструкционных материалов. Одним из критериев эффективности при создании металлоизделий является

уменьшение доли использования дорогостоящих материалов путем их замены на более дешевые, при этом не должно наблюдаться снижения надежности [1, 2].

Титановые сплавы широко востребованы в виду своих качеств. Титан как материал обладает высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и жаростойкостью [3]. При индукционной термообработке титана в кислородсодержащей атмосфере на его поверхности формируется особо твердый оксидный слой (подслой), который представляет собой рутил (TiO_2) [3-5]. Толщина такого слоя и нижележащего диффузионного слоя достигает 70 ± 10 мкм. Твердость поверхности функционального покрытия может достигать 40-60 ГПа, что сравнимо с твердостью кубического нитрида бора и прочих сверхтвердых материалов. Однако приповерхностный (диффузионный) слой имеет твердость около 9-12 ГПа, а на глубине 100-200 мкм и более титан имеет твердость около 4-6 ГПа. Такая особенность ограничивает сферу применения титана с модифицированной поверхностью.

Применение титана и титаносодержащих сплавов в виде покрытия является оптимальным с точки зрения экономии дорогостоящего материала [6, 7]. Титан как функциональное покрытие применяют для нанесения на конструкционные стали, что обусловлено высокой прочностью и низкой стоимостью относительно титана. В связи с низкой коррозионной стойкостью и низкой теплостойкостью стали защита её поверхности титаносодержащими покрытиями является перспективным вариантом.

Применение быстрорежущих инструментальных сталей эффективно для обработки материалов с невысокой и умеренной величиной твердости [8, 9]. Однако этим ограничивается их применение при обработке жаростойких и высокопрочных сплавов в связи с низкой теплостойкостью. Применение титаносодержащих слоев нитридного, карбонитридного, оксинитридного и оксидного составов является перспективным для повышения износостойкости в условиях воздействия сосредоточенных нагрузок.

Сталь и титан являются разнородными материалами, между которыми при получении неразъемного соединения образуются хрупкие интерметаллидные фазы [6, 7]. Образование интерметаллидов приводит к снижению прочности и пластичности соединения. Для предотвращения такого эффекта применяют промежуточные слои (прослой), которые препятствуют формированию хрупких интерметаллидов. Однако в ряде работ описан метод применения контактной сварки титана со сталью без промежуточного слоя, при этом образующиеся фазы, включая интерметаллидные, не снижают прочность соединения.

Нанесение технического титана, в частности марки CP Titanium Grade 2 (аналог ВТ1-0), на поверхность сталей может осуществляться сваркой [6]. Прочность полученного контактной сваркой соединения достигает 440 МПа, а его качество оценивается как высокое (практически бездефектное) [10]. Однако после контактной сварки поверхность титана обладает низкой твердостью и износостойкостью.

Для улучшения физико-механических характеристик поверхности титана, соединенного со сталью, возможно использование высокотемпературного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) и последующей индукционно-термической обработки (ИТО) при высокой температуре и непродолжительной выдержке [10-12]. Метод нагрева ТВЧ характеризуется высокой скоростью нагрева. При таком нагреве не наблюдается выгорание металла, а также можно создать контролируемую атмосферу для нагреваемого изделия [13, 14]. В процессе ИТО происходит модификация поверхности титана и повышение твердости за счет образования кислородно-насыщенного приповерхностного слоя и оксидной фазы (TiO_2 , рутила) в виде покрытия [10-12]. Толщина данных функционально-градиентных структур достигает 50-100 мкм и позволяет обеспечить высокую износостойкость поверхности. Многие инструментальные стали характеризуются высокотемпературным интервалом для закалки 1100-1250 °С. После нагрева до высоких температур, выдержки и последу-

ющего охлаждения на металлической плите сталь приобретает твердость около 10 ± 1 ГПа. Поэтому применение стали 1.3343 в качестве основы изделий и для последующего формирования твердого и износостойкого титаносодержащего покрытия является перспективным и реализуемым [1].

Подготовленные образцы из быстрорежущей инструментальной стали 1.3343 (без термообработки, с содержанием С менее 1 мас.% и основных легирующих элементов: W – 5-6,5 мас.%, Мо – 8-5,3 мас.%) для контактной сварки представляли собой квадратные пластины 14×14 мм и толщиной 4,2 мм, в центре которых формировались крепежные отверстия диаметром 4,5 мм. Титановые квадратные пластины с толщиной 0,5 мм имели ширину около 15×15 мм. Полу-

ченные образцы подвергались шлифовке и очистке для снятия дефектного (нагартованного и частично окисленного) слоя с поверхности. Последующая очистка свариваемых поверхностей осуществлялась в 96 % растворе этилового спирта.

Процесс точечной контактной сварки (ТКС) состоял из нескольких этапов: конгруэнтная стыковка инструментальной стальной основы и титановой пластины (выступы с каждой стороны около $0,5 \pm 0,1$ мм) (рис. 1 а); сжатие рабочими электродами состыкованных металлических частей под давлением около 35-45 МПа; пропускание импульса электрического тока с энергией от 0,9 до 3,5 кДж (мощность не более $P = 3,5$ кВт, длительность $t_{ТКС}$ от 0,25 до 1 с); снятие усилия со сборки.

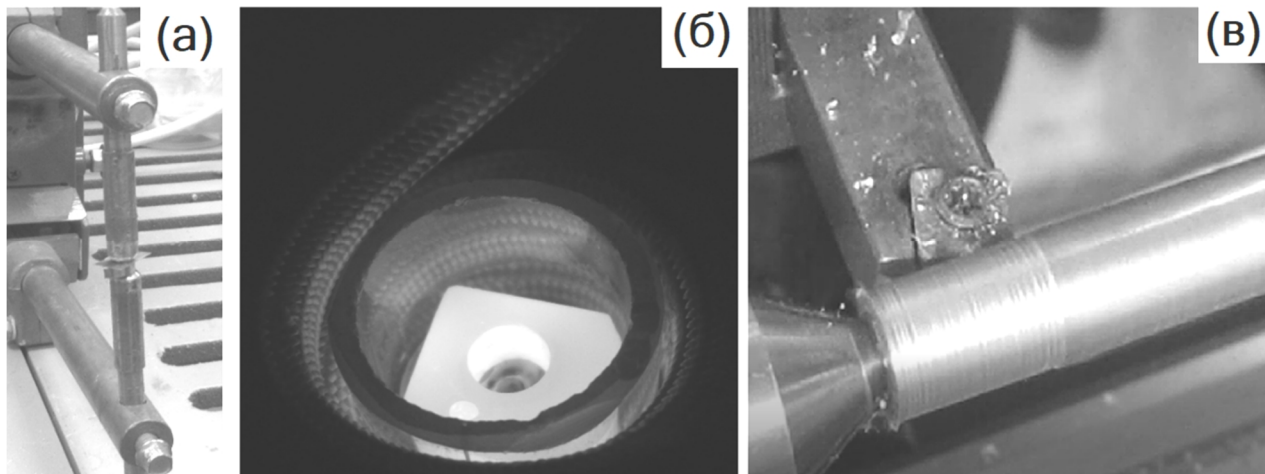


Рис. 1. Технологические этапы изготовления (а,б) и испытания (в) пластин со «сталь-титан-оксидной» структурой: а – точечная контактная сварка стальной основы СПРИ с листовым титаном; б – процесс индукционно-термической обработки; в – испытание на износостойкость СПРИ при полустатическом точении прутка конструкционной стали 45

После подготовки образцов ТКС осуществлялась двумя способами (рис. 2). В первом способе приваривалась цельная титановая пластина на рабочую поверхность стальной основы в восьми точках (на одном образце использовался один режим для 8 точек). Точки сварки располагались так, чтобы между пятнами воздействия образовывалось перекрытие в 0,5-1,0 мм. Диаметр контактной поверхности электрода был постоянным и равнялся 5,5 мм.

Второй способ нанесения титанового покрытия заключался в сегментном нанесении титановых пластин 6×6 мм на рабочую поверхность трех из четырех вершин стальной пластины единичными импульсами. Центр привариваемых пластин располагался на вершине резца со стороны главной передней поверхности. Высота образцов полученных пластин и режимы их соединения, а также полученные размеры после завершающего формообразования (шлифования) указаны в табличном виде (табл. 1).

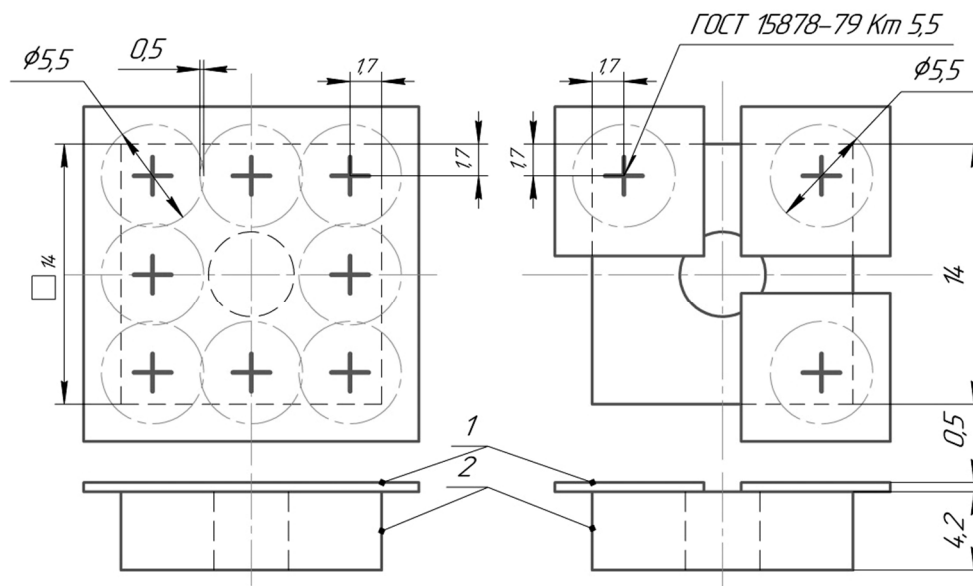


Рис. 2. Схема контактной сварки стали 1 и титана 2

Таблица 1. Параметры точечной контактной сварки и размеры образцов

Номер образца	Режимы контактной сварки			Высота, мм	
	U , В	$t_{ТКС}$, с	Количество точек, шт.	до шлифования	после шлифования
1	225	1,0	3	4,9	4,7
2	230	1,0	8	—	—
3	240	1,0	8	—	—
4	250	0,5	3	4,9	4,7
5	250	0,5	8	4,9	4,7
6	225	0,5	3	—	—
7	230	1	8	—	—
8	235	1	8	—	—
9	250	0,25	8	—	—

Толщина приваренного слоя титана до ИТО составляла 0,4 мм. Рабочая поверхность титана и боковые грани пластины подвергались шлифованию, при этом вершина резца имела радиус $r = 0,2$ мм. Некоторые образцы, подвергнутые шлифованию, разрушились. Таким образом, косвенным методом были определены режимы удовлетворительного соединения металлических частей режущей пластины. В табл. 1 указаны все применяемые режимы ТКС для стали с титаном, из которых неразрушенные оказались под номерами 1, 4 и 5.

Процесс модификации полученной сборки осуществлялся высокотемператур-

ной ИТО в открытой вертикальной трубчатой камере с кислородосодержащей (воздушной) средой с расположением изделия на тугоплавкой керамической опоре (рис. 1 б). Данная обработка проводилась с применением лабораторной установки индукционного нагрева, управление мощностью которой осуществлялось за счет изменения входного напряжения U в интервале 90-125 В.

Технологический инструмент – индуктор имел следующие размеры: внутренний диаметр $d_{инд} = 21$ мм, диаметр трубки индуктора $d_m = 6$ мм, количество витков $w = 3$. Разогрев сборки СПРИ производился при максимальном рабочем напря-

жении 125 В, далее при выдержке рабочее напряжение снижалось до необходимой величины. Для образования оксидного слоя (рутила, TiO_2) на приваренном титане применялась выдержка при $T = 1100$ -

1200 °С с продолжительностью t от 60 до 300 с. ИТО подвергались 4 образца, которые сохранили целостность после шлифования (табл. 2). Обозначение образцов соответствовало режимам ТКС.

Таблица 2. Параметры индукционно-термической обработки

№	Тип покрытия	Обозначение образцов $U_{ТКС_h}$	Температура T , °С	Длительность выдержки t , с
I	Сегментное	225_1_4.5	1100	300
II	Сплошное	250_0.5_4.5	1100	240
III	Сегментное	250_0.5_4.5	1200	60
IV	Сплошное	250_0.5_4.5	1200	60

При ИТО потребляемый ток I изменялся в диапазоне от 5,2 до 6,0 А, что соответствовало мощности процесса от 0,47 до 0,75 кВт. Охлаждение образцов после ИТО до комнатной температуры осуществлялось с умеренной скоростью, что достигалось за счет расположения образца СПРИ на массивной стальной плите. При данном типе охлаждения СПРИ функциональный титаносодержащий кислородно-насыщенный слой охлаждался на воздухе. При данном цикле обработки стальная основа закалялась по всему сечению с максимальной твердостью 84-85 HRA, что эквивалентно 66 ± 1 HRC или 8,2-8,8 ГПа.

Исследование полученных образцов проводилось путем измерения твердости поверхности методом Роквелла при нагрузке, равной 60 кгс, на алмазный сфероконический индентор (шкала HRA). Параметры структуры, в том числе морфология поверхности, и химический состав поверхности изучались с использованием растрового электронного микроскопа «Tescan MIRA II LMU» и энергодисперсионного детектора.

Испытание режущей способности, а именно максимальной глубины резания, полученных образцов слоистой системы «сталь – титан – оксид титана» выполнялось при полуставном точении (токарной обработке) прутка конструкционной углеродистой стали 45 (рис. 1 в). Использовались режимы резания, в частности скорость

и подача, согласно рекомендованным табличным значениям (ISO 3685:1993). Исходя из данного стандарта, подача составила 0,1 мм/об, количество оборотов шпинделя 350 об/мин, глубина резания и длина прохода увеличивались с каждым новым протачиванием. Первоначальная глубина резания составила 0,1 мм и с каждым новым проходом возрастала на 0,1 мм. Длина прохода резца по заготовке составила 30-35 мм. Такой подход был обусловлен определением максимальной глубины резания для полученной слоистой системы «сталь-титан-оксид».

Образцы № 1, 4, 6, изготовленные методом приваривания пластин по углам стальной основы, подвергались шлифованию титановой поверхности и выступающих фрагментов до задней поверхности СПРИ. На образцах № 1 и 6 после механической обработки некоторые титановые фрагменты отделились. На образце № 3 поверхность титана была сильно повреждена, далее в процессе механообработки покрытие расслоилось и разрушилось. Поверхность образца № 4 была однородной без заметных повреждений. В процессе механической обработки титановое покрытие осталось на стали без расслоений и повреждений.

Образцы № 2, 3, 5, 7, 8, 9 подверглись контактной сварке по первому способу путем приваривания целой пластины. В процессе последующей обработки образцов

№ 2, 7, 8, 9 титановый слой полностью или частично отделился от стальной поверхности. В случае образца № 5 поверхность титана после сварки имела большую деформацию, однако в процессе шлифовки титан остался на поверхности стали. Таким образом, к последующей ИТО были пригодны образцы, полученные при следующих режимах № 1, 4, 5: $U = 225$ В; $t = 1$ с; $U = 250$ В; $t = 0,5$ с (с отдельными пластинами титана); $U = 250$ В; $t = 0,5$ с (с цельной пластиной титана).

Образец I, представлявший собой стальную основу с отдельными титановыми пластинами, после ИТО не деформировался. Образец II со сплошным титановым покрытием после охлаждения раскололся с отслоением от стальной основы. Образец III с покрытием идентичным образцу I после ИТО остался целым и сохранил геометрические параметры. На поверхности титана образовался слой коричневого оттенка. Образец IV со сплошным покрытием титана после ИТО не разрушился, однако в точках контактной сварки образовались кратеры темного цвета. Таким образом, рабочая плоскость поверхности титана была деформирована.

Полученные результаты измерения твердости для стальной основы и титанового слоя после ИТО статистически обработаны и представлены в табличном виде (табл. 3).

Таблица 3. Твердость поверхности «сталь-титан-оксидных» образцов

№	Твердость, ГПа	
	Стальная основа СПРИ	Титаносодержащее покрытие
I	$3,8 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
II	$5,1 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
III	$6,0 \pm 0,3$	$15,5 \pm 0,5$
IV	$4,9 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,2$

При температуре выдержки $T = 1100$ °С и продолжительности $t = 300$ с сталь характеризовалась минимальной твердостью по сравнению с другими режимами, при этом

твердость титаносодержащего слоя была сравнима с твердостью стали. Данный режим не позволил улучшить работоспособность СПРИ за счет нанесения титанового покрытия. При обработке слоистой системы со сплошным покрытием титана при $T = 1100$ °С и $t = 240$ с произошло отслоение титана от стали (в одной из точек сварки остался титановый фрагмент на поверхности стали). Данный режим обработки не обеспечил достаточной прочности соединения титана со сталью. При сварке с увеличением количества импульсов в сварном соединении образовались хрупкие интерметаллидные соединения, приводящие к отслоению покрытия. При единичном импульсе количество образованных интерметаллидных соединений было недостаточно для снижения прочности сварного соединения между титаном и сталью. Для образца III применялся режим с выдержкой при $T = 1200$ °С и $t = 60$ с, который обеспечил получение наилучших результатов по твердости функционального титаносодержащего слоя, которая составила $15,5 \pm 0,5$ ГПа. При таком режиме наблюдалось умеренное окисление и упрочнение основы СПРИ из стали марки 1.3343 (HSS). При данной длительности выдержки кислород внедрился в приповерхностный слой титана на достаточную глубину для образования устойчивой к механическим воздействиям структуры оксидного слоя и α' -Ti (мартенсит) с высокой твердостью. При этом полученная толстая окалина (около 20-30 мкм) самопроизвольно скалывалась, а отслоения титановых сегментов от стальной основы не наблюдалось. Такой метод обеспечил отсутствие высоких остаточных напряжений в титаносодержащем покрытии. В то же время поверхность каждой пластины перед сваркой не подвергалась нагреву, вследствие чего контактная поверхность титана не нагревалась до высоких температур и не поглощала из атмосферы газы, приводящие к разупрочнению структуры. Образец IV со слоистой системой «сталь-титан-оксид» сплошного типа имел меньшую твердость по сравнению с образцом III. Подобный результат получен при большей длительности импульсов, ко-

торая при последующей термообработке привела к искажению поверхности титана, в частности к образованию пустот и кратеров в центрах точек сварки.

В процессе ИТО поверхность титана насыщалась кислородом, что, вероятно,

привело к образованию высокотвердого и износостойкого покрытия оксида титана (TiO_2 , фаза рутила). Химический состав покрытия у образца III с наибольшей твердостью был представлен титаном и кислородом, а также примесями (рис. 3, табл. 4).

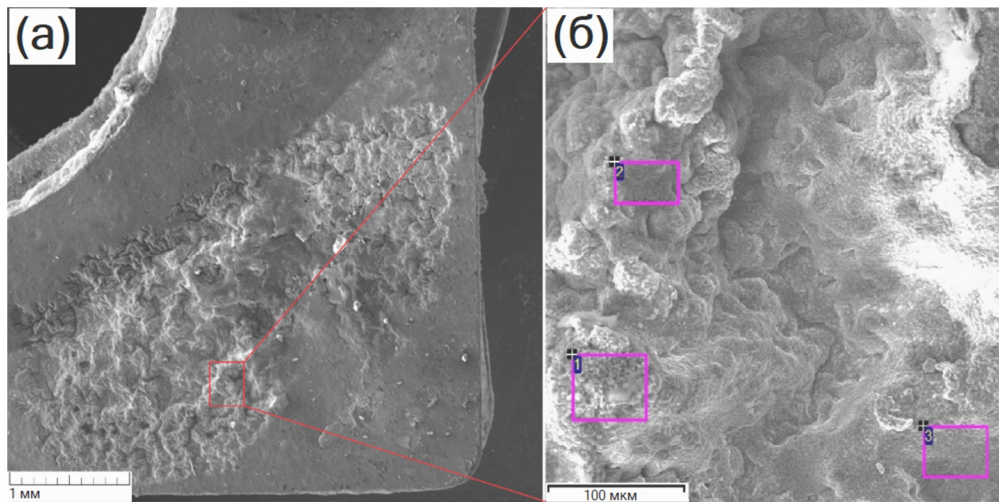


Рис. 3. Морфология поверхности окисленного титанового покрытия и участки исследования химического состава:

а – общий вид рабочей поверхности одной из вершин резца; б – морфология поверхности (прямоугольниками показаны участки для анализа химического состава)

Таблица 4. Химический состав поверхности титана, вес. %

Спектр	[C]*	[O]	[Ti]	[V]	[Fe]
1	1,31	36,90	60,03	0,74	1,02
2	1,58	24,36	71,77	1,20	1,09
3	0,92	34,80	63,71	0,00	0,56
Среднее значение	$1,27 \pm 0,27$	$32,02 \pm 5,48$	$65,17 \pm 0,49$	$0,65 \pm 0,5$	$0,89 \pm 0,24$

* – значение завышено, что связано с особенностями данного метода определения элементного состава материалов; содержание углерода в данной стали не превышает 0,9-1 вес. %

Наличие на поверхности покрытия железа и углерода обусловлено высокотемпературным нагревом стальной основы и массопереносом ее фрагментов в покрытие. Анализ данных морфологии титановой поверхности после ИТО показал ее частичное порообразование. Так как на вершине режущей части не наблюдалось изменения морфологии поверхности, было принято решение об использовании данного образца СПРИ в эксплуатационных испытаниях на режущую способность.

Анализ работоспособности СПРИ со «сталь-титан-оксидной» системой осуществлялся при токарной обработке стали 45 до критической величины износа, а именно прекращения съема металла с заготовки. При глубине резания 0,9 мм рабочая часть резца утратила режущие грани и была частично разрушена. Максимально допустимая глубина резания для нового типа СПРИ с титаносодержащим покрытием составила 0,8 мм, что больше глубины резания (0,2-0,5 мм) для

СПРИ, изготовленной из закаленной стали 1.3343 (HSS) без покрытия.

Таким образом, предлагаемый метод получения слоистой «сталь-титан-оксидной» системы с высокотвердой поверхностью заключался в применении точечной контактной сварки для соединения стальной основы с тонколистовым титаном. Оптимальный режим соединения характеризовался входным напряжением $U = 250$ В и длительностью импульса $t = 0,5$ с. В исследовании также показано, что для последующей модификации слоистой системы титановое покрытие необходимо наносить фрагментами на стальную основу на вершины СПРИ. При использовании сплошной титановой пластины последовательные импульсы контактной сварки оказывают температурное влияние на всю площадь свариваемых деталей, что снижает качество самого соединения. Такой подход ухудшил свариваемость разнородных материалов и привел к возникновению высоких напряжений в титановом покрытии после ИТО. В результате происходило отслоение и формирование трещин по всему сечению покрытия. Большая длительность импульса при напряжении $U = 250$ В привела к вскрытию дефектов (пустот и кратеров) титанового слоя при последующей высокотемпературной модификации.

В результате исследования процесса воздействия ИТО на сталь-титановую систему СПРИ было определено, что продолжительное воздействие при выдержке приводит к чрезмерному окислению и снижению твердости. При выдержке $t = 60$ с и температуре $T = 1200$ °С образовался наиболее твердый (около $15,5 \pm 0,5$ ГПа) и устойчивый к механическим воздействиям износостойкий слой. Исходя из результатов химического анализа, на поверхности технического титана сформировалось титаносодержащее оксидное покрытие. Анализ работоспособности СПРИ в условиях резания показал, что инструмент с пластинами нового типа может использоваться для обработки углеродистой стали 45 при повышенных режимах резания, а именно глубины резания, по сравнению с закаленной инструментальной сталью 1.3343 (HSS) без покрытия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ (СП-571.2019.1). Часть работ, связанная с оптическим анализом морфологии поверхности образцов, проведена при поддержке программы «У.М.Н.И.К.» (15686ГУ/2020).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гурченко П.С., Солонович А.А. Перспективы применения углеродистых сталей для подшипников и шестерен с упрочнением управляемой объемно-поверхностной закалкой с индукционного нагрева // Литье и металлургия. 2015. № 1 (78). С. 91-97.

2. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. 2-е изд., перераб. и доп. Москва – Ленинград: Энергия, 1965. 552 с.

3. Influence of vanadium filler on the properties of titanium and steel tig welded joints / Q. Chu, M. Zhang, J. Li, C. Yan, Z. Qin // Journal of Materials Science & Technology. 2017. Т. 1. № 240. С. 293-304.

3. Влияние силы тока индуктора на температуру нагрева титановых изделий дисковой и цилиндрической формы / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1. С. 53-58.

4. Сверхтвердые оксидные покрытия, получаемые на титане при обработке токами высокой частоты / А.А. Фомин, М.А. Фомина, И.В. Родионов и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 18. С. 89-95.

5. Сверхтвердые оксидные покрытия и особенности их получения на титане обработкой токами высокой частоты / А.Ю. Щелкунов, И.С. Егоров, М.А. Фомина и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. Т. 16. № 3. С. 60-65

6. Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy / D. Ren, Y. Jiang, X. Hu et al. // Intermetallics. 2021. Т. 132. № 107115.

7. **Li J., Vivek A., Daehn G.** Improved properties and thermal stability of a titanium-stainless steel solid-state weld with a niobium interlayer // Journal of Materials Science & Technology. 2021. № 79. С. 191-204.

8. Improving wear resistance of fast-cutting steel P6M5 after a volume pulse laser strength / I.A. Pinakhin, V.A. Chernigovskij, A.A. Bratsikhin et al. // Journal of friction and wear. 2019. Т. 40. № 3. С. 239-243.

9. **Bugakov V.I., Laptev A.I.** Manufacture of drill bits from new diamond materials at high pressures and temperatures // Steel in Translation. 2017. Т. 47. № 1. С. 12-16.

10. Composite «1.2361 tool steel – Ti – TiO₂» structure and its production by resistance welding with subsequent induction heat treatment / A. Fomin, I. Egorov, A. Shchekunov et al. // Composite Structures. 2018. Т. 208. С. 467-473.

11. Structure of «Chromium steel-base – Ti-coating» and its production by the contact welding / I. Egorov, A. Shchekunov, A. Fomin, I. Rodionov // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Т. 1124. 081015.

12. Влияние процесса окисления и модификации поверхности при обработке токами высокой частоты на кинетику нагрева титана / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1. С. 73-82.

13. **Мамаева Д., Зинин Ю., Ройзман Ю.** Индукционные установки ТВЧ для поверхностной закалки крупномодульных зубчатых колес // Силовая электроника. 2018. Т. 6. № 75. С. 41-45.

14. **Горбунов А. С.** Влияние частоты тока при индукционном нагреве внешних цилиндрических поверхностей на эффективность процесса нагрева // Научно-практические исследования. 2020. № 1-2 (24). С. 30-32.

Егоров Иван Святославович – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan S. Egorov – Postgraduate, Teaching Assistant, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander A. Fomin – Dr. Sc., Head Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 16.01.22, принята к опубликованию 22.02.22

УДК 621.313.17:621.928.1

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКТОРОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев, Д.Н. Багин, А.О. Ильинская

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF EDDY-CURRENT SEPARATION PLANTS BASED ON LINEAR INDUCTORS AT THE DESIGN STAGE

A.Yu. Konyaev, M.E. Zyazev, D.N. Bagin, A.O. Ilyinskaya

В статье рассматриваются электродинамические сепараторы на основе линейных индукторов. Такие сепараторы используются при извлечении включений цветных металлов из твердых сыпучих смесей и при сортировке лома цветных металлов. Показано, что при проектировании сепараторов необходимо учитывать критерии работоспособности и энергоэффективности. Получены аналитические выражения для расчета активной, реактивной и полной мощностей, потребляемых индуктором из электрической сети. Результаты расчетов мощности хорошо согласуются с данными, полученными в результате испытаний опытной установки. Приведены примеры выбора главных размеров линейных индукторов с учетом критериев работоспособности и энергоэффективности сепараторов.

Ключевые слова: сбор и обработка лома цветных металлов, электродинамическая сепарация, критерии работоспособности и энергоэффективности, выбор главных размеров

Введение

Одним из путей повышения энергоэффективности предприятий вторичной цветной металлургии является совершенствование процессов подготовки сырья [1-3]. Сортировка лома цветных металлов при подготовке его к металлургическому переделу способствует улучшению качества выплав-

The article deals with eddy-current separators based on linear inductors. Such separators are used in extraction of non-ferrous metal inclusions from solid bulk mixtures and in sorting non-ferrous scrap metals. It is shown that when designing separators, it is necessary to take into account the criteria for operability and energy efficiency. Analytical expressions are obtained for calculation of active, reactive and apparent power consumed by the inductor from the power grid. The results of power calculations are in good agreement with the data obtained as a result of the tests of the pilot plant. Examples of the choice of the main dimensions of linear inductors are given, taking into account the criteria for operability and energy efficiency of separators.

Keywords: collection and processing of non-ferrous scrap metals, eddy-current separation, operability and energy efficiency criteria, selection of main dimensions

ляемых из вторичного сырья сплавов и уменьшению потерь легирующих добавок. При этом уменьшается количество переделов и длительность металлургических процессов, обеспечивается снижение их энергоемкости. Очистка металлолома от неметаллических фракций позволяет уменьшить выбросы в атмосферу загрязняющих ве-

ществ. Одним из эффективных видов технологического оборудования, применяемого при решении указанных задач, являются установки электродинамической сепарации (по принятой за рубежом терминологии: eddy-current separators – вихретоковые сепараторы) [3-7]. Работа электродинамических сепараторов основана на взаимодействии переменных магнитных полей с вихревыми токами, наведенными этими полями в кусках металла. Сепараторы различаются по виду и способу возбуждения магнитного поля: пульсирующее, вращающееся, бегущее, импульсное. Наибольшее распространение получили электродинамические сепараторы с бегущим (вращающимся) магнитным полем на основе вращающихся индукторов с постоянными магнитами, схематично показанные на рис. 1, и сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов (рис. 2 и 3).

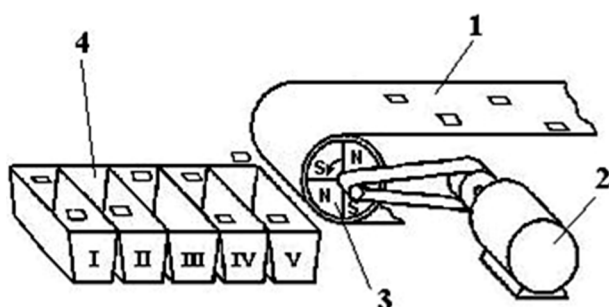


Рис. 1. Схема сепаратора на основе вращающегося индуктора с постоянными магнитами: 1 – лента конвейера; 2 – приводной электродвигатель; 3 – индуктор; 4 – приемники сортируемых металлов

В сепараторах первого типа вращающийся индуктор чаще всего встраивается в шкив конвейера и приводится во вращение собственным приводным двигателем. Достоинствами таких сепараторов являются отсутствие энергопотребления на возбуждение магнитного поля и возможность получения повышенных частот поля. В то же время для работы этих сепараторов требуется подача материалов монослоем в виде разреженного потока, что ограничивает производительность установок.

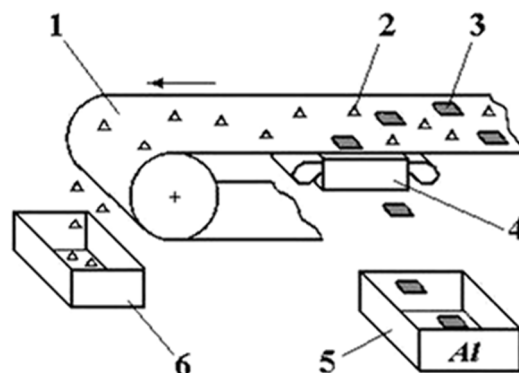


Рис. 2. Сепаратор с односторонним линейным индуктором, установленным под лентой конвейера: 1 – лента конвейера; 2 – частицы неметаллов; 3 – металлические частицы; 4 – линейный индуктор; 5 и 6 – приемники сортируемых материалов

Большую производительность обеспечивают электродинамические сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов. Они имеют более простую конструкцию и легко вписываются в готовые технологические линии. Показанный на рис. 2 сепаратор с односторонним линейным индуктором при подаче материалов по ленте конвейера применяется чаще всего для отделения металлов от неметаллических фракций. Для сортировки цветных металлов и сплавов целесообразны сепараторы с подачей материалов по наклонной плоскости (рис. 3). Как правило, на механизированную сортировку поступают фракции дробленого металлолома с крупностью частиц до 60-65 мм. При этом возможно использование двустороннего линейного индуктора.

При большой производительности установок трехфазные линейные индукторы таких сепараторов характеризуются большими габаритами и большой электрической мощностью, потребляемой из сети. Поэтому при разработке сепараторов необходимо оценивать возможности снижения энергопотребления. В данной статье обобщается опыт проектирования электродинамических сепараторов, накопленный в Уральском федеральном университете при выполнении заказов ряда предприятий, занимающихся переработкой многокомпонентных металлосодержащих отходов, и предприятий вторичной цветной металлургии.

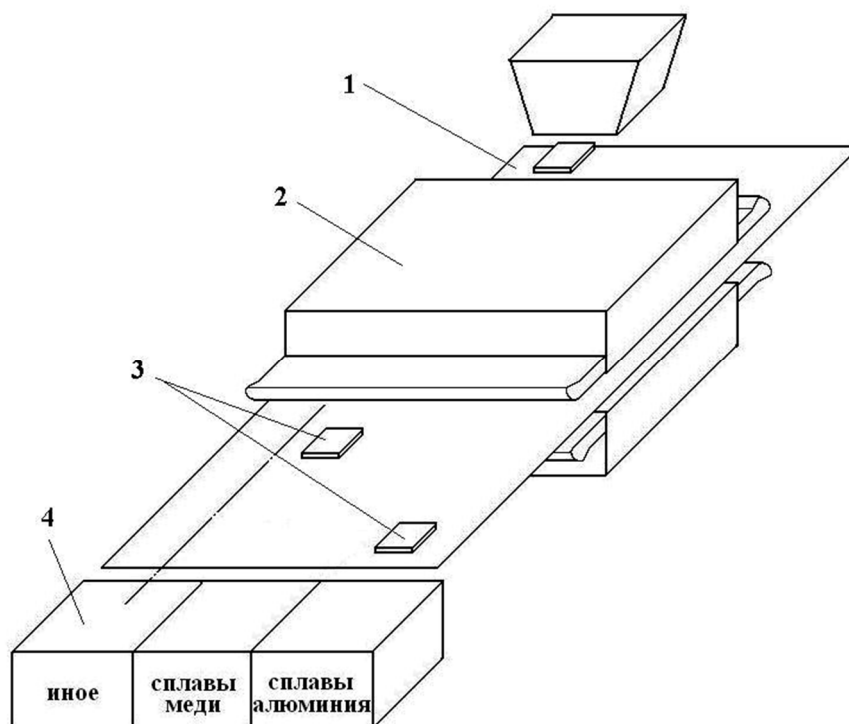


Рис. 3. Сепаратор с двухсторонним линейным индуктором при подаче металлов по наклонной плоскости на: 1 – плоскость подачи; 2 – индуктор; 3 – частицы сортируемых металлов; 4 – приемники

Методика и результаты исследований

Работоспособность сепараторов на стадии проектирования целесообразно оценивать по величине удельного электромагнитного усилия, равного отношению электромагнитного усилия, действующего на извлекаемую металлическую частицу, к её массе ($F_m = F_{эм}/m$, Н/кг или м/с²). Для расчета электромагнитных усилий на этой стадии можно использовать методику, разработанную в Уральском федеральном университете [8]. Методика позволяет рассчитывать усилия до детальной конструктивной проработки индуктора. Задаются только свойства извлекаемых частиц (размеры $a \times b \times d$, удельная электропроводность γ), частота сети f , полюсное деление τ и токовая нагрузка индуктора, определяющая тепловое состояние индуктора. В расчетной модели, использованной в [8], токовая нагрузка индуктора представлена амплитудой линейной плотности тока J_{1m} . Как показывает опыт создания сепараторов, допустимая величина линейной плотности тока зави-

сит от габаритов и интенсивности охлаждения индукторов и при принудительной вентиляции может составлять $J_{1m} = 70-110$ кА/м.

Для оценки энергоэффективности сепараторов можно использовать комплексные показатели: отношение удельного электромагнитного усилия к полной потребляемой мощности ($F_{mS} = F_m/S$, Н/(кг·кВА)), предложенный ранее в [9], или отношение удельного электромагнитного усилия к активной мощности индуктора ($F_{mP} = F_m/P$, Н/(кг·кВт)). При этом основная трудность заключается в определении величин P и S на предварительной стадии проектирования. Рассмотрим возможность их определения с учетом особенностей конструкции электродинамических сепараторов.

Как уже отмечалось, линейная индукционная машина (ЛИМ), составляющая основу электродинамического сепаратора, работает по принципу асинхронного электродвигателя. Поэтому преобразования энергии в такой ЛИМ можно представить с помощью схемы замещения, показанной на рис. 4.

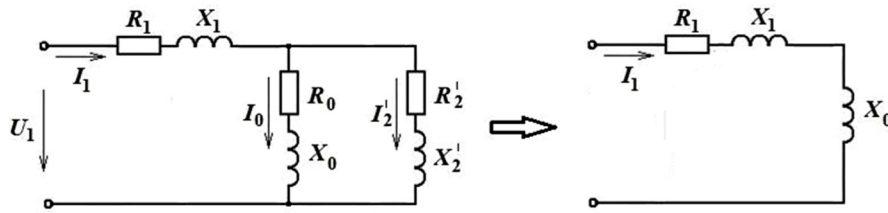


Рис. 4. Полная и упрощенная схемы замещения линейной индукционной машины сепаратора

Особенностью ЛИМ электродинамического сепаратора является то, что роль вторичного элемента в ней выполняют частицы сепарируемых металлов, размеры которых, как правило, меньше размеров полюсного деления индуктора. Как показывают экспериментальные исследования, вносимая таким вторичным элементом мощность пренебрежимо мала. Например, в одном из экспериментов изменение потребляемой мощности при внесении в активную зону одностороннего двухполюсного индуктора алюминиевых пластин разных размеров оценивалось при исследовании ЛИМ с полюсным делением $\tau = 66$ мм и площадью активной поверхности 132×150 мм. Активная мощность P , потребляемая индуктором, не изменялась даже при полном перекрытии алюминием активной зоны при зазоре $\delta = 0$ мм. Полная потребляемая из сети мощность S при полном перекрытии индуктора увеличивалась на 6,1 %, а при внесении алюминиевой пластины с размерами 50×100 мм – на 1,2 % (измерения проводились с помощью компактного трехфазного цифрового прибора РМ130ЕН PLUS). Очевидно, что с увеличением размеров индукторов и при дальнейшем уменьшении размеров вторичного элемента доля вносимой мощности будет еще меньше.

С учетом сказанного можно упростить схему замещения ЛИМ, не учитывая параметры R_2' и X_2' . Для упрощенной схемы замещения нетрудно записать выражения для активной P_1 и реактивной Q_1 мощностей, потребляемых ЛИМ сепаратора:

$$P_1 = 3 \cdot I_1^2 \cdot (R_1 + R_0), \quad (1)$$

$$Q_1 = 3 \cdot I_1^2 \cdot (X_1 + X_0), \quad (2)$$

Отметим, что активная мощность ЛИМ сепаратора практически равна потерям

в обмотке индуктора, поскольку из-за больших немагнитных зазоров магнитная индукция и потери в стали относительно малы (на частоте $f = 50$ Гц $R_0 \ll R_1$). Такие потери нужно учитывать только при питании ЛИМ сепаратора от источника повышенной частоты.

Входящий в выражения (1)-(2) ток I_1 на стадии поисковых расчетов неизвестен, поэтому целесообразно выразить его через амплитуду линейной плотности тока J_{1m} , которая может быть задано предварительно и использовалась при оценке электромагнитного усилия:

$$I_1 = \frac{J_{1m} \cdot t_z}{\sqrt{2} \cdot k_w \cdot u_n}, \quad (3)$$

где t_z – длина зубцового деления индуктора; k_w – обмоточный коэффициент; u_n – число витков в пазу.

Активное и реактивные сопротивления фазы обмотки (R_1 , X_1 и X_0) определяются известными из практики проектирования асинхронных двигателей выражениями [10]:

$$R_1 = k_\theta \cdot \frac{\rho \cdot w_1 \cdot l_{cp}}{s_{np}}, \quad (4)$$

$$X_1 = 4 \pi \mu_0 f w_1^2 \frac{L_u}{pq} \sum \lambda, \quad (5)$$

$$X_0 = \frac{4 \mu_0 L_u \tau m f (w_1 k_w)^2}{k_\mu \delta_\varphi p}, \quad (6)$$

где k_θ – температурный коэффициент сопротивления; ρ – удельное электрическое сопротивление медного провода; w_1 – число последовательно соединенных витков фазы обмотки; s_{np} – сечение эффективного проводника катушки; l_{cp} – средняя длина витка катушки; L_u – ширина активной зоны ин-

дуктора; p – число пар полюсов; q – число пазов на полюс и фазу; τ – полюсное деление; m – число фаз обмотки; k_w – обмоточный коэффициент; $\delta_s = k_s \delta$ – эквивалентный немагнитный зазор; k_μ – коэффициент, учитывающий насыщение магнитопровода; $\Sigma\lambda = \lambda_n + \lambda_l + \lambda_d$ – коэффициенты проводимости рассеяния: пазового, лобового, дифференциального (при больших технологических зазорах дифференциальным рассеянием можно пренебречь).

Подставляя (3)–(5) в (1), (2), после преобразований получаем

$$P_1 = 0,5 \cdot k_\theta \cdot \rho \cdot J_{1m}^2 \cdot \frac{l_u \cdot t_z \cdot (L_u + k_{\text{лоб}} \cdot \tau)}{k_3 \cdot k_w^2 \cdot h_n \cdot b_n}, \quad (7)$$

$$Q_1 = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot J_{1m}^2 \cdot \frac{f \cdot l_u \cdot L_u}{k_w^2} \cdot \left(10 t_z \frac{h_n}{3 b_n} + 3,4 \frac{\tau^2}{m \cdot L_u} + \frac{k_w^2 \cdot \tau^2 \cdot N}{k_\mu \cdot \delta_s} \right) \cdot N, \quad (8)$$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}, \quad (9)$$

где $l_u = 2p\tau$ – длина активной зоны индуктора; b_n и h_n – ширина и глубина паза; J_{1m} – амплитуда линейной плотности тока одного индуктора; $k_{\text{лоб}}$ – коэффициент, определяющий длину лобовой части катушки обмотки; k_3 – коэффициент заполнения паза медью; коэффициент N принимает значение 1 или 2 соответственно при одностороннем или двухстороннем возбуждении индуктора; коэффициент 3,4 перед вторым слагаемым в скобках соответствует двухслойной обмотке, при однослойной – следует подставлять 6,7.

Важно отметить, что все величины, входящие в выражения (7)–(9), могут быть заданы на стадии проектирования, что позволяет оценивать составляющие мощности ЛИМ при поисковых расчетах электродинамических сепараторов.

Возможность использования выражений, полученных для расчета мощности, проверялась на примере расчета опытно-промышленной установки КМ-203М, разработанной в Уральском федеральном университете в содружестве с ОАО «Уралэнерго-

цветмет» и предназначенной для извлечения цветных металлов из потока твердых коммунальных отходов [6]. При заводских испытаниях сепаратора были определены полная потребляемая из сети мощность ($S_1 = 111$ кВА) и активная мощность ($P_1 = 6,5$ кВт). При расчете мощностей при амплитуде линейной плотности тока $J_{1m} = 110$ кА/м, соответствующей экспериментальным значениям токов ЛИМ, полученные мощности $S_1 = 108,1$ кВА и $P_1 = 6,3$ кВт.

Таким образом, уже на стадии предпроектных исследований появляется возможность выбора главных размеров ЛИМ сепаратора с учетом критериев работоспособности и энергоэффективности. Например, на рис. 5 представлены зависимости показателей F_m и F_{ms} от величины полюсного деления τ . Расчеты выполнены для условий, соответствующих техническому заданию на проектирование установки КМ-203М (одностороннее исполнение индуктора, как на рис. 2; ширина ленты конвейера $B_k = 1200$ мм; удаление частиц металла от поверхности индуктора при нахождении их на поверхности слоя отходов $h = 50$ мм). Удельные электромагнитные усилия рассчитаны для алюминиевых частиц с размерами $40 \times 40 \times 3$ мм.

Как видно на рис. 5, в рассмотренном диапазоне полюсных делений удельное электромагнитное усилие F_m монотонно растет, а комплексный показатель F_{ms} имеет явно выраженный экстремум, соответствующий $\tau = 186$ мм. Такое полюсное деление, соответствующее минимуму потребляемой мощности при электромагнитном усилии, близком к максимальному, было рекомендовано при проектировании индуктора установки КМ-203М. Можно отметить, что благодаря оптимизации главных размеров с учетом указанного критерия энергоэффективности удалось на 40 % снизить мощность сепаратора по сравнению с прототипом КМ-203, разработанным ранее в АО «НИКТИСтройкоммаш» (г. Санкт-Петербург) [11], индукторы для которого проектировались и изготавливались Особым конструкторским бюро линейных электродвигателей (г. Киев).

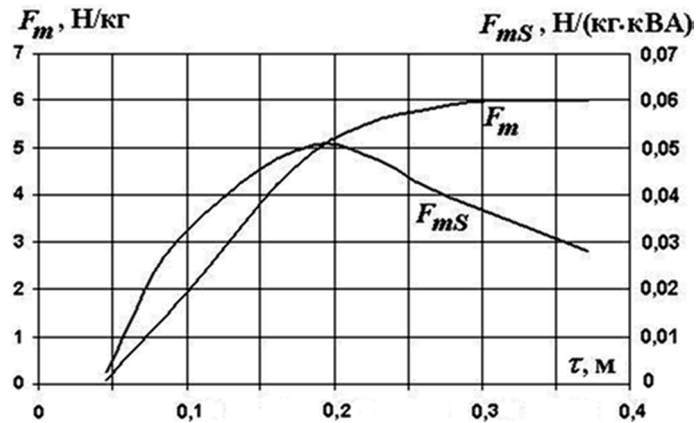


Рис. 5. К выбору полюсного деления одностороннего линейного индуктора при учете полной мощности, потребляемой сепаратором

Одной из особенностей рассматриваемых сепараторов является низкий коэффициент мощности (при одностороннем возбуждении $\cos \varphi < 0,2$), поэтому необходимы меры по его повышению. В случае компенсации реактивной мощности для оценки

энергоэффективности сепаратора целесообразно вместо комплексного показателя F_{mS} использовать показатель F_{mP} . Зависимости показателей F_m и F_{mP} от полюсного деления τ для тех же условий, что и на рис. 5, представлены на рис. 6.

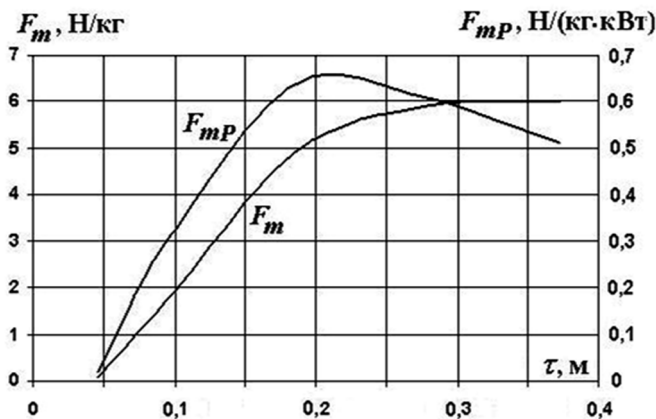


Рис. 6. К выбору полюсного деления одностороннего линейного индуктора при учете только активной мощности

Как видно на рис. 6, экстремум комплексного показателя F_{mP} сместился в сторону больших τ по сравнению с рис. 5. С учетом того, что при увеличении τ возрастает удельное электромагнитное усилие, можно рекомендовать в случае создания сепаратора с компенсацией реактивной мощности корректировку полюсного деления до значения 232,5 мм.

В ряде случаев при обработке металлодержащих отходов (электронный, кабельный лом и т.п.) выполняется их дробление с целью раскрытия материалов (например, отделения изоляции от металла). При малой

крупности частиц для обработки отходов можно применять сепараторы с двухсторонними линейными индукторами, подобные показанным на рис. 3. При размерах частиц менее 10 мм рабочий зазор между сторонами индуктора может составлять 12 мм. Оценки показателей работоспособности и энергоэффективности для сепаратора с размерами активной зоны 528×150 мм, предназначенного для обработки электротехнического и электронного лома, представлены на рис. 7 и 8. Расчеты удельных электромагнитных усилий выполнены для алюминиевых частиц с размерами 5×5×2 мм.

Из сравнения зависимостей показателей F_{mS} и F_{mP} от полюсного деления τ на рис. 7 и 8 можно отметить их противоположный характер. При оценке энергоэффективности сепаратора по полной потребляемой из сети мощности S (при отсутствии компенсации реактивной мощности) достижение требуемых для сепарации удельных электромагнитных усилий F_m при увеличении τ будет сопровождаться существенным ростом полной мощности. В то же время рост по-

казателя F_{mP} на рис. 8 при увеличении τ свидетельствует о том, что электромагнитное усилие увеличивается быстрее, чем активная мощность P .

С учетом сказанного в рассматриваемом случае рекомендуется предусмотреть при создании электродинамического сепаратора компенсацию реактивной мощности индуктора и выбирать величину его полюсного деления по достижению требуемого уровня удельного электромагнитного усилия F_m .

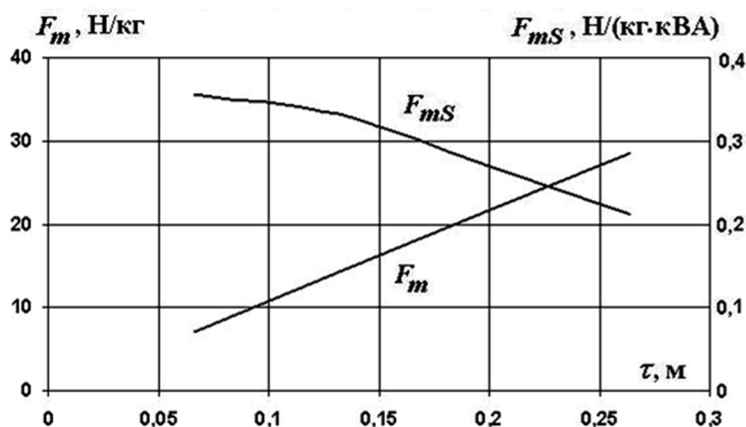


Рис. 7. К выбору полюсного деления двустороннего линейного индуктора при учете полной мощности, потребляемой сепаратором

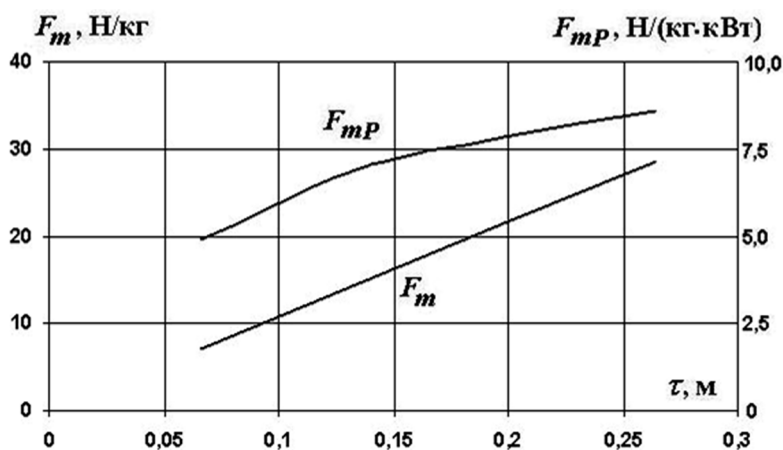


Рис. 8. К выбору полюсного деления двустороннего линейного индуктора при учете только активной мощности

Выводы

1. Предложена и апробирована методика выбора главных размеров линейных индукторов, составляющих основу электродинамических сепараторов, с учетом показателей работоспособности и энергоэффективности.
2. Показано, что компенсацию реактивной мощности сепараторов следует

предусматривать уже на начальной стадии проектирования сепараторов, поскольку оценки энергоэффективности сепаратора при выборе главных размеров линейного индуктора с учетом минимизации полной потребляемой мощности и только активной мощности существенно различаются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кошарная Ю.В.** Повышение энергоэффективности и обеспечение экологической безопасности – основные направления деятельности энергетических служб предприятий металлургической промышленности // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 2-5.
2. **Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М.** Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. Москва: Металлургия, 1993. 288 с.
3. **Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л.** Применение электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 22-25.
4. **Wilson R.J., Veasey T.J., Squires D.M.** Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes // Minerals Engineering. 1994. № 7. P. 975-984.
5. Aluminum recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators / S. Zhang, E. Forssberg, B. Arvidson, W. Moss // Resources, Conservation and Recycling. 1998. № 23. P. 225-241.
6. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, Т.Н. Дерендяева и др. // Промышленная энергетика. 2001. № 6. С. 16-19.
7. **Володин Г.И.** Металлоуловитель цветных металлов на основе двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Электромеханика. 1999. № 4. С. 16-18.
8. **Коняев А.Ю., Назаров С.Л.** Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели // Электротехника. 1998. № 5. С. 52-57.
9. **Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л.** Повышение энергоэффективности электродинамических сепараторов на стадии проектирования // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 22-26.
10. **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / под ред. И.П. Копылова; 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Юрайт, 2019. 828 с.
11. **Кузнецов В.Л., Крапильская Н.М., Юдина Л.Ф.** Экологические проблемы твердых бытовых отходов (сбор, ликвидация, утилизация). Москва: ИПЦ МИКХиС, 2005. 53 с.

Коняев Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Зязев Михаил Евгеньевич – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Багин Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Ильинская Анастасия Олеговна – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Andrey Yu. Konyaev – Dr.Sc., Professor, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Mikhail E. Zyazev – Postgraduate, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Dmitry N. Bagin – Ph.D., Associate Professor, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Anastasia O. Ilyinskaya – Master Student, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Статья поступила в редакцию 10.02.22, принята к опубликованию 23.02.22

УДК 621.37, 621.365

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ МОДИФИКАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАМЕРЕ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ МЕАНДРОВОГО ТИПА

П.О. Трухин, Е.Ю. Васинкина, С.Г. Калганова, Ю.А. Кадыкова

MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE MODIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN A CHAMBER WITH MEANDER TYPE TRAVELING WAVE

P.O. Trukhin, E.Yu. Vasinkina, S.G. Kalganova, Yu.A. Kadykova

Предложена схема СВЧ камеры с бегущей волной меандрового типа с пирамидальными рупорами, позволяющая достичь равномерности обработки композиционного материала на частоте 433 МГц. Получены результаты математического моделирования процесса нетепловой модификации композиционного материала в виде графика распределения напряженности E электрического поля электромагнитной волны по толщине диэлектрика.

Ключевые слова: СВЧ нетепловая модификация, электрическое поле, СВЧ электромагнитная волна, композиционный материал, метод конечных элементов, камера с бегущей волной меандрового типа

Введение

Сверхвысокочастотное электромагнитное поле (СВЧ ЭМП) как источник энергии для термообработки диэлектрических материалов и изделий широко используется со второй половины XX века. В последнее десятилетие наблюдается активный интерес к применению СВЧ технологий для модификации диэлектриков, в частности композиционных материалов на основе полимерных связующих [1]. Это связано с такими преимуществами СВЧ обработки по сравнению с другими методами, как уменьшение времени обработки, повышение равномерности обработки объекта, улучшение его функциональных свойств.

A scheme of the microwave chamber with the meander type traveling wave provided with pyramidal horns is proposed, which allows to achieve uniformity of processing composite materials at the frequency of 433 MHz. The results of mathematical modeling of non-thermal modification of a composite material in the form of intensity distribution graph E in the electric field of an electromagnetic wave over dielectric thickness have been obtained.

Keywords: microwave non-thermal modification, electric field, microwave electromagnetic wave, composite material, finite element method, meander-type traveling wave chamber

Целью данной работы является определение оптимальной СВЧ рабочей камеры для равномерной модификации композиционного материала на основе полимерного связующего. В качестве инструмента использовался метод математического моделирования в программной среде Comsol Multiphysics, который основан на применении метода конечных элементов. С помощью данного метода решаются связанные технические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями [2, 3].

СВЧ камеры с бегущей волной (КБВ) могут состоять из отрезков линий передач различных сечений. В данных камерах при

Граничное условие (2) предполагает, что протекание токов сосредоточенно на поверхности волновода за счет скин-эффекта, т. к. волновод намного толще скин-слоя, это позволяет избежать численного решения уравнений Максвелла внутри любых металлических частей. Граничные условия (3), (4) позволяют задавать величину падающей волны в единицах мощности, определять границы моделирования, а также рассчитывать S-параметры прохождения и отражения электромагнитной волны [2, 3].

В результате математического моделирования СВЧ модификации неоднородного композиционного материала на основе полимерного связующего прямоугольной формы получили распределение напряженности E электрического поля (рис. 2) в слоях обрабатываемого диэлектрика, а также распределение полученного электрического поля на входе, выходе и по всей длине рабочей камеры. Объект в СВЧ камере располагался на l -участке по оси z на расстоянии 0,35-0,45 м от начала координат.

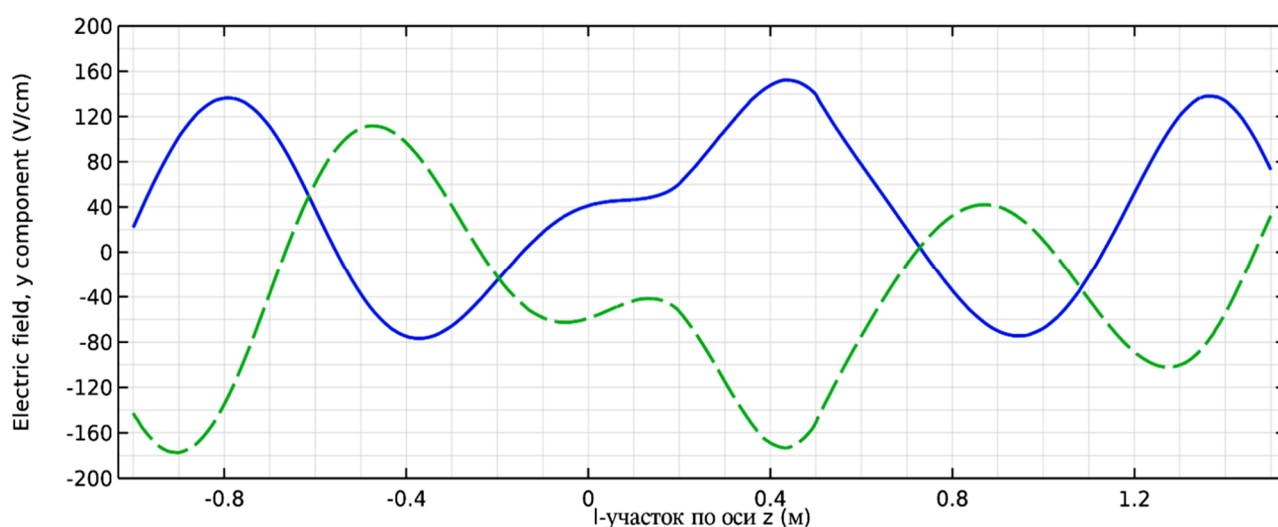


Рис. 2. Распределение напряженности E электрического поля электромагнитной волны в СВЧ камере с бегущей волной меандрового типа с пирамидальными рупорами на частоте 433 МГц

Результаты математического моделирования позволяют найти мощность СВЧ установки модифицирующего воздействия:

$$P_{СВЧ} = \frac{ab}{4} E^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} = 13,5 \text{ кВт},$$

где ϵ_0 , μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума; a и b – узкая и широкая стенка прямоугольного волновода соответственно.

При этом энергетический КПД [4]:

$$\eta_{\text{эн.}} = (1 - |\Gamma|^2) = 0,66,$$

где Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры.

Закключение

В результате математического моделирования процесса СВЧ нетепловой модификации композиционного материала в камере с бегущей волной меандрового типа с пирамидальными рупорами на частоте 433 МГц установлено:

- СВЧ рабочая камера такого типа подходит для нетепловой модификации композиционных материалов на основе полимерного связующего любой формы с наибольшим размером 300×300 мм;

- определены оптимальные размеры СВЧ рабочей камеры (рис. 1);

- установлено, что напряженность E электрического поля электромагнитной волны в исследуемом образце находится в диапазоне 135-155 В/см, что позволяет

проводить равномерную СВЧ модификацию объектов больших толщин;

– энергетический КПД такой СВЧ установки составляет $\eta_{\text{эн}} = 0,66$, что соответствует большинству СВЧ-камер подобного типа;

– для повышения энергетического КПД СВЧ установок модифицирующего воздей-

ствия рекомендуется непоглощённую объектом СВЧ мощность использовать для подогрева воды и дальнейшего применения во вторичных технологиях. Также СВЧ установки модифицирующего воздействия экономически целесообразно использовать в гибридном исполнении с установками СВЧ термообработки [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение СВЧ энергии в производстве композиционных материалов / С.Г. Калганова, Е.Ю. Васинкина, И.А. Котин, А.С. Сивак // Актуальные проблемы электротехники и электроники. 2017. С. 23-27.

2. **Курушин А.А.** Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL. Москва: One-Book, 2016. 166 с.

3. **Мольнар Д.** Simulaing RF Heating in Comsol Multiphysics [Электронный ресурс] // Comsol INC. URL: [https://www.comsol.ru/video/modeling-rf-](https://www.comsol.ru/video/modeling-rf-heating-using-comsol-multiphysics)

heating-using-comsol-multiphysics (дата обращения 10.11.2021).

4. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термия. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

5. Патент RU 86373 U1 Российская Федерация, МПК H05B 6/64. Комбинированная установка для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами / Архангельский Ю.С., Калганова С.Г., Гришина Е.М., Лаврентьев В.А.: 2009100389/22: заявл. 11.01.2009: опубл. 27.08.2009. 10 с.

Трухин Павел Олегович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Васинкина Екатерина Юрьевна – ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор института энергетики, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кадыкова Юлия Александровна – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel O. Trukhin – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Ekaterina Yu. Vasinkina – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yulia A. Kadykova – Dr.Sc., Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.12.21, принята к опубликованию 02.03.22

УДК 621.3

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСПЕРСНОЙ ЗАГРУЗКИ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ МАССИВА ИЗОЛИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ШАРОВ

В.Э. Фризен, А.С. Антипин

MUTUAL INFLUENCE OF DISPERSED LOADING ELEMENTS DURING INDUCTION HEATING OF AN ARRAY OF INSULATED STEEL BALLS

V.E. Frizen, A.S. Antipin

В статье описывается метод определения степени влияния на интегральные электрические параметры элемента дисперсной среды, состоящей из проводящих ферромагнитных шаров, в зависимости от расстояния между соседними элементами среды, помещенной в однородное переменное электромагнитное поле. Расчеты параметров производились методом конечных элементов в трехмерной постановке. В качестве интегрального параметра для оценки взаимного влияния предложен электрический импеданс единичной сферы. Приведены полученные в ходе вычислительных экспериментов зависимости коэффициента влияния взаимного расположения на активное и индуктивное сопротивление единичного шара от относительного расстояния между осями соседних сфер, находящихся в вершинах плотноупакованной гранецентрической решетки. Созданная модель учитывает нелинейность магнитных свойств среды, что увеличивает точность расчетов.

Ключевые слова: индукционный нагрев, дисперсная загрузка, электромагнитное поле в проводящей сфере, ферромагнитный материал, стальной шар

The article describes a method developed to determine the impact of a dispersion medium element consisting of conducting ferromagnetic balls on the integral electrical parameters, which depends on the distance between nearest-neighbor elements of the medium placed in a homogeneous alternating electromagnetic field. The parameters were calculated by the finite element method in a three-dimensional setting. Electric impedance of a single sphere is proposed as an integral parameter used to estimate the mutual influence. The dependences relating the impact ratio of mutual arrangement on the active and inductive resistance of a unit ball from the relative distance between the axes of the neighboring spheres located at the vertices of a densely packed face-centric lattice are presented. The created model takes into account nonlinearity of magnetic properties of the medium, which increases the accuracy of the calculations.

Keywords: induction heating, dispersed loading, electromagnetic field in a conducting sphere, ferromagnetic material, steel ball

Введение

При индукционном нагреве дисперсной неоднородной по электрофизическим и магнитным свойствам среды, очевидно, бу-

дет наблюдаться также и неравномерное распределение магнитного поля в среде, вызванное этой неоднородностью свойств. Это явление может оказать воздействие при

определении интегральных электрических характеристик дисперсной загрузки в установках индукционного нагрева. Искажение электромагнитного поля вблизи поверхности элемента приведет к изменению распределения напряженности поля на поверхности элемента дисперсной загрузки по отношению к подобному распределению в однородном поле. Очевидно, что при достаточно большом расстоянии элементов дисперсной загрузки друг от друга их взаимное влияние будет ослабляться, поскольку искажение электромагнитного поля вблизи зоны неоднородности свойств будет проявляться достаточно далеко от соседнего элемента. Особый интерес представляет изучение взаимного влияния ферромагнитных проводящих тел друг на друга, поскольку магнитные свойства среды в этом случае будут зависеть от напряженности магнитного поля как на поверхности, так и внутри элемента дисперсной среды. Для анализа удобно выбрать элементы простой формы, геометрически однородные по любому выбранному направлению (сплошная или полая сфера), для того, чтобы исключить влияние на результат положения относительно осей координат каждого из тел, составляющих дисперсную среду.

Таким образом, задача на проведение исследования может быть сформулирована следующим образом: необходимо определить степень влияния на интегральные электрические параметры элемента дисперсной среды, состоящей из проводящих ферромагнитных шаров, расстояния между соседними элементами среды, помещенной в однородное переменное электромагнитное поле.

Для решения этой задачи удобно использовать современные программные продукты для численного моделирования полей, поскольку по условию задачи требуется определить параметры поля в неоднородной среде с нелинейными (зависящими от дифференциальных величин поля) свойствами.

Описание модели

Поскольку определение параметров электромагнитного поля определяется для неоднородной среды, решение необходимо

проводить в трехмерной постановке. Подобные расчеты обладают существенными требованиями к вычислительным ресурсам компьютерной техники, поэтому уместно будет ввести ряд допущений, которые позволили бы снизить время вычислений без существенного снижения точности расчетов. Во-первых, нелинейные свойства моделируемой среды предопределяют и то, что дифференциальные величины поля в этой среде будут изменяться по негармоническому закону при гармоническом внешнем поле источника. Тем не менее с достаточной точностью можно производить вычисление дифференциальных величин поля для их первых гармоник, и вычисление тогда можно производить не для мгновенных, а для действующих значений параметров поля [1]. Во-вторых, имеет смысл ограничить размеры расчетной области и количество элементов (сфер), помещенных в однородное электромагнитное поле. Достаточно будет рассмотреть совокупность из группы ферромагнитных элементов, окружающих ферромагнитный проводящий шар в центре. В-третьих, для анализа взаимного влияния близкорасположенных ферромагнитных элементов друг на друга производить оценку только в одном шаре, расположенном по центру группы. Опять же для сокращения объема вычислений можно производить расчет распределения плотности наведенного вихревого тока только в том элементе группы, для которого будем производить оценку взаимного влияния, остальные же шары полагаем ферромагнитными, но не проводящими объектами.

В процессе вычислений решается система дифференциальных уравнений в частных производных

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{B}$ и $\mathbf{H}$ – вектора индукции и напряженности электромагнитного поля, амплитуды которых связаны выражением

$$B = B(|H|) \cdot \frac{H}{|H|}, \quad (2)$$

где J – вектор плотности тока; A – векторный магнитный потенциал; E – вектор напряжен-

ности электрического поля; σ – электропроводность среды; ω – угловая частота.

График зависимости индукции от напряженности магнитного поля для ферромагнитной среды представлен на рис. 1.

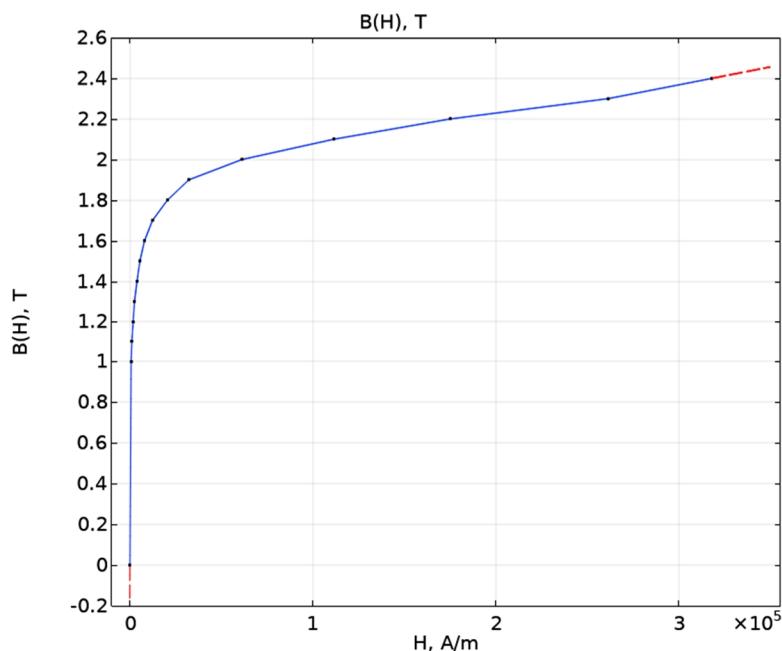


Рис. 1. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля в ферромагнитных элементах среды

Расчетная область представляет собой цилиндр, внутри которого располагается группа шаров, расстояние между которыми может варьироваться таким образом, чтобы при изменении взаимного расположения изменялось только расстояние между соседними шарами, но угловые координаты центров шаров относительно центрального оставались неизменными. Геометрия модели представлена на рис. 2.

Граничные условия на внешних границах расчетной области представлены только величиной напряженности магнитного поля на боковых поверхностях цилиндра в направлении оси z , а на торцах цилиндра удовлетворяется выражение

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{n}$ – вектор нормали к поверхности.

В модели присутствует только 3 материала для описания свойств среды в расчетной области: сталь с учетом потерь (ферромагнитная проводящая сфера по центру компо-

зиции), сталь без учета потерь (ферромагнитные непроводящие сферы, окружающие центральную), и воздух в оставшемся пространстве расчетной области.

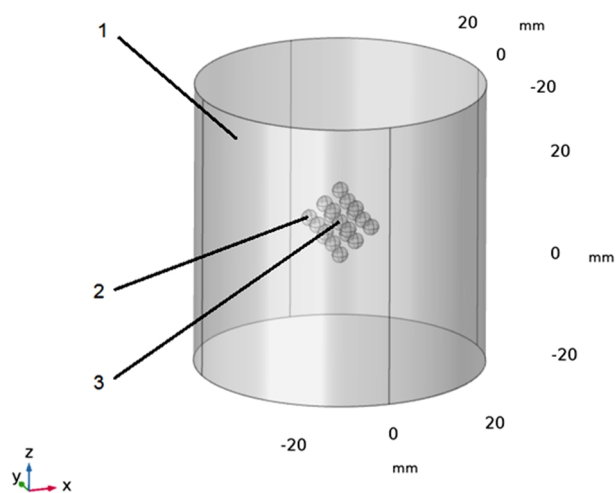


Рис. 2. Геометрия расчетной области модели:

- 1 – внешняя граница расчетной области;
- 2 – ферромагнитные непроводящие сферы;
- 3 – ферромагнитная проводящая сфера

При моделировании необходимо настроить сетку конечных элементов в расчетной области таким образом, чтобы снизить ошибку вычисления поля в интересующей нас подобласти – центральной проводящей ферромагнитной сфере. Поэтому плотность сетки конечных элементов вблизи поверхности этой сферы уплотнена, а в остальных элементах ферромагнитного массива сетка более грубая. Внешний вид сетки конечных элементов представлен на рис. 3. Здесь на цветовой шкале представлен размер элементов, м.

Сферы в кладке располагаются таким образом, чтобы расстояния между соседними сферами были одинаковыми. При максимально плотной укладке возможны 2 ее варианта – гранецентрированная кубическая и шестиугольная плотная упаковки [2, 3]. В представленной модели использовался первый вариант укладки для снижения количества рассматриваемых элементов массива в расчетной области.

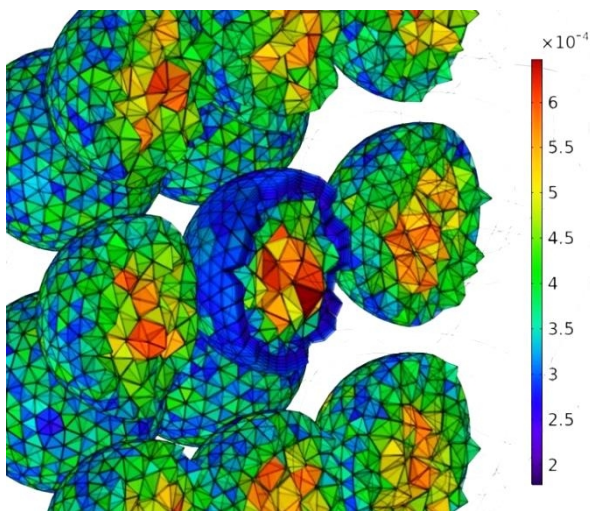


Рис. 3. Сетка конечных элементов в выделенном элементе расчетной области

Методика обработки результатов вычислений

Для определения взаимного влияния ферромагнитных сфер друг на друга необходимо выделить интегральный параметр, по которому можно провести оценку этого влияния. Таким параметром может быть комплексное магнитное сопротивление магнитному потоку, пронизывающему шар

или электрическое сопротивление шара наведенному вихревому току. Оба этих параметра взаимно связаны друг с другом, и оценку можно производить по одному из них. Для дальнейшего использования при составлении электрической схемы замещения индукционной установки с дисперсной нагрузкой в виде проводящих стальных шаров удобно использовать именно электрическое сопротивление сферы в качестве базового параметра.

Магнитное сопротивление шара может быть определено через интегральные значения полного тока на поверхности сферы и интеграла индукции через поверхность сферы

$$I = \int H_{z\text{ave}} dl = \pi \cdot r \cdot H_{z\text{ave}}, \quad (4)$$

$$\Phi = \int \mathbf{B} ds = \int \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} ds, \quad (5)$$

где $H_{z\text{ave}}$ – среднее значение z -компонента напряженности магнитного поля на поверхности сферы; r – радиус сферы; l – длина окружности радиуса r ; s – площадь поверхности полусферы.

$$\underline{Z}_m = \frac{\square I}{\square \Phi}. \quad (6)$$

Полное электрическое сопротивление сферы может быть найдено по формуле [1]

$$\underline{Z}_e = \frac{j\omega}{\underline{Z}_m}. \quad (7)$$

Для того чтобы представить результаты исследования в относительных параметрах, необходимо выбрать точку отсчета, для которой определяемая величина являлась бы базовой. Такой точкой отсчета может быть либо максимально плотная укладка шаров [3], либо единичная сфера в однородном поле (соседние элементы достаточно далеко, для того, чтобы оказывать влияние на поле внутри сферы). Здесь примем за базовый случай второй вариант.

Промежуточные значения контролируемого параметра (относительного по отношению к базовому полному сопротивлению сферы) будут получены при опре-

деленном соотношении среднего расстояния до осей соседних элементов к диаметру одного шара.

Результаты вычислительных экспериментов

Вычислительные эксперименты проводились для одного диаметра шара (3 мм), при одной и той же напряженности внешнего поля и для ряда частот от 0,05 до 10 кГц.

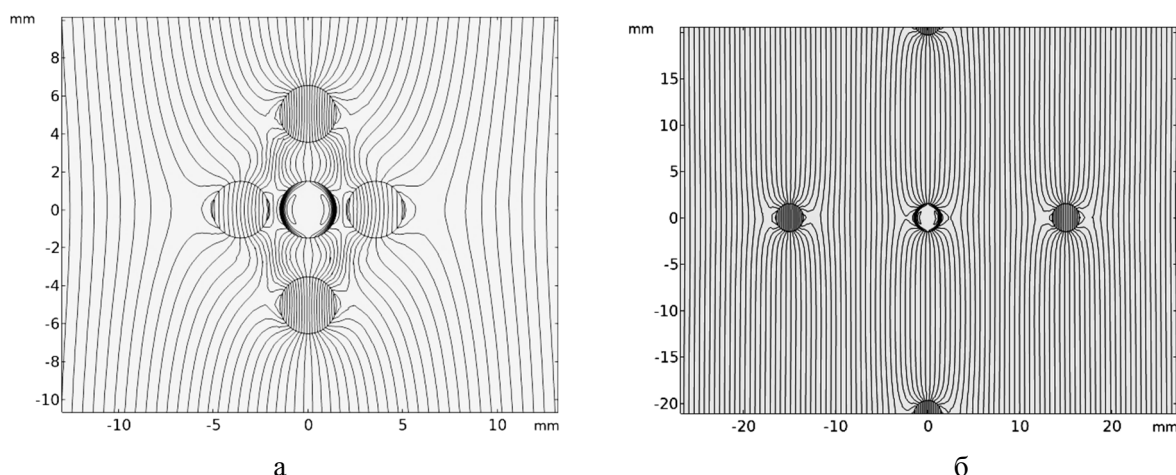


Рис. 4. Силовые линии магнитного поля в сечении yz : а – для $b/d = 1,2$; б – для $b/d = 5$

На рис. 4 видно, что при близком расстоянии шаров друг от друга магнитное поле вблизи контрольного центрального шара сильно искажается, что может приводить к изменению его электрических характеристик.

В таблице и на рис. 5 приведены полученные в ходе вычислительных экспериментов зависимости коэффициента влияния

На рис. 4 представлены распределения магнитных силовых линий (изолиний x -компоненты векторного магнитного потенциала в плоскости сечения yz) в плоскости yz для двух случаев укладки шаров – близко друг к другу (отношение расстояния b между осями ближайших друг к другу шаров к диаметру d одного шара $b/d = 1,2$) и на расстоянии, при котором взаимное влияние шаров друг на друга практически не оказывается ($b/d = 5$).

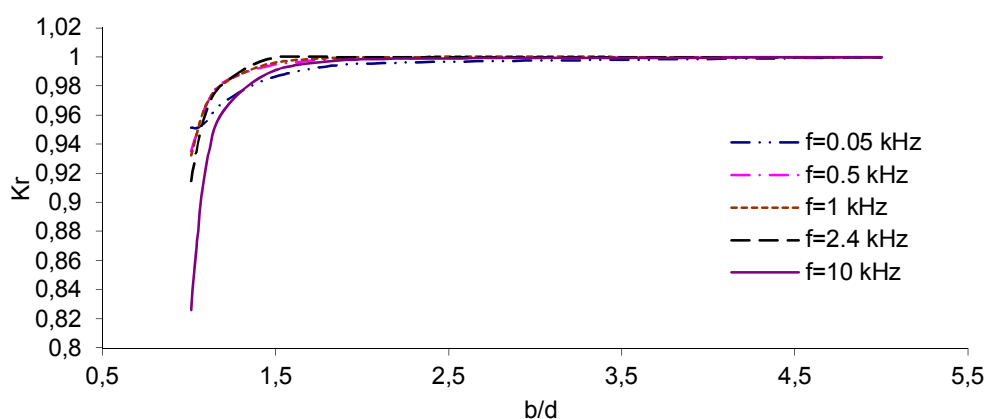
взаимного расположения на активное и индуктивное сопротивление единичного шара. В таблице приведены данные для двух крайних значений относительного радиуса при фиксированной амплитуде внешнего магнитного поля на границе расчетной области $H_z = 20000$ А/м. Порядок величины линейной нагрузки типичен для установок индукционного нагрева [1, 4-6, 11].

Результаты вычислительных экспериментов

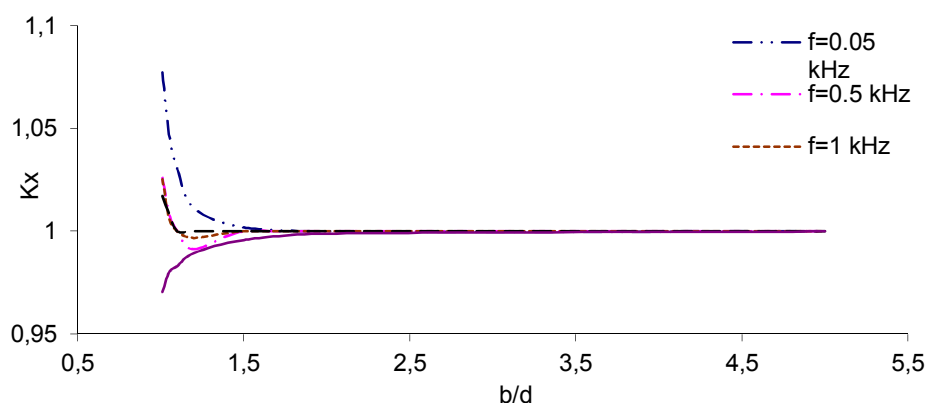
b/d	f , кГц	Z , Ом	H_{zave} , А·м	Φ , Вб	r , мОм	x , мОм	K_r	K_x
1.01	0,05	2.16E-6+ +5.71E-6i	13674.3-24.1i	1.17E-6+ +4.45E-7i	0.00216	0.00571	0.95154	1.07736
1.05		2.16E-6+ +5.55E-6i	12146.6-4.97i	1.012E-6+ +3.94E-7i	0.00216	0.00555	0.95154	1.04717
1.10		2.17E-6+ +5.46E-6i	11392.7+5.6i	9.31E-7+ +3.71E-7i	0.00217	0.00546	0.95595	1.03019
1.20		2.20E-6+ +5.366E-6i	10772.8+12.3i	8.67E-7+ +3.55E-7i	0.00220	0.00536	0.96916	1.01132
1.50		2.24E-6+ +5.31E-6i	10278.3+16.2i	8.20E-7+ +3.45E-7i	0.00224	0.00531	0.98678	1.00189

Окончание таблицы

b/d	$f, \text{кГц}$	$Z, \text{Ом}$	$H_{zave}, \text{А} \cdot \text{м}$	$\Phi, \text{Вб}$	$r, \text{МОм}$	$x, \text{МОм}$	K_r	K_x
2		$2.26\text{E-}6 + 5.3\text{E-}6i$	$10139.2 + 16.9i$	$8.07\text{E-}7 + 3.42\text{E-}7i$	0.00226	0.0053	0.99559	1
5		$2.27\text{E-}6 + 5.3\text{E-}6i$	$10098.4 + 17.0i$	$8.03\text{E-}7 + 3.42\text{E-}7i$	0.00227	0.0053	1	1
1.01	10	$0.00566 + 0.00925i$	$13346.8 - 419.9i$	$9.08\text{E-}6 + 6.0\text{E-}6i$	5.66	9.25	0.82628	0.97062
1.05		$0.00603 + 0.00934i$	$12123.3 - 127.5i$	$8.44\text{E-}6 + 5.57\text{E-}6i$	6.03	9.34	0.88029	0.98006
1.10		$0.00635 + 0.00937i$	$11535.4 + 42.6i$	$8.13\text{E-}6 + 5.46\text{E-}6i$	6.35	9.37	0.92701	0.98321
1.20		$0.00660 + 0.00943i$	$11014.8 + 150.7i$	$7.86\text{E-}6 + 5.35\text{E-}6i$	6.6	9.43	0.9635	0.98951
1.50		$0.00679 + 0.00949i$	$10573.3 + 212.8i$	$7.63\text{E-}6 + 5.23\text{E-}6i$	6.79	9.49	0.99124	0.9958
2		$0.00684 + 0.00952i$	$10442.9 + 223.8i$	$7.58\text{E-}6 + 5.20\text{E-}6i$	6.84	9.52	0.99854	0.99895
5		$0.00685 + 0.00953i$	$10403.3 + 225.6i$	$7.55\text{E-}6 + 5.19\text{E-}6i$	6.85	9.53	1	1



а



б

Рис. 5. График зависимостей коэффициентов активного (а) и реактивного (б) сопротивления центрального шара от относительного расстояния до соседних шаров, полученных для ряда частот

В графе таблицы H_{zave} – среднее значение напряженности поля на поверхности шара, посчитанное по формуле (4), Φ – вычисленное значение магнитного потока, проходящего через шар, посчитанное по формуле (5). На графиках, изображенных на рис. 5, приведены коэффициенты при активном и индуктивном сопротивлениях шара, вычисленных по формулам

$$K_r = \frac{r(b/d)}{r(5)}, \quad (6)$$

$$K_x = \frac{x(b/d)}{x(5)} \quad (7)$$

для всех полученных в ходе вычислительных экспериментов значений частот (относительных радиусов).

На полученных графиках видно, что заметные изменения в активном сопротивлении шара при компактной укладке наблюдаются при больших значениях относительного радиуса ($m = \sqrt{2} \cdot r/\Delta \approx 14$ и выше), а также в диапазоне относительного расстояния между центрами шаров $b/d \leq 2$. Индуктивное сопротивление шара при изменении плотности укладки изменяется менее выражено. Разница в значениях составляет не более 7 %. Причем при значениях относительного радиу-

са шара $m < 20$ индуктивное сопротивление шара с уменьшением плотности укладки убывает, а с ростом частоты и увеличением значения относительного радиуса – растет.

Заключение

Очевидно, что результаты получены из набора частных случаев относительного радиуса шара и способа укладки шаров в массиве, но демонстрируют общую зависимость собственного импеданса стального шара от взаимного расположения соседей при индукционном нагреве. Созданная модель учитывает нелинейность магнитных свойств среды, что увеличивает точность расчетов. Полученные зависимости могут быть использованы при определении электрического сопротивления комплексной загрузки при индукционном нагреве [7-10]. Наличие выявленной зависимости может привести также к неравномерному распределению мощности тепловыделения по радиусу массива составной загрузки – вблизи внутренней поверхности цилиндрического индуктора с составной загрузкой индукция, а следовательно и тепловыделение в сферах должны отличаться от тепловыделения в центральных элементах массива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; под ред. А.Е. Слухоцкого. Ленинград: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 328 с.
2. Szpiro G. Mathematics: does the proof stack up? // Nature. 2003 Jul 3;424(6944):12-3. doi: 10.1038/424012a.
3. The sphere packing problem in dimension 24 / H. Cohn, A. Kumar, S. Miller, D. Radchenko, M. Viazovska // Ann. of Math. (2) 185 (3) 1017-1033. May 2017. <https://doi.org/10.4007/annals.2017.185.3.8>.
4. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. Москва: Металлургия, 1979. 247 с.
5. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Ленинград: Энергия, 1965. 552 с.
6. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергия, 1967. 416 с.
7. Belik S. Kalorimetrische Untersuchung der induktiven Erwärmung von Kugelanordnungen für elektrothermische Speichervwendungen // Tagungsband Workshop Elektroprozessstechnik. 2019. e79-e87. Workshop Elektroprozessstechnik, 12-13. Sept. 2019, Ilmenau, Deutschland.
8. Математическое моделирование электромеханических установок в среде Comsol Multiphysics: учеб.-метод. пособие /

И.А. Смольянов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов и др.; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 255 с.

7. **Антипин А.С. Фризен В.Э.** Методика определения максимальной энергоэффективности индукционной сушильной установки косвенного нагрева // Промышленная энергетика. 2020. (7), 26-35. URL: <https://doi.org/10.34831/EP.2020.88.49.004>.

8. **Antipin A., Frizen V., Sidorov O.** (2019). Research of the process heating of dis-

persed steel load // В 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019 – Proceedings [8771694] (2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019 – Proceedings). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771694>.

9. **Фарбман С.А., Колобнев И.Ф.** Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. 5-е изд., доп. и перераб. Москва: Металлургия, 1968. 496 с.

Фризен Василий Эдуардович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Антипин Александр Сергеевич – инженер кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Vasiliy E. Frizen – Dr.Sc., Associate Professor, Head: Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Alexander S. Antipin – Postgraduate, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

Статья поступила в редакцию 12.02.22, принята к опубликованию 02.03.22

УДК 616.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИОБИЙ-ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Н.В. Андриянова, О.А. Маркелова, С.Я. Пичхидзе

INFLUENCE OF MICRO-ARC OXIDATION MODES ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NIOBIUM OXIDE COATINGS

N.V. Andriyanova, O.A. Markelova, S.Ya. Pichkhidze

В статье рассматривается процесс микродугового оксидирования ниобиевого сплава. Экспериментально установлено влияние плотности тока в диапазоне от 0,8 до 1,2 кА/м² на толщину формируемого слоя и микротвердость обрабатываемых образцов. Проведен анализ физико-механических характеристик образцов из сплава ниобия Nb1 до и после упрочнения рабочей поверхности оксидированным покрытием. Результаты исследований показали, что при оксидировании происходило изменение структуры и механических свойств ниобиевых покрытий. Установлено, что поверхностная твердость после микродугового оксидирования покрытия увеличилась примерно в 2 раза с 350 до 800 HV. Увеличение плотности тока привело к увеличению толщины покрытий от 42,5 до 60 мкм.

Ключевые слова: ниобий, оксид ниобия, микродуговое оксидирование.

The article considers the process of microarc oxidation of niobium alloys. The authors determined effect of the current density in the range from 0,8 to 1,2 kA/m² on the thickness of the formed layer and microhardness of the processed samples. Analysis of the the physical and mechanical characteristics of the niobium Nb1 alloy samples before and after hardening of the working surface with an oxidized coating was carried out. The results of research showed that during oxidation there was a change in the structure and mechanical properties of the niobium coatings. It was found that the surface hardness after micro-arc oxidation of the coating nearly doubled from 350 to 800 HV. An increase in the current density led to an increase in the thickness of the coatings from 42.5 to 60 microns.

Keywords: niobium, niobium oxide, micro-arc oxidation

Введение

На практике широкое применение получили технологии электрохимического оксидирования, например анодирование и плазмоэлектролитическое оксидирование (ПЭО), известное также как микродуговое оксидирование (МДО), позволяющие формировать покрытия толщиной до 500 мкм. Формируемые оксидные слои обладают высокими механическими свойствами,

износо- и коррозионной стойкостью, а также адгезионной прочностью [1, 2].

Анодирование, производимое в водных растворах щелочей и кислот или в безводных фторидных электролитах, позволяет получать оксидные покрытия, характеризующиеся наличием в структуре нанопор диаметром 20-300 нм и длиной до 1 мм и высокими значениями износо-стойкости [3].

МДО отличается от процесса анодирования наличием микродуговых разрядов, в результате воздействия которых изменяется структура и механические свойства формируемого покрытия [4]. Морфология и элементно-фазовый состав формируемых оксидных покрытий зависят от состава электролита и частично от плотности тока. Наиболее известным электролитом для электрохимического оксидирования является водный раствор NaOH [5].

Технология МДО в части технологических преимуществ позволяет полу-

чать покрытия с широкой областью применения.

Например, в восстановительной медицине для улучшения качества остеоинтеграции поверхность имплантатов подвергают модификации (текстурированию) или формируют покрытие, которое по структуре и механическим свойствам подобно костной ткани. Предлагается на некоторых конструкциях из ниобия, а именно на внутрикостных элементах мостового дентального имплантата, формировать оксидное покрытие Nb_2O_5 (рис. 1) [6].

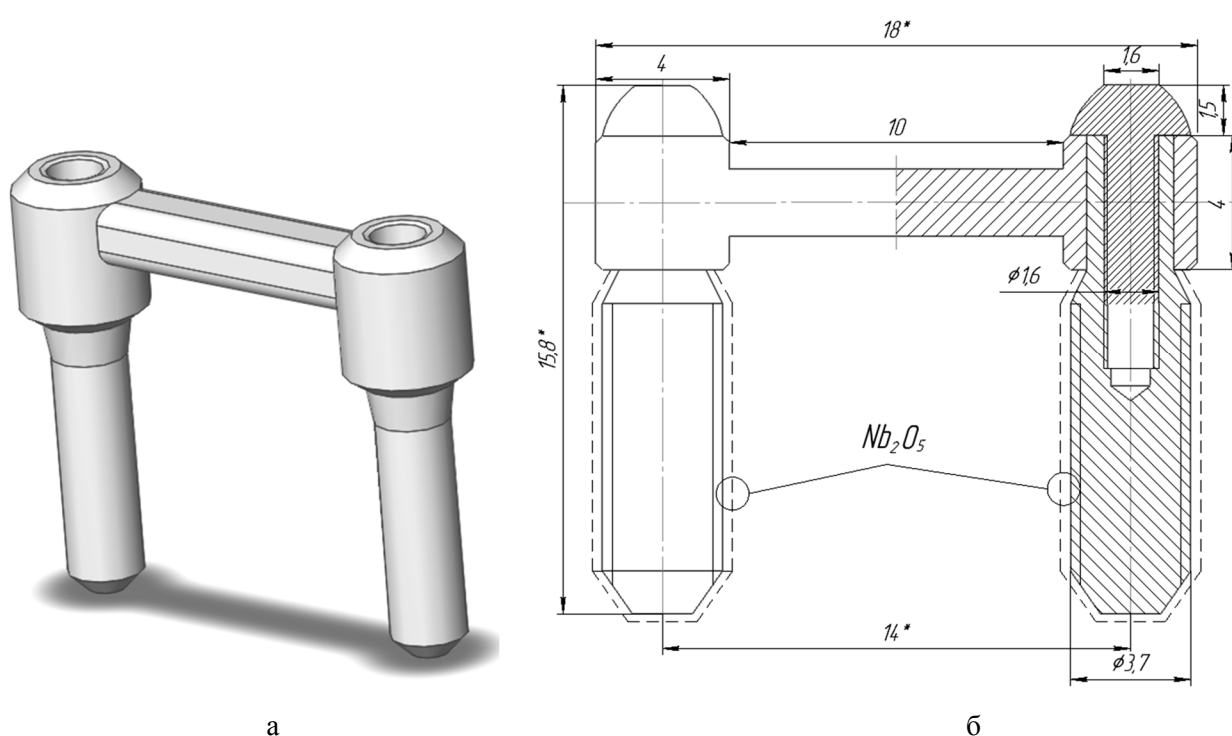


Рис. 1. Схема конструкции внутрикостного мостового дентального имплантата:
а – 3D схема, б – 2D чертеж

В настоящее время недостаточно изучена технология МДО на ниобии, что затрудняет выбор режимов, а именно: состав электролита, плотность тока и длительность процесса. В подобных случаях, особенно при отсутствии общепринятой теории и модели процесса МДО, определение рациональных режимов проводится экспериментально [7-9]. Поэтому цель данной работы заключалась в исследовании влияния параметров МДО, в частности плотности тока, на толщину и микротвердость ниобиевых покрытий.

Материалы и методы исследований

Для проведения комплексных исследований были подготовлены образцы, представляющие собой пластины из ниобия марки НБ1 (ТУ 48-19-284-84) размерами 11×19 мм и толщиной 0,5 мм. Перед нанесением покрытия поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке на установке «Чайка-20» порошком электрокорунда дисперсностью 250-300 мкм при давлении 4±0,5 МПа. Очистка образцов от технологических загрязнений проводилась в водном растворе ПАВ с использованием

ультразвуковой ванны «УЗУМИ-2». Оксидные покрытия формировались в водном щелочном электролите (NaOH, 4 г/л) на лабораторной установке «МДО-1» (рис. 2). Процесс оксидирования проводился в анодном режиме при плотностях тока (j) 0,8; 1,0; 1,2 кА/м^2 . Использование плотности тока меньше 0,8 кА/м^2 не способствует достаточному проплавлению формируемой оксидной

пленки, протекает только процесс первичного окисления. При плотности тока больше 1,2 кА/м^2 за счет процесса кавитации ослабевает адгезионно-когезионное взаимодействие частиц покрытия и основы образца. Длительность процесса составляла $10 \pm 0,5$ мин. Последовательность процесса формирования оксидных покрытий на образцах из ниобия приведена на рис. 3.

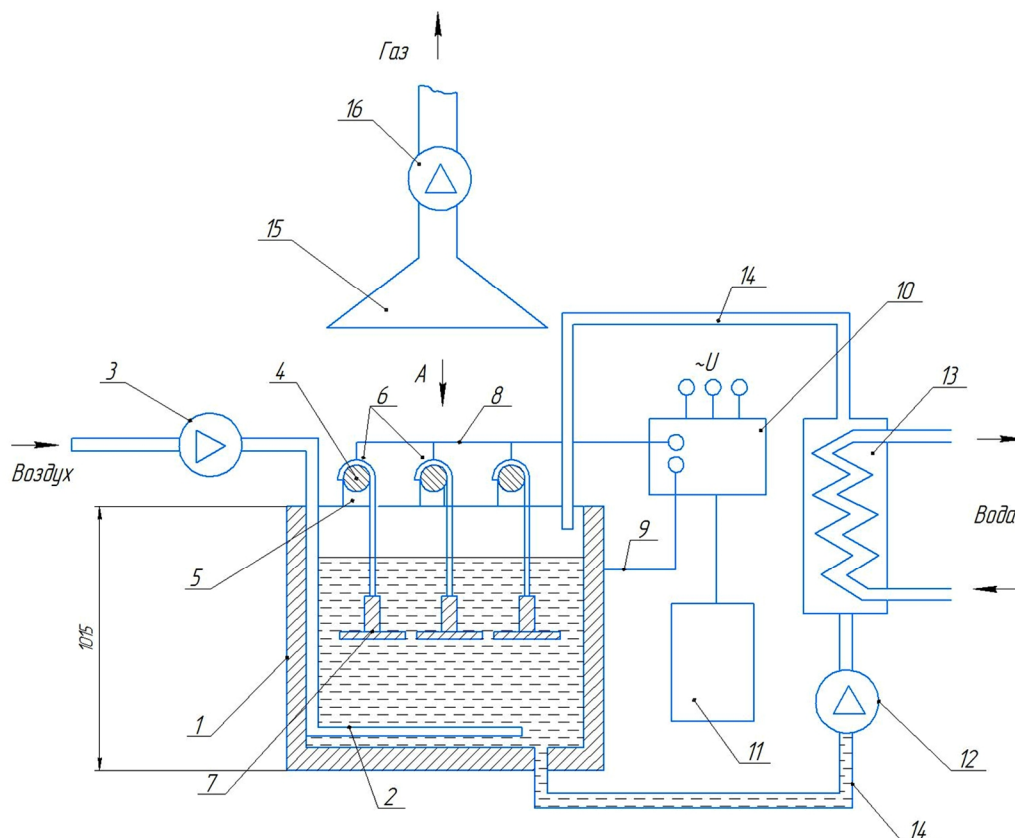


Рис. 2. Схема установки МДО-1: 1 – ванна; 2 – барботёр; 3 – компрессор; 4 – токоподводы; 5 – изоляторы; 6 – подвески; 7 – обрабатываемые изделия; 8, 9 – провод; 10 – система питания; 11 – система управления; 12 – водяной насос; 13 – теплообменник; 14 – трубопровод; 15 – система вентиляции; 16 – вентилятор

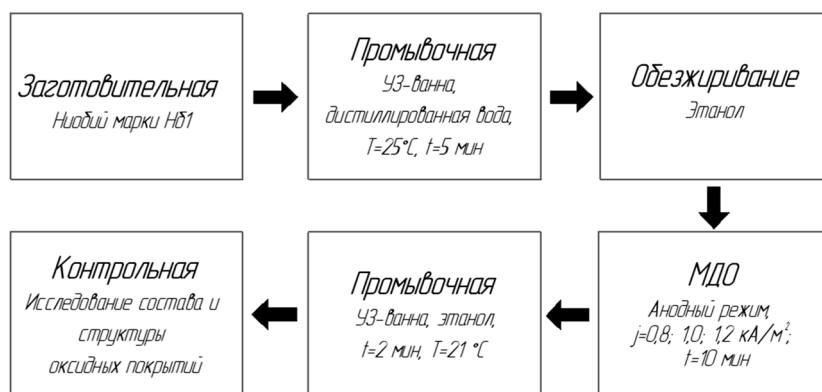
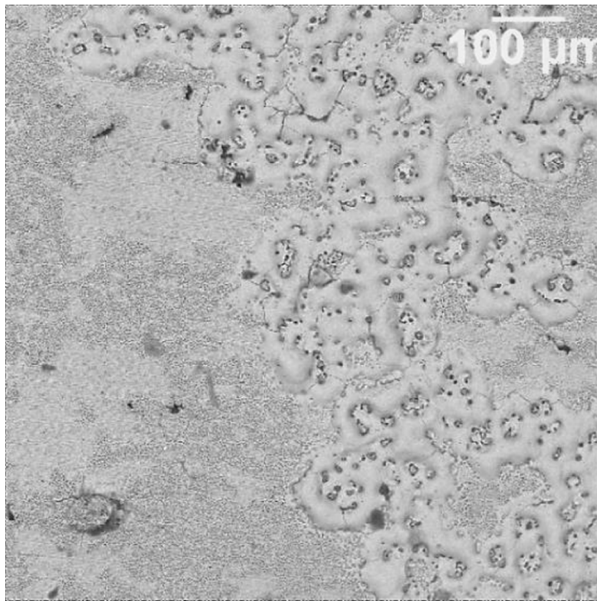


Рис. 3. Последовательность процесса формирования оксидных покрытий на образцах из ниобия

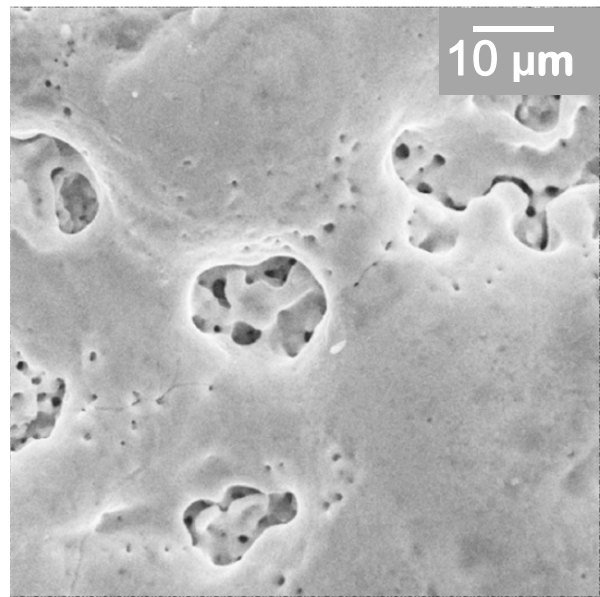
Результаты и обсуждение

МДО покрытия на ниобии имеют оплавленную поверхность и поры размером до 15

мкм, сформированные при воздействии микродуговых разрядов (рис. 4 а). Различимы отдельные поры размером от 500 нм (рис. 4 б).



а



б

Рис. 4. Структура поверхности оксидного покрытия, сформированного на ниобии, при плотности тока $1,0 \text{ кА/м}^2$

Установлено, что плотность тока не оказывает значительного влияния на размер пор. Суммарная поверхностная пористость составляла 45-47 %, что является рекомендуемым для стоматологических имплантатов.

Изменение структуры поверхности по полученным данным измерения параметров профиля приведено в таблице.

Параметры шероховатости образцов без покрытия и с покрытием МДО

Образец	R_a , мкм	R_z , мкм	$R_{\max}$, мкм	S_m , мкм
А – до МДО	0,127	1,334	1,826	67,4
Б – после МДО	3,439	18,840	22,331	329

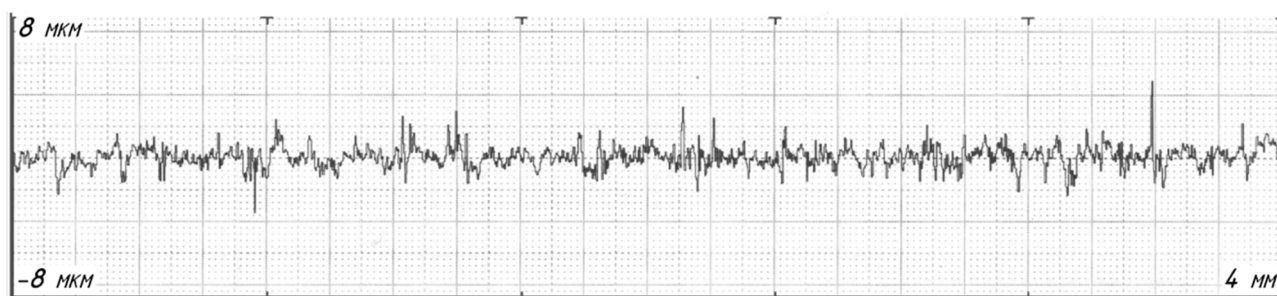
Анализ результатов (таблица) показывает, что использование покрытия после МДО в сравнении с материалом без покрытия приводит к повышению количества пор и микротрещин. Данный факт способствует

повышению остеоинтеграционных свойств и позволит лучше закрепиться имплантату в костном ложе.

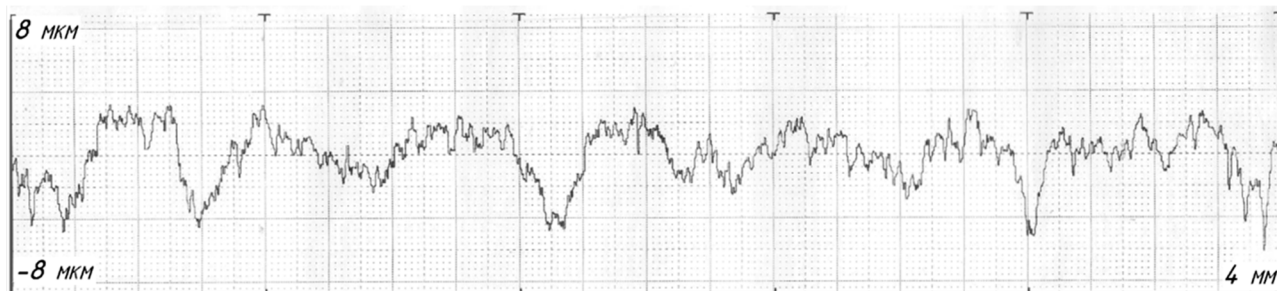
Дополнительно по полученным данным измерения параметров профиля обработанной поверхности были построены профилограммы шероховатости (рис. 5).

Анализ рис. 5 свидетельствуют о том, что в результате МДО шероховатость поверхности возрастает примерно в 3 раза (таблица). Плотность тока в диапазоне от $0,8$ до $1,2 \text{ кА/м}^2$ не оказывает заметного влияния на изменение параметра шероховатости $R_a \ 3,439 \pm 0,500 \text{ мкм}$.

Согласно результатам РФА исходные образцы сплава Nb1 в основном состояли из ниобия, а покрытия включали ниобий и кислород [10], а именно Nb_2O_5 . Проведенный анализ показал, что после нанесения покрытий методом МДО основные рефлексы Nb значительно уменьшаются по интенсивности. Данный факт свидетельствует о том, что на поверхности образцов находится достаточно плотный слой Nb_2O_5 покрытия (рис. 6).



а



б

Рис. 5. Профилограммы шероховатости: а – до МДО; б – после МДО

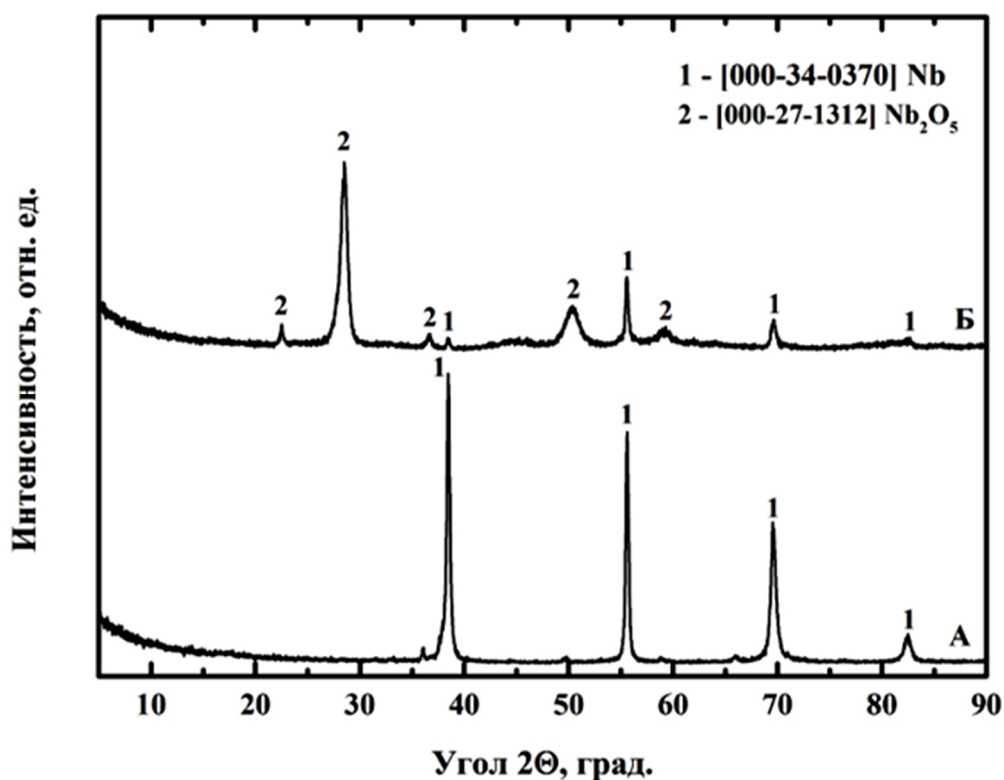
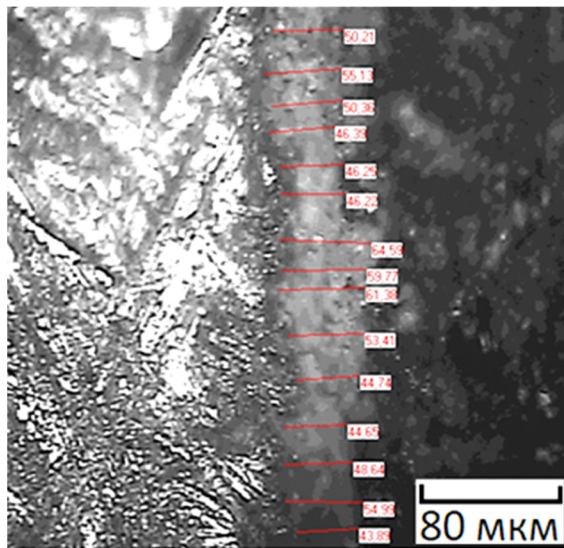


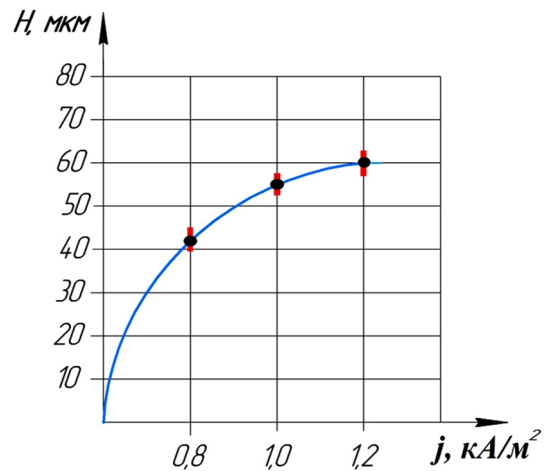
Рис. 6. РФА образцов ниобия: А – до МДО; Б – после МДО при плотности тока $1,0 \text{ кА/м}^2$

Толщина покрытий определялась по микрошлифам (рис. 7 а). Установлено, что при МДО на ниобии формируются однослойные пористые покрытия. Средняя толщина покрытий, сформированных при

плотности тока $0,8$, $1,0$ и $1,2 \text{ кА/м}^2$, составляла 42 ± 3 мкм, 55 ± 2 мкм и 60 ± 2 мкм, соответственно. Таким образом, увеличение плотности тока приводило к увеличению толщины покрытий (рис. 7 б).



а



б

Рис. 7. Результаты измерения толщины покрытия, полученного при плотности тока $1,0 \text{ кА/м}^2$ (а), влияние плотности тока на толщину формируемых покрытий (б)
 $(H = 55,13 + 37,75 \times \ln(j)^2, R^2 = 0,99)$

Плотность тока оказывала влияние на толщину и твердость покрытий. Микро-твердость исходного ниобия составляла 350 HV . Максимальной микро-твердостью характеризовались покрытия, сформированные при плотности тока $1,0 \text{ кА/м}^2$, минимальной – $0,8 \text{ кА/м}^2$ (рис. 8).

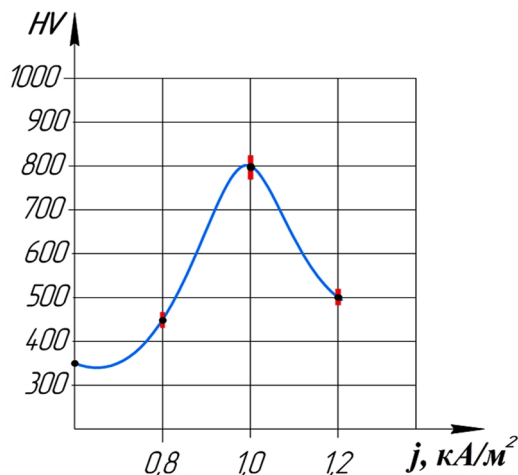


Рис. 8. Влияние плотности тока на микро-твердость покрытий
 $(HV = 785,82 - 7316 \times \ln(j)^2, R^2 = 0,96)$

Заключение

В результате исследований установлено:

1. МДО позволяет сформировать на ниобии оксидные покрытия с суммарной

пористостью 45-47 % и открытыми пора-ми размером $0,5\text{-}15 \text{ мкм}$. Шероховатость покрытий составляла $R_a 3,439 \pm 0,500 \text{ мкм}$. Величина пористости соответствует рекомендуемой для имплантатов. Плотность тока не оказывает влияния на данный параметр.

2. Толщина покрытий плавно возрастает при увеличении плотности тока. Установлена эмпирическая зависимость: $H = 55,13 + 37,75 \times \ln(j)^2, R^2 = 0,99$.

3. Поверхностная твердость после нанесения МДО покрытия увеличилась примерно в 2 раза с 350 до 800 HV , что может способствовать росту прочности конструкции мостового дентального имплантата.

4. Согласно полученным результатам МДО позволяет сформировать на поверхности ниобиевых имплантатов оксидные покрытия, подобные по структуре и микро-твердости костной ткани. Рационально использовать плотность тока $1,0 \text{ кА/м}^2$, при которой формируются наиболее твердые и достаточные по толщине покрытия.

5. Полученные эмпирические модели целесообразно использовать для оптимального выбора плотности тока при микро-дуговом оксидировании ниобия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods / A. Zhecheva, W. Sha, S. Malinov, A. Long // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. № 7. P. 2192-2207.

2. **Diamanti M.V., Del Curto B., Pedferri M.P.** Anodic oxidation of titanium: from technical aspects to biomedical applications // Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics. 2011. Vol. 9. № 1. P. 55-69.

3. Fabrication of nanoporous TiO₂ by electrochemical anodization / G.D. Sulka, J.K. Kolodziej, A. Brzozka, M. Jaskula // Electrochimica Acta. 2010. Vol. 55. № 14. P. 4359-4367.

4. **Diamanti M.V., Del Curto B., Pedferri M.P.** Anodic oxidation of titanium: from technical aspects to biomedical applications // Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics. 2011. Vol. 9. № 1. P. 55-69.

5. **Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В.** Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ, 2013. С. 522.

6. **Андрянова Н.В.** Прогнозирование механических характеристик внутрикостного мостового дентального имплантата // Сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции. Курск, 05 июня 2020 года: в 4 т. / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. Т. 3 С. 186.

7. **De Ardo A.J.** Niobium in modern steels // International Materials Reviews. 2003. Vol. 48. № 6. P. 56.

8. **Andrade C.K.Z., Rocha R.O.** Recent applications of niobium catalysts in organic synthesis // Mini-Reviews in Organic Chemistry. 2006. Vol. 3. № 4. P. 74.

9. **Технология тонких пленок:** справочник / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. Нью-Йорк, 1970. – Москва: Сов. радио, 1977. Т. 1. С. 664.

10. **Андрянова Н.В.** Улучшение конструкции внутрикостного дентального винтового имплантата // Тенденции развития науки и образования: научный журнал. 2018. Ч. 1. С. 31-32.

Андрянова Надежда Викторовна – аспирант кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Маркелова Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Пичхидзе Сергей Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nadezhda V. Andriyanova – Postgraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga A. Markelova – PhD, Assistant, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergey Ya. Pichkhidze – Dr.Sc., Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.02.22, принята к опубликованию 03.03.22

УДК 621.365, 621.794

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ИНДУКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ**

А.Ю. Щелкунов

**INFLUENCE OF ELECTROTECHNOLOGICAL PARAMETERS
OF INDUCTION HEAT TREATMENT ON THE TEMPERATURE
OF TITANIUM SAMPLES DURING FORMATION
OF OXIDE COATINGS**

A.Yu. Shchelkunov

В данном исследовании устанавливалось влияние электротехнологических параметров индукционно-термической обработки (ИТО) на малогабаритные дисковые образцы, изготовленные из технического титана, в температурном диапазоне от 800-850 до 1650-1750 °C с продолжительностью обработки не более 300 с. Определено влияние тока индуктора в диапазоне от 2,7 до 4,5 кА на среднюю величину температуры выдержки для титанового диска при оксидировании. Устанавливались регрессионные зависимости температуры выдержки от величины потребляемой электрической мощности в диапазоне от 0,21 до 0,95 кВт.

Ключевые слова: индукционно-термическая обработка, титан, оксидирование, ток индуктора, потребляемая электрическая мощность

В настоящее время актуальным вопросом остается выбор типа физического воздействия и соответствующего оборудования для упрочняющей термической обработки металлоизделий. С развитием электротехнологии в отечественной и зарубежной промышленности для термообработки применяют различные методы нагрева, например в печах сопротивления, электроконтактный, индукционный, электронно-

In this study, the influence of the electro-technological parameters of induction heat treatment (IHT) on small-sized disc samples made of commercially pure titanium was established in the temperature range from 800–850 to 1650–1750 °C with a processing duration within 300 s. The influence of the inductor current in the range from 2.7 to 4.5 kA on the average exposure temperature for a titanium disk during oxidation was determined. Regression dependences of the exposure temperature for the value of the consumed electric power in the range from 0.21 to 0.95 kW were established.

Keywords: induction heat treatment, titanium, oxidation, inductor current, power consumption

лучевой и другие методы обработки концентрированными потоками энергии [1-4]. Наиболее эффективным является индукционный нагрев, что связано с высокой скоростью нагрева металлоизделий и технологичностью при эксплуатации [5-7].

Одной из проблем при нагреве металлов индукционным способом является неравномерное распределение электромагнитного поля и, следовательно, выделяе-

мого тепла по сечению нагреваемого изделия. Характер выделения тепла в скин-слое зависит от геометрических параметров системы «индуктор-изделие» и от типа рабочей среды для процессов упрочняющей химико-термической обработки [8]. Таким образом, каждая система «индуктор-изделие» имеет свои особенности, и для определения основных технологических параметров обработки (геометрические параметры, число витков, частота и ток индуктора, а также потребляемая электрическая мощность), температуры нагрева (выдержки) необходимо выполнять уточняющие экспериментальные исследования с последующей разработкой регрессионных моделей. Температура нагрева (выдержки) в свою очередь влияет на свойства материала, подвергнутого ИТО. Например, при температуре нагрева титана около 1150-1200 °С и длительности выдержки от 30 до 300 с происходят ускоренное окисление и формирование толстого оксидного слоя (окалины) [9-11]. При ускоренном росте в нем создается большое количество внутренних напряжений, которые способствуют неравномерности и легкому разрушению (отслоению) от основы изделия. После удаления окалины остается промежуточный сверхтвердый слой (не менее 40 ГПа), который образован кристаллами рутила призматической формы с размером до 0,4-0,6 мкм и высокой твердостью [13-15]. Таким образом, цель работы заключалась в определении влияния тока индуктора и потребляемой электрической мощности на температуру выдержки титановых малогабаритных изделий.

Методология исследований

В исследованиях применялись титановые образцы-диски марки Grade 2 (аналог BT1-0) с внешним диаметром $D = 13,9-14,0$ мм и толщиной $h = 1,95-2,05$ мм. Перед ИТО поверхность образцов обрабатывалась шлифованием на мелкозернистой абразивной бумаге (P800-P2000) до получения шероховатости поверхности $Ra 0,16$ с после-

дующей ступенчатой очисткой в водном растворе ПАВ и этилового спирта.

Процесс ИТО проводился с использованием индукционного нагревательного устройства ВЧ-15А. В активной области индуктора размещалась открытая камера трубчатого типа, в которой располагался титановый образец-диск. При ИТО он окислялся в воздушной атмосфере с формированием функционального оксидного покрытия (рис. 1).

Основными параметрами процесса ИТО были выбраны ток индуктора $I_{инд}$, электрическая мощность $P_э$ и температура выдержки T . Рабочий ток индуктора I_p определялся штатным амперметром с пределом измерения от 120 до 830 А (точность измерения ± 1 А) и определялся как 16:1 тока индуктора $I_{инд}$ (Рис. 1а). Ток-овые клещи (model «UT201», UNITREND GROUP Ltd.) использовались для контроля потребляемого тока I_p с пределом измерения до 20 А и до 200 А (в зависимости от интенсивности процесса ИТО). Электрическая мощность $P_э$, потребляемая устройством ИТО, определялась произведением действующего напряжения на величину потребляемого тока I_p .

ИТО титановых дисков осуществлялась в температурном диапазоне от 950 до 1750 °С, при этом верхний диапазон 1700-1750 °С сопровождался оплавлением и частичным разрушением образцов (выплески титана через оксидную оболочку с формированием визуально наблюдаемых пустот). Контроль температуры нагреваемых образцов в диапазоне от комнатной +18...+25 °С до +1100 °С (+1650 °С) производился бесконтактным методом с применением инфракрасного (IR) пирометра (model «DT-8828», CEM Instruments) и высокотемпературного IR пирометра (model «MS6550B», Precision Mastech) соответственно. В диапазоне нагрева титановых дисков от 550-600 °С до 1000-1050 °С (светло-желтый цвет) и до 1200-1400 °С (ярко-белый цвет) использовалась оптическая фотокамера (model «Canon PowerShot A2400»). Это ис-

ключило необходимость точного установления коэффициента черноты, который у титана определялся степенью окисления (толщиной сформированного покрытия или

толстой окалины). В данном случае контроль температуры титановых образцов осуществлялся с применением цветовой шкалы каления (рис. 1 в) [8].



Рис. 1. Общий вид установки ВЧ15-А (а), контроль потребляемого тока от электрической сети при ИТО (б) и компоновка системы «индуктор-изделие» (в): 1 – водоохлаждаемый трехвитковый индуктор; 2 – токовые клещи; 3 – кварцевая трубчатая камера для ИТО (вертикальное открытое исполнение); 4 – обрабатываемый образец при высокотемпературной ИТО (яркое свечение)

Математическая обработка экспериментальных данных предусматривала построение регрессионных зависимостей в программном пакете DataFit 9 при условии того, что относительная погрешность расчета не будет превышать 2,5 %. Это связано с тем, что используемые средние значения тока индуктора $I_{\text{инд}}$, электрической мощности $P_{\text{э}}$ и температуры выдержки T определялись с относительной погрешностью измерения 5 %.

Результаты исследований

Были проведены замеры тока индуктора и потребляемой электрической мощности. На основании экспериментальных данных представлена ватт-амперная характеристика для тока индуктора $I_{\text{инд}}$ и электрической

мощности $P_{\text{э}}$, потребляемой устройством индукционного нагрева (табл. 1).

Таблица 1. Электротехнологические параметры процесса ИТО

Электрическая мощность $P_{\text{э}}$	Ток индуктора $I_{\text{инд}}$
кВт	кА
0,21	2,7
0,25	2,9
0,32	3,2
0,49	3,6
0,61	3,9
0,74	4,2
0,95	4,5

Типовая характеристика процесса ИТО для выходного параметра Y от входного значения X была представлена линейным уравнением пропорционально-логарифмического типа:

$$Y = a + b \cdot \ln(X), \quad (1)$$

где a, b – весовые коэффициенты модели, которые были достоверными согласно рассчитанным значениям t -критерия (условие $P(t) \rightarrow 0$). Проверка адекватности выбранного типа модели выполнялась с применением F -критерия (условие $P(F) \rightarrow 0$).

С учетом рассчитанных значений весовых коэффициентов модели характеристика « $P_{\Sigma} - I_{инд}$ » для тока индуктора $I_{инд}$ и электрической мощности P_{Σ} , потребляемой устройством индукционного нагрева, имела следующий вид:

$$I_{инд} = 4,5216 + 1,1779 \cdot \ln(P_E). \quad (2)$$

В графическом виде ватт-амперная характеристика представлена кривой, которая умеренно возрастала с увеличением электрической мощности (рис. 2).

Таблица 2. Весовые коэффициенты и критериальная оценка модели (2)

Переменная	Значение	Стандартное отклонение	t -критерий Стьюдента	Вероятность $P(t)$
a	4,5216	$3,33 \times 10^{-2}$	135,96	0,0
b	1,1779	$3,45 \times 10^{-2}$	34,14	0,0
R^2	0,996	–	–	–
F -критерий Фишера	1165,37	–	–	0,0

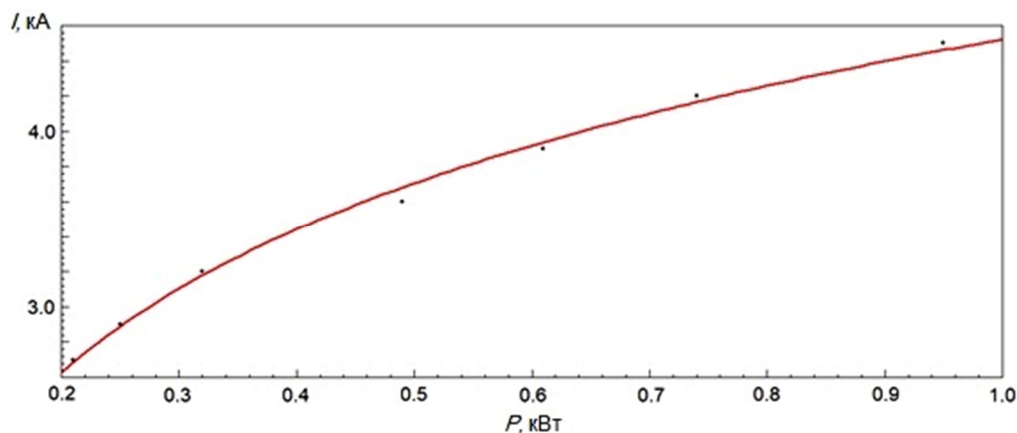


Рис. 2. Ватт-амперная характеристика процесса ИТО титановых дисков

Таким образом, установленная пропорционально-логарифмическая закономерность изменения тока индуктора в рассмотренном диапазоне измерения параметров была обусловлена процессами нагрева образца, являющегося частью системы «индуктор – титановый диск». Представлены результаты измерений температуры при определенных значениях электрической мощности (табл. 3).

Возрастание потерь на излучение и формирование функционально-градиент-

ной структуры, а именно оксидного покрытия с нано- и субмикроразмерными кристаллами и порами, на поверхности титанового образца оказало влияние на температурные зависимости « $P_{\Sigma} - T$ » и « $I_{инд} - T$ » [18]. Снижение эффективности индукционного нагрева при увеличении энергетической напряженности процесса ИТО связано с интенсификацией процесса теплоотдачи. Рассматриваемые зависимости были также представлены выражением пропорционально-логарифмического типа (1).

Таблица 3. Средние значения температуры образцов при ИТО

Электрическая мощность $P_Э$	Средняя величина температуры выдержки T
кВт	°C
0,21	950
0,25	1050
0,32	1200
0,49	1400
0,61	1550
0,74	1650
0,95*	1750

* – наблюдалось оплавление с последующим разрушением.

Таблица 4. Весовые коэффициенты и критериальная оценка модели (3)

Переменная	Значение	Стандартное отклонение	t -критерий Стьюдента	Вероятность $P(t)$
a	1804,15	13,73	131,41	0,0
b	543,06	12,70	42,78	0,0
R^2	0,997	–	–	–
F-критерий Фишера	1829,67	–	–	0,0

С учетом рассчитанных значений весовых коэффициентов модели (табл. 4), зависимость « $P_Э – T$ » для температуры T при выдержке титановых образцов-дисков от величины электрической мощности $P_Э$ имела следующий вид:

$$T = 1804,15 + 543,06 \cdot \ln(P_E). \quad (3)$$

В графическом виде зависимость « $P_Э – T$ » представлена кривой, которая умеренно возрастала вплоть до температуры плавления титана (около 1670 °C) с увеличением электрической мощности (рис. 3).

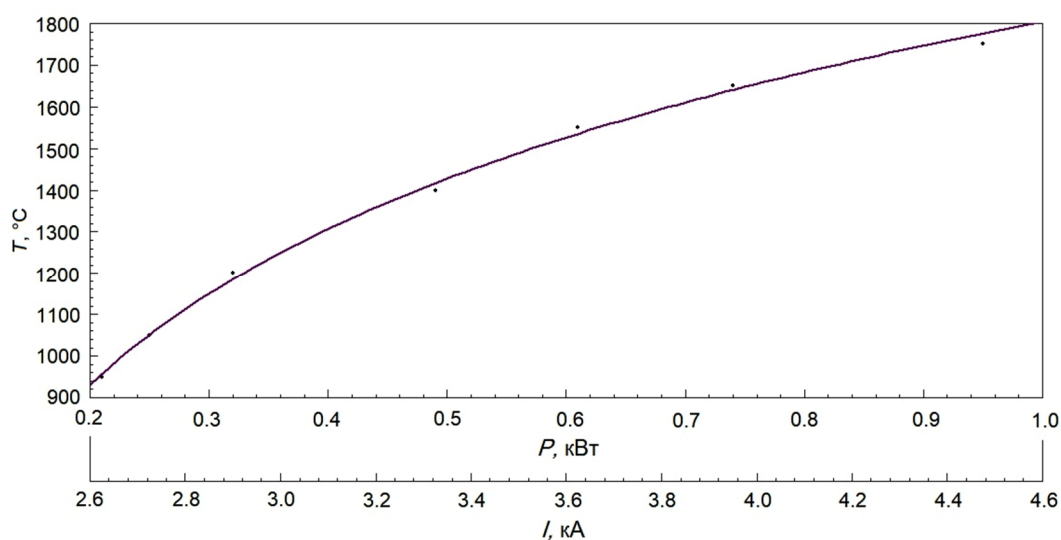


Рис. 3. Зависимость « $P_Э – T$ » при ИТО титановых образцов-дисков

Зависимость « $I_{\text{инд}} - T$ » для процесса ИТО титановых образцов-дисков от тока индуктора $I_{\text{инд}}$, выбранного основным фактором электротехнологического процесса ИТО в рабочем частотном диапазоне (88 ± 2 кГц) и массогабаритных параметров обрабатываемых титановых образцов-дисков в системе «индуктор-изделие» представлена в табличном виде (табл. 5).

Похожим образом была представлена зависимость « $I_{\text{инд}} - T$ » для процесса ИТО титановых образцов-дисков от основного

электротехнологического фактора – тока индуктора $I_{\text{инд}}$.

С учетом рассчитанных значений весовых коэффициентов модели зависимость « $I_{\text{инд}} - T$ » приняла следующий вид:

$$T = -665,25 + 1615,51 \cdot \ln(I_{\text{инд}}). \quad (4)$$

В графическом виде зависимость « $I_{\text{инд}} - T$ » представлена кривой, которая квазипропорционально возрастала вплоть до температуры плавления титана ($\approx 1670^\circ\text{C}$) с увеличением электрической тока индуктора (рис. 4).

Таблица 5. Средние значения температуры выдержки от тока индуктора

Ток индуктора $I_{\text{инд}}$, кА	Температура выдержки T , $^\circ\text{C}$
2,7	950
2,9	1050
3,2	1200
3,6	1400
3,9	1550
4,2	1650
4,5	1750

Таблица 6. Весовые коэффициенты и критериальная оценка модели (4)

Переменная	Значение	Стандартное отклонение	t -критерий Стьюдента	Вероятность $P(t)$
a	665,25	38,72	-17,18	0,0
b	1615,51	32,01	50,47	0,0
R^2	0,998	—	—	—
F-критерий Фишера	2547,47	—	—	0,0

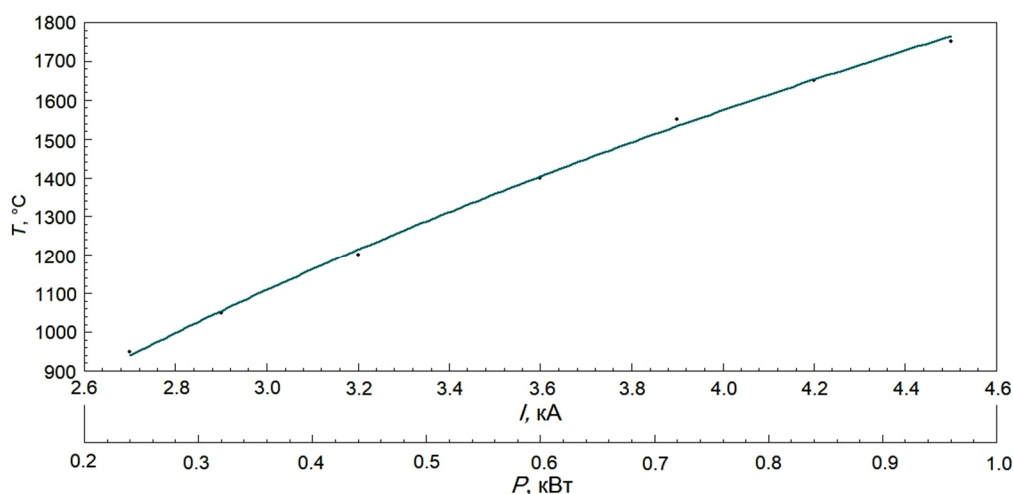


Рис. 4. Графическая зависимость « $I_{\text{инд}} - T$ » для температуры выдержки T титановых образцов-дисков

Характер изменения полученных регрессионных зависимостей определялся также при меньших значениях электрической мощности $P_{\text{э}}$ и тока индуктора $I_{\text{инд}}$ (рис. 2-4). Экстраполяция выполнялась до значений параметров $P_{\text{э}} \approx 0,1$ кВт и $I_{\text{инд}} \approx 2,2$ кА, что соответствовало минимальной температуре

процесса ИТО около $T = 600$ °С. Рассчитанные данные по выявленным зависимостям сопоставлялись с ранее полученными экспериментальными значениями в температурном диапазоне 600-1200 °С. В графическом виде общие закономерности (1)-(3) имели следующий вид (рис. 5).

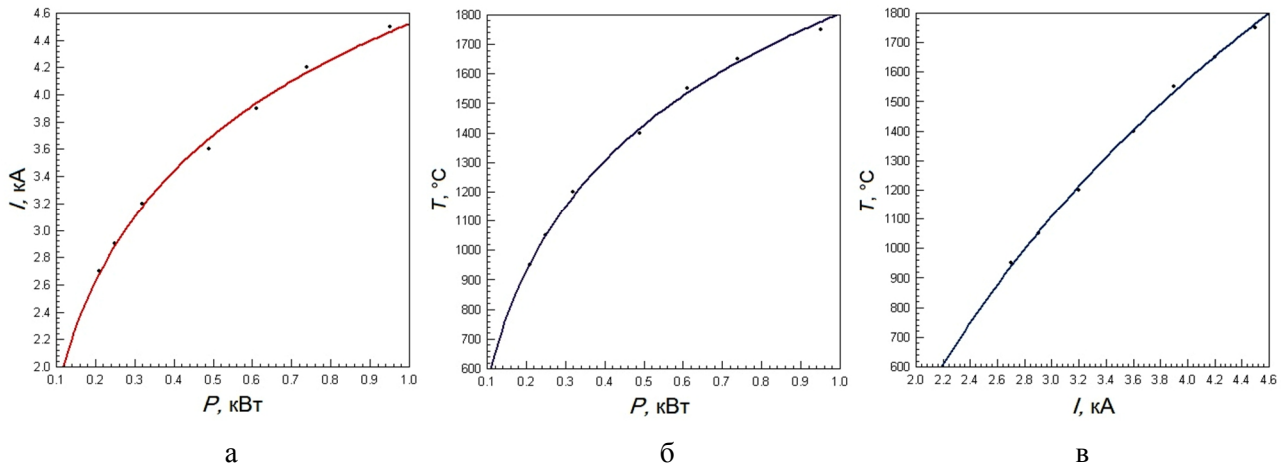


Рис. 5. Графические зависимости « $P_{\text{э}} - I_{\text{инд}}$ » (а), « $P_{\text{э}} - T$ » (б) и « $I_{\text{инд}} - T$ » (в) с учетом их экстраполяции для электротехнологического процесса ИТО титановых образцов-дисков ($D = 14$ мм, $h = 2$ мм) для трехвиткового индуктора

В ранее выполненных исследованиях было показано, что для процессов термической активации титановой основы требуется более низкая температура, в частности $T = 600-800$ °С [16, 17]. Для рассмотренной системы «индуктор-титановый диск» данный диапазон температуры будет достигаться при электрической мощности $P_{\text{э}} = 0,11-0,16$ кВт и токе индуктора $I_{\text{инд}} = 2,2-2,5$ кА, соответственно. Таким образом, в результате эксперимента были

установлены зависимости пропорционально-логарифмического типа. Наиболее удобной для практического использования является зависимость « $I_{\text{инд}} - T$ », так как график этой зависимости по своему внешнему виду напоминает прямую линию.

Статья подготовлена за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-33-90053 Аспиранты).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности нагрева волноводов при передаче сверхвысокочастотных сигналов большой мощности / И.В. Кудрявцев, О.Б. Гоцелюк, Е.С. Новиков, В.Г. Дёмин // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 1. С. 220-225.
2. **Щербаков А.В.** Современные тенденции развития электрооборудования для прецизионной электронно-лучевой сварки и размерной обработки // Электротехника. 2010. № 3. С. 42-48.

3. Разновидности электрофизических методов обработки: учеб. пособие / Ю.Н. Поляничков, А.Г. Схиртладзе, А.Н. Воронцова и др. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 240 с.
4. Патент № 2202629 Российская Федерация, МПК C21D 8/00, C22F 1/18. Способ упрочнения титановых сплавов (варианты): № 2000111458/02 / Муравьев В.И., Меркулов В.И., Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л., Макаров К.А. Заявл. 10.05.00: опубл. 20.04.03. 8 с.

5. **Иванов В.Н., Никитин Б.М., Червинский В.И.** Высоочастотные электро-технологии. Состояние, проблемы, перспективы. Ч. 1 // Инновации. 2014. № 5 (187). С. 105-111.

6. **Щукин В.Г. Марусин В.В.** Синтез алюминидов никеля на стальной подложке при высокоэнергетической индукционной обработке // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2009. № 10. С. 140-150.

7. **Безменов Ф.В., Зимин Н.В.** Анализ и оптимизация технологических параметров индукционной поверхностной закалки цилиндрических деталей аналитическими методами решения электротепловых задач // Металлообработка. 2009. № 5. С. 18-27.

8. Влияние процесса окисления и модификации поверхности при обработке токами высокой частоты на кинетику нагрева титана / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1. С. 73-82.

9. **Вейко В.П., Слободов А.А., Одицова Г.В.** Применение метода химической термодинамики при анализе лазерного термохимического воздействия на металлы // Приборостроение. 2014. № 6. С. 58-65.

10. High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides / J. Dai, J. Zhu, C. Chen, F. Weng. // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 685. P. 784-798.

11. **Молодечкин М.О., Богущ В.А.** Особенности формирования и свойства пленок диоксида // Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2015. № 8(94). С. 93-98.

12. **Fomin A.A., Egorov I.S., Shelkunov A.Yu.** Submicrometric structure of superhard oxide coatings on the surface of refractory metals treated with high-frequency currents // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10716. P. 107161O-1-107161O-6.

13. Сверхтвердые оксидные покрытия, получаемые на титане при обработке токами высокой частоты / А.А. Фомин, М.А. Фомина, И.В. Родионов и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Вып. 18. С. 89-95.

14. Сверхтвердые оксидные покрытия и особенности их получения на титане обработкой токами высокой частоты / А.Ю. Щелкунов, И.С. Егоров, М.А. Фомина и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 60-64.

15. **Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л.** Формирование на поверхности титана износостойкого нанокристаллического слоя, упрочненного частицами TiO₂ (рутила) // Физика металлов и металловедение. 2013. № 9 (114). С. 859-868.

16. 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.

17. **Fomin A.** Superhard titania coatings produced on titanium using induction heat treatment // Ceramics International. 2019. Vol. 45(7). P. 8258-8264.

18. **Lupi S., Forzan M., Aliferov A.** Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling. New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing, 2015. 370 с.

Щелкунов Андрей Юрьевич – аспирант кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey Yu. Shchelkunov – Postgraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 26.01.22, принята к опубликованию 17.02.22

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.385

ПРИЗМАТИЧЕСКИЙ ТРЕХАЗОРНЫЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ

А.Ю. Мирошниченко, М.А. Чернышев, В.А. Царев, Н.А. Акафьева

PRISMATIC THREE-GAP RESONATOR FOR LOW-VOLTAGE MULTIBEAM KLYSTRONS

A.Yu. Miroshnichenko, M.A. Chernyshev, V.A. Tsarev, N.A. Akafyeva

В статье представлены результаты трехмерного моделирования миниатюрного многоканального трехазорного клистронного резонатора. Отличительной особенностью конструкции является применение полосковых резонансных проводников, расположенных на диэлектрической подложке. Исследован спектр резонансных частот резонатора, рассчитаны основные электродинамические и электронные параметры. Исследовано влияние параметров диэлектрика подложки на электродинамические характеристики. Получены рекомендации по применению резонатора в усилительных и генераторных приборах клистронного типа. Такие резонаторы могут найти применение в низковольтных малогабаритных приборах клистронного типа для подвижных и наземных средств связи и телекоммуникации, работающих как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазонах.

Ключевые слова: трехазорный резонатор, миниатюрный многолучевой клистрон, диэлектрическая подложка, полосковый проводник, электродинамические параметры

The article presents the results of three-dimensional modeling of a miniature multi-channel three-gap klystron resonator. A distinctive feature of the design is the use of strip resonant conductors located on a dielectric substrate. The resonant frequency spectrum of the resonator has been studied, and the main electrodynamic and electronic parameters have been calculated. The influence of the parameters of the substrate dielectric on the electrodynamic characteristics has been studied. Recommendations on the use of the resonator in amplifying and generator devices of the klystron type are received. Such resonators can be used in low-voltage small-sized klystron-type devices for mobile and terrestrial communications and telecommunications, operating both in the centimeter and millimeter ranges.

Keywords: three-gap resonator, miniature multibeam klystron, dielectric substrate, strip conductor, electrodynamic parameters

Введение

В последние годы расширяется сфера использования многолучевых клистронов (МЛК), которые находят свое применение в качестве усилителей и генераторов в современных подвижных и наземных средствах связи, системах радиолокации и навигации, в различных установках народнохозяйственного назначения, в ускорителях заряженных частиц [1]. Особое внимание уделяется разработке миниатюрных многолучевых клистронов (ММЛК), которые могут найти применение в бортовых радиосистемах связи, навигации, малогабаритных РЛС. При этом такие приборы имеют более низкое ускоряющее напряжение и сниженные массогабаритные параметры [2, 3].

Важным элементом конструкции любого клистронного усилителя и генератора является его резонансная система, от параметров которой во многом зависят выходные характеристики прибора в целом. Полоса усиливаемых частот, коэффициент усиления, выходная мощность и массогабаритные параметры многолучевых клистронов в значительной мере зависят от конструкции и параметров применяемых резонаторов.

При этом для продвижения вверх по диапазону частот использование однозачорных резонаторов становится неэффективным вследствие ухудшения таких параметров как эквивалентное сопротивление $Re = \rho Q_n$, где ρ – волновое сопротивление резонатора, Q_n – его нагруженная добротность [4]. Наиболее эффективным решением в этом случае является применение двух- и трехзачорных резонаторов.

Кроме того, одним из путей миниатюризации подобных резонансных систем является применение резонансных отрезков полосковых линий, расположенных на подвешенной в корпусе резонатора диэлектрической подложке. В таких резонаторах удастся миниатюризировать резонансную систему в целом, получить возможность работы на новых резонансных частотах.

Объемные резонаторы с применением диэлектрических включений или на основе диэлектрических материалов в настоящее время широко используются в СВЧ-устройствах

[5]. При этом диэлектрические элементы резонансных систем выполняют из высокодобротных керамических материалов с относительной диэлектрической проницаемостью от 3 до 120. Разрабатываемые диэлектрические и керамические резонаторы имеют регулируемые значения ТКЧ около нуля, что достигается за счет принципа термокомпенсации температурных изменений линейных размеров диэлектрика температурным изменением его относительной диэлектрической проницаемости.

В связи с активной разработкой новых типов диэлектрических материалов в России и за рубежом [6, 7] появляется возможность использовать их при разработке новых типов резонансных систем, применяемых в приборах клистронного типа [8]. В настоящее время резонансные системы для приборов клистронного типа с диэлектрическими вставками мало исследованы.

Целью исследований, представленных в настоящей работе, являлось трехмерное электромагнитное моделирование призматического многоканального трехзачорного резонатора с полосковыми элементами на диэлектрической подложке и оценка перспектив его использования в многолучевых низковольтных приборах клистронного типа.

Конструкция резонатора

Конструкция резонатора приведена на рис. 1.

Он состоит из призматического корпуса 1, образующего объемный резонатор, внутри которого расположены два центральных электрода 2, которые совместно с боковыми электродами 3 образуют три высокочастотных зазора. Центральные и боковые электроды имеют форму шестигранных призм и имеют по 18 каналов 6 для пролета электронного потока. Центральные электроды резонатора закреплены на трех керамических подложках 4, на которых также размещены с двух сторон полосковые линии 5. Керамические подложки размещены друг относительно друга в корпусе резонатора под углом 120°. Один конец полосковых линий закреплен на внутренней стенке объемного резонатора, а другой – соединен с центральными электродами.

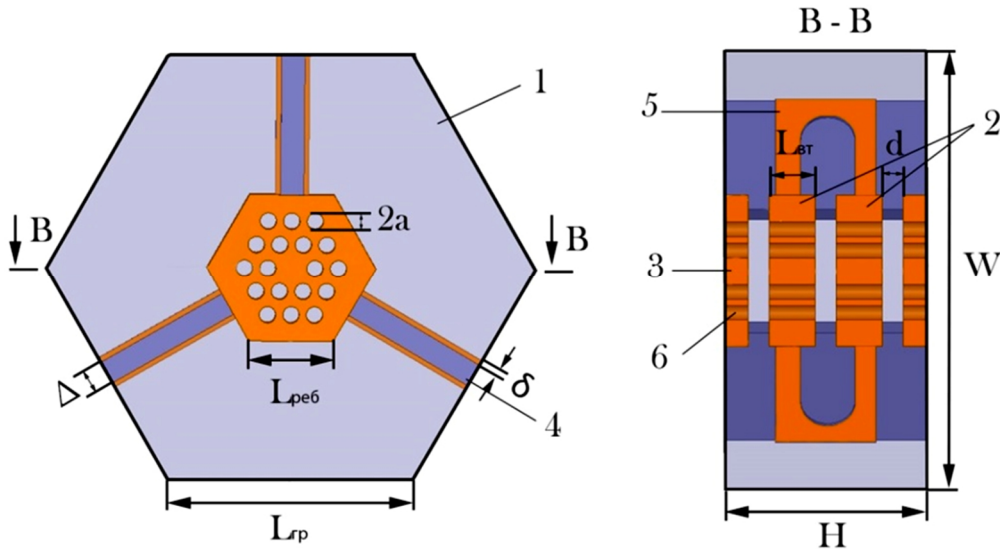


Рис. 1. Конструкция резонатора

Полосковые линии, расположенные на диэлектрической подложке, представляют собой двухпроводную систему, которая может быть возбуждена двумя способами, если ее длина равна или кратна нечетному числу четвертей волн. Первый способ возбуждения – противофазный. Второй

способ возбуждения – синфазный. Оба вида колебаний (синфазный и противофазный) могут существовать одновременно и независимо друг от друга на одном двухпроводном колебательном контуре. Основные размеры резонатора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные размеры резонатора

H , мм	$L_{гр}$, мм	$L_{реб}$, мм	a , мм	d , мм	$L_{вт}$, мм	W , мм	Δ , мм	δ , мм
9,6	10,4	3,6	0,35	1,0	2,2	20,8	1,0	0,2

Результаты моделирования

Для расчета электродинамических параметров резонатора использовался метод конечных разностей во временной области. Надо отметить, что в подобных резонансных системах возможно возбуждение множества резонансных частот. На рис. 2 представлен спектр резонансов трехзачорного резонатора в диапазоне до 20 ГГц. Из рисунка видно, что спектр имеет неравномерное заполнение, в области 5-8 ГГц расположены три моды, следующее сгущение спектра наблюдается в области 12 ГГц, затем 15 ГГц и т. д. Несмотря на достаточно высокую добротность высших мод, с практической точки зрения нас будут интересовать только моды (см. табл. 2), имеющие локализован-

ные в зазорах высокочастотное электрическое поле и, соответственно, наилучшее взаимодействие с электронным потоком. Этим условиям удовлетворяют низшие три моды π , $3\pi/2$ и 2π .

Результаты расчетов электродинамических параметров приведены в табл. 2.

Из результатов расчета можно сделать вывод, что среди трех исследованных мод наибольшее характеристическое сопротивление – у низшего противофазного вида колебаний (π мода). При этом относительная напряженность высокочастотного поля в зазорах неравномерна, максимальна во втором зазоре, в первом зазоре она составляет 50 % от напряженности во втором зазоре, а в третьем зазоре – 45 % от амплитуды во втором зазоре.

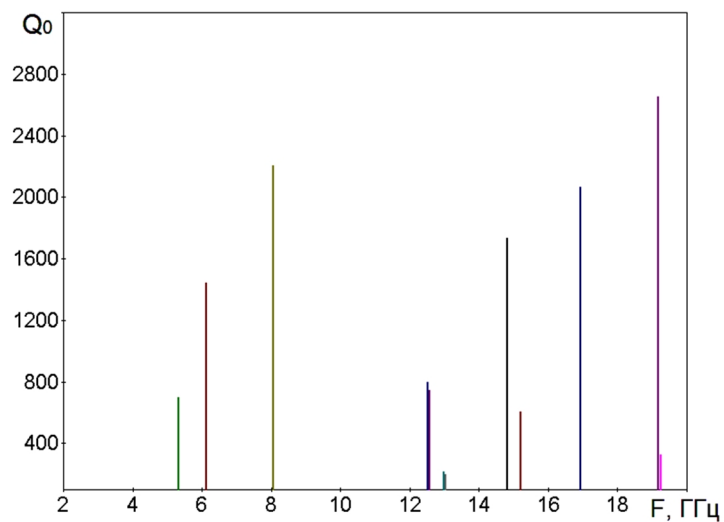


Рис. 2. Спектральные характеристики резонатора

Таблица 2. Основные электродинамические параметры резонаторов

Номер моды	Тип моды	Частота, ГГц	Распределение поля в зазоре резонатора	Собственная добротность Q	Характеристическое сопротивление ρ
$\varepsilon = 5,7$					
1	π	5,334		705	173
2	$3\pi/2$	6,097		1426	139
3	2π	8,028		2193	96

Следующий тип колебаний резонатора ($3\pi/2$) имеет практически отсутствующее поле во втором зазоре, при этом в первом и третьем зазорах амплитуда поля близка по значениям. В этом случае взаимодействие с электронным потоком на этой моде будет происходить только в крайних высокочастотных зазорах резонатора. Третий тип колебаний резонатора синфазный (2π), имеет наиболее равномерное поле в зазорах. Добротность на этом виде колебаний максимальна среди трех рассмотренных мод, при этом характеристическое сопротивление ниже, чем на двух предыдущих частотах.

Исследование электродинамических характеристик резонатора в зависимости от диэлектрической проницаемости подложек

В работе проведено исследование основных электродинамических параметров резонатора – резонансной частоты, собственной добротности, характеристического сопротивления от изменения диэлектрической проницаемости диэлектрических подложек. Для моделирования в работе использовались параметры ряда материалов с малыми высокочастотными потерями и различными диэлектрическими проницаемостями (например, алмаз, керамика Al_2O_3

и др.). Результаты моделирования представлены на рис. 3-5.

На рис. 3 представлена зависимость частоты от изменения диэлектрической проницаемости. Частотные характеристики линейны для трех вышеуказанных мод. При увеличении ϵ резонансные частоты уменьшаются, причем угол наклона характеристик для π и $3\pi/2$ моды практически одинаков, для 2π моды наблюдается более резкое уменьшение резонансной частоты.

Рис. 4 иллюстрирует зависимости добротности резонатора при изменении диэлектрической проницаемости. В этом случае также можно отметить разную чувствительность резонансных мод к изменению ϵ . Максимальное уменьшение добротности при увеличении ϵ наблюдается для синфазного типа колебаний, менее чувствительны моды $3\pi/2$ и π .

На рис. 5 приведены результаты расчета характеристического сопротивления резонатора, которое определялось по методу возмущающего тела, вводимого в канал резонатора. Из рисунка видно, что все три исследуемые моды «реагируют» на изменение диэлектрической проницаемости подложки. При этом зависимость для противофазного типа имеет меньший угол наклона и более линейна по сравнению с модами 2π и $3\pi/2$.

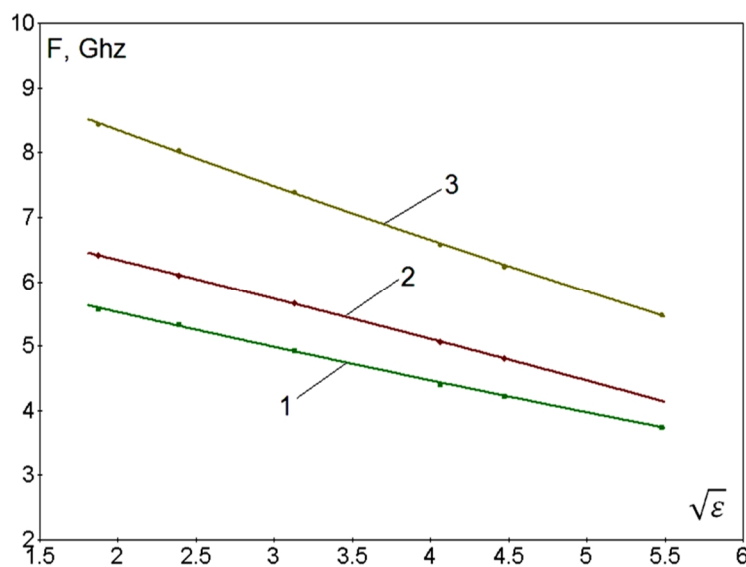


Рис. 3. Зависимости резонансных частот резонатора от диэлектрической проницаемости подложки: 1 – π мода; 2 – $3\pi/2$ мода; 3 – 2π мода

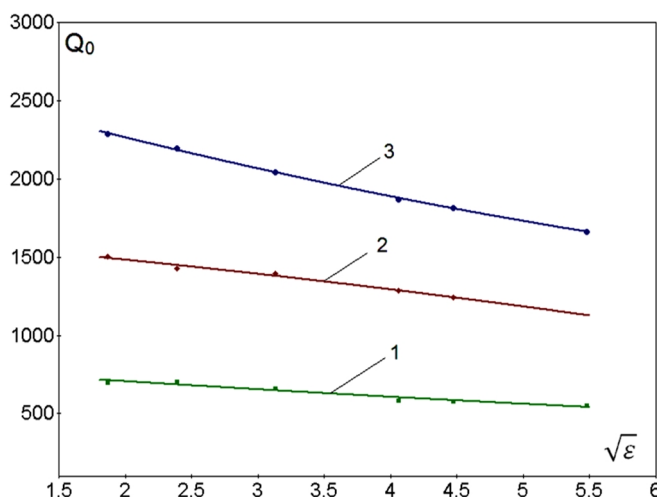


Рис. 4. Зависимость добротности резонатора от диэлектрической проницаемости подложки: 1 – π мода; 2 – $3\pi/2$ мода; 3 – 2π мода

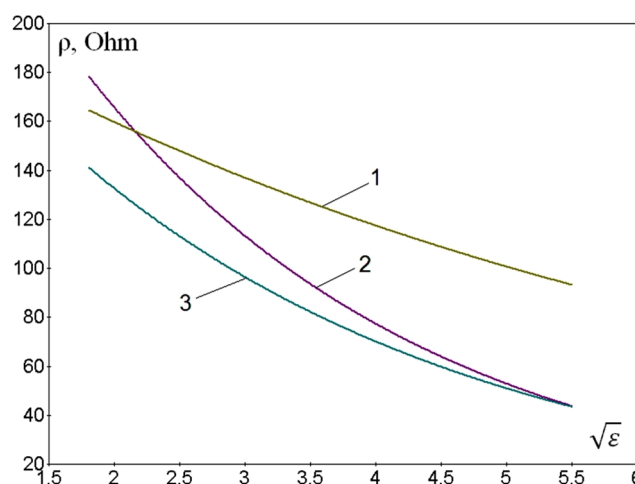


Рис. 5. Зависимость характеристического сопротивления резонатора от диэлектрической проницаемости подложки: 1 – π мода; 2 – $3\pi/2$ мода; 3 – 2π мода

По результатам исследования диэлектрической проницаемости можно отметить, что большая чувствительность параметров F , Q_0 , ρ для синфазной моды можно объяснить тем, что высокочастотное электрическое поле в этом случае сосредоточено в объемной части призматического резонатора, где расположены диэлектрические подложки.

Расчет электронных параметров резонатора

Для вычисления электронных параметров, таких как относительная электронная проводимость G_e/G_0 и коэффициент связи M , использовался известный метод Вессель-Берга. Результаты расчета электронных параметров приведены на рис. 6 и 7, где рис. 6

иллюстрирует зависимости модуля коэффициента взаимодействия с электронным потоком, а на рис. 7 приведены зависимости относительной электронной проводимости.

Из полученных результатов можно сделать выводы, что для противофазной моды (π вид) колебаний оптимальное ускоряющее напряжение клистрона для работы в усилительном режиме при наибольшем значении M и отсутствии самовозбуждения ($G_e/G_0 > 0$) составляет 2,8-3,3 кВ. Для моды $3\pi/2$ усилительный режим можно обеспечить при более высоком ускоряющем напряжении (6,5-7,5 кВ), а для 2π моды усилительный режим в области выбранных ускоряющих напряжений не является оптимальным.

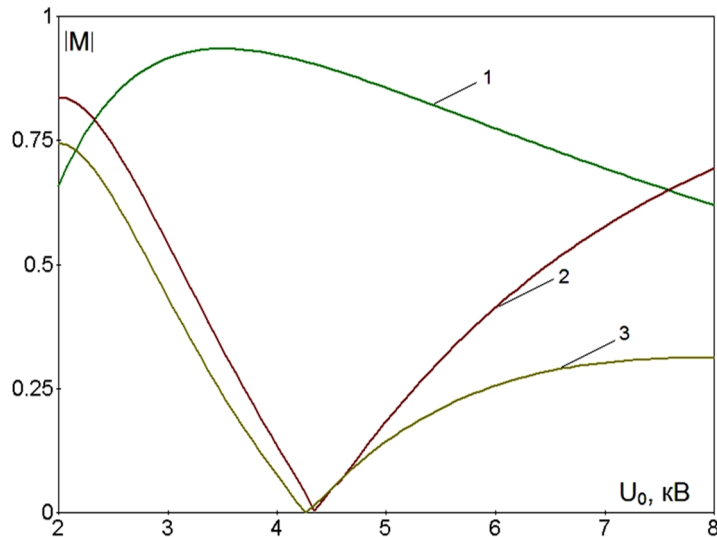


Рис. 6. Зависимости коэффициента взаимодействия от ускоряющего напряжения:
1 – π мода; 2 – $3\pi/2$ мода; 3 – 2π мода

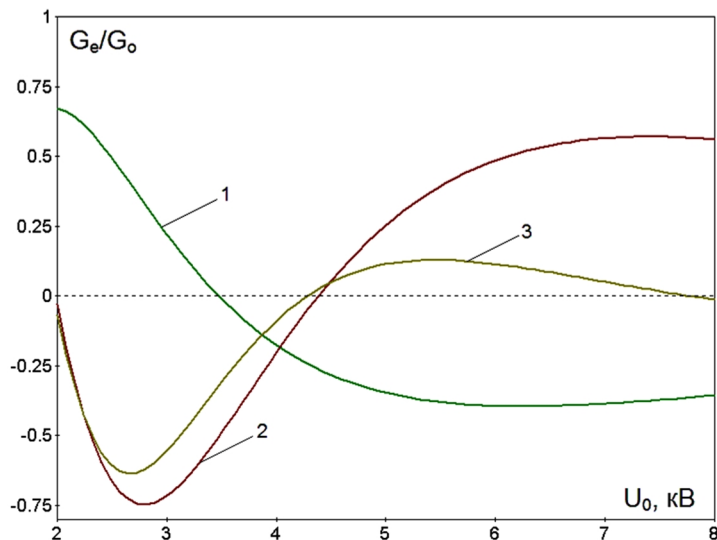


Рис. 7. Зависимости относительной электронной проводимости от ускоряющего напряжения: 1 – π мода; 2 – $3\pi/2$ мода; 3 – 2π мода

Для работы в автоколебательном режиме при ($G_e/G_0 < 0$) можно использовать все три моды, при этом для π моды оптимальное ускоряющее напряжение будет составлять 3,7-4,4 кВ, а для $3\pi/2$ и 2π мод – 2,7-3 кВ.

Рассчитанные зависимости, представленные на рис. 6 и 7, позволяют выбрать величину ускоряющего напряжения для конкретной конструкции прибора, рассчитанной на заданную выходную мощность.

Выходную мощность прибора можно рассчитать по известной формуле

$$P_{\text{вых}} = \eta_{\text{э}} \eta_{\text{к}} p_{\mu 1} N (10^{-6}) U_0^{5/2}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{э}}$ – электронный КПД; $\eta_{\text{к}}$ – контурный КПД; $p_{\mu 1}$ – микроперванс одного луча.

Полагая $\eta_{\text{к}} = 0,9$, $\eta_{\text{э}} = 0,4$, $p_{\mu 1} = 0,015$, $N_l = 18$, $U_0 = 4$ кВ, получаем выходную мощность прибора, рассчитанную по выражению (1) $P_{\text{вых}} = 388$ Вт.

Заключение

Исследован трехзакорный многоканальный призматический клистронный резонатор с тремя диэлектрическими подложками и размещенными на них полосковыми проводниками. Исследован спектр частот и определены основные электроди-

намические параметры в диапазоне до 20 ГГц. Проанализировано поведение основных электродинамических параметров резонатора при изменении диэлектрической проницаемости керамических подложек. Рассчитаны электронные параметры прибора для исследованного резонатора для случая применения в качестве усилителя либо генератора. Исходя из полученных значений выходной мощности, можно отметить, что подобный тип резонатора мо-

жет быть применен в низковольтных малогабаритных клистродах, работающих как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн. Применение таких резонаторов позволит существенно уменьшить массогабаритные параметры миниатюрных многолучевых клистронов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90191.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Muti beam klystrons. Development trends. Vakuumnaya SVCh elektronika / E.A. Gelvich, E.V. Jariy, A.D. Zakurdaev, V.I. Pugnin // Vacuum microwave electronics. Collections of reviews: sbornik obzorov. Nizhniy Novgorod, 2002. P. 54 (in Russian).

2. **Bearzatto C., Bres M., Faillon G.** Advantages of Multiple Beam Klystrons // Vakuumelektronik und Displays: Vortrage der ITG Fachtagung. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 4-5 May 1992. P. 4-32.

3. **Kotov A.S., Gelvich E.A., Zakurdayev A.D.** Small-size complex microwave devices (CMD) for onboard applications // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol. 54. Iss. 5. С. 1049-1053.

4. **Григорьев А.Д.** Многозакорные резонаторы для мощных усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн // Электроника и микроэлектроника

СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: ЛЭТИ, 2014. С. 131-135.

5. **Геворкян В., Кочемасов В.** Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители // Электроника, наука, технология, бизнес. 2016. № 4. 00154.

6. Проспект Material Driven Solutions for RF Microwave Applications компании MCV Microwave. www.mcv-microwave.com

7. ВЧ и СВЧ керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции ООО «Керамика». Санкт-Петербург, 2004. 35 с.

8. Трехзакорный резонатор для миниатюрного многолучевого клистрода (научная статья) / В.А. Царев, А.Ю. Мирошниченко, М.А. Чернышев, Н.А. Акафьева // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. 2021. № 8. С. 1-11. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.7>

Мирошниченко Алексей Юрьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Чернышев Максим Алексеевич – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexey Yu. Miroshnichenko – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Maxim A. Chernyshev – Postgraduate, Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladislav A. Tsarev – Dr.Sc., Professor, Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Акафьева Наталья Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia A. Akafyeva – PhD, Associate Professor, Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.02.22, принята к опубликованию 22.02.22

УДК 681.5.017

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛИЦЫ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ

А.В. Стариков, В.И. Доманов, Е.В. Певчева

MATHEMATICAL MODEL OF A GREENHOUSE AS AN OBJECT OF CONTROL OF AN ELECTRICAL COMPLEX

A.V. Starikov, V.I. Domanov, E.V. Pevcheva

Рассмотрена схема замещения теплицы. Проанализированы основные факторы, влияющие на ее температуру. Показано, что она в основном определяется наружной температурой, объемом и температурой воды в регистрах отопления. Получена нелинейная система уравнений, описывающая процесс формирования температуры в теплице. Выполнена линеаризация этой системы и определены передаточные функции и их параметры.

Ключевые слова: температура, регистр отопления, тепловая энергия, теплоемкость, теплопередача, передаточная функция

Для корректного синтеза регуляторов электротехнического комплекса теплицы необходимо знать его линеаризованную математическую модель в виде структурных схем и передаточных функций. Для получения такой модели необходимо составить уравнения теплового баланса и сохранения энергии между различными средами и элементами, входящими в систему отопления и охлаждения теплицы. Обогрев теплицы осуществляется регистром отопления (РО), управление которым производит электротехнический комплекс, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Насос (Н) обеспечивает циркуляцию воды в контуре регистра отопления. При необходимости увеличения температуры

The equivalent scheme of the greenhouse is considered. The main factors influencing its temperature are analyzed. It is shown that it is mainly determined by the outside temperature, the volume and temperature of the water in the heating registers. A nonlinear system of equations is obtained that describes the process of temperature formation in a greenhouse. This system has been linearized and the transfer functions and their parameters have been determined.

Keywords: temperature, heating register, thermal energy, heat capacity, heat transfer, transfer function

теплоносителя система управления (СУ) подает воздействие на открытие и регулирование трехходового клапана (Кл), и более горячая вода из приходящей сети подмешивается в контур циркуляции. Для регулирования теплоотдачи от теплогасителя к стенам труб регистра отопления скорость вращения насоса регулируется с помощью асинхронного двигателя, управляемого частотным преобразователем. Вид электротехнического комплекса, управляющего циркуляцией воды в РО, приведен на рис. 2.

Для регулирования скорости теплопередачи от регистров отопления воздуху теплицы можно изменять частоту вращения двигателя вентилятора В (рис. 3).

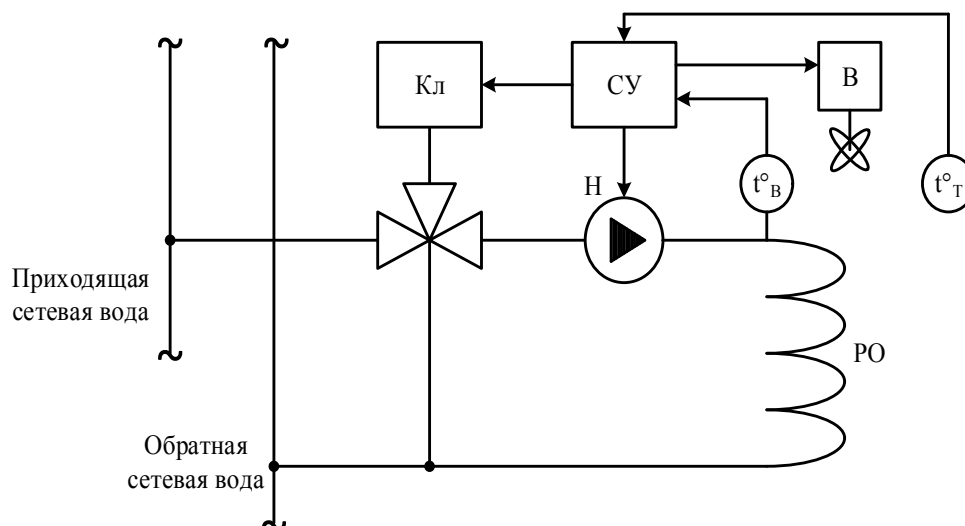


Рис. 1. Функциональная схема электротехнического комплекса управления температурой теплицы



Рис. 2. Электрооборудование системы управления циркуляцией воды в контурах регистров отопления



Рис. 3. Вентилятор теплицы

В качестве основы для разработки модели в данной работе использована модель микроклимата, предложенная в [1]. Модель в непрерывном времени разработана в [1] на основе следующих упрощающих допущений:

1. Модель интерпретирует теплицу как заданный объем воздуха, ограниченный стенами, крышей и основанием (землей). Пространственное распределение переменных, описывающих микроклимат, не учитывается. Данное допущение оправдывается при постоянной конвекции воздуха и принудительной вентиляции.

2. Изменение биомассы растений в процессе их развития рассматривается как внешний фактор, не связанный с показателями микроклимата. Это допущение оправдывается тем, что система управления поддерживает показатели микроклимата согласно требованиям к технологии выращивания культур. Биомасса растений в работе [1] является постоянным значением.

3. Изменения параметров модели во времени происходят настолько медленно, что при описании цикла динамических процессов в системе управления их можно считать постоянными.

В соответствии с этими допущениями модель микроклимата получена как детерминированная и сосредоточенная исходя из соотношений массо- и теплового баланса с приближенным учетом стадий биологического развития растений (форма учета – изменение параметров модели во времени).

Для замкнутой системы уравнение теплового баланса, вытекающее из первого закона термодинамики, определяется формулой [2]:

$$Q_n + Q_o = 0,$$

где Q_n – полученная энергия; Q_o – отданная энергия.

Применительно к внутреннему воздуху теплицы уравнение теплового баланса можно записать следующим образом [3]:

$$m_{в.м} C_{в.м} \frac{dT_m}{dt} = Q_{po} + Q_c + Q_{св} + Q_p - Q_{нар} - Q_u - Q_m - Q_{вен}, \quad (1)$$

где $m_{в.м}$, $C_{в.м}$ и T_m – масса, теплоемкость и температура воздуха внутри теплицы, соответственно; Q_{po} – тепловая мощность, отдаваемая регистром отопления; Q_c – тепловая мощность, передаваемая солнцем воздуху теплицы; $Q_{св}$ – тепловая мощность, передаваемая светотехнической установкой; Q_p – мощность обмена энергией с растениями; $Q_{нар}$ – интенсивность теплового обмена теплицы с наружным воздухом; Q_u – потери энергии за счет суммарного испарения воды растениями; Q_m – потери энергии за счет распыления воды системой тумана; $Q_{вен}$ – интенсивность теплового обмена системой воздушной вентиляции; t – время.

В регистре отопления происходит конвективный теплообмен между жидкостью, циркулирующей в контуре, и стенкой трубопровода. Интенсивность конвективного теплообмена Q для жидкости, протекающей по трубопроводу, характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , который определяется по формуле Ньютона-Рихмана [4]:

$$Q = \alpha (T_{ст} - T_{ж}) F,$$

где $T_{ст}$ и $T_{ж}$ – температуры стенки и жидкости, соответственно; F – площадь поверхности теплообмена.

В соответствии с этим для процесса теплообмена между водой, протекающей в РО, и стенками трубопровода можно записать уравнение теплового баланса (баланса мощности) при стационарном режиме:

$$G_{вд} \rho_{вд} C_{вд} (T_{вд} - T_{вд.вых}) + \alpha_{вд} F_{вн.ро} (T'_{вд} - T'_{ро}) = 0, \quad (2)$$

где $G_{вд}$ – объемный расход воды; $C_{вд}$ – удельная теплоемкость воды; $\rho_{вд}$ – плотность воды; $T_{вд}$ и $T_{вд.вых}$ – средние по сечению значения температур воды на входе

и выходе регистра отопления, соответственно; $\alpha_{\text{с}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам трубок теплообменника; $F_{\text{вн.ро}}$ – внутренняя площадь теплообмена регистра отопления; $T'_{\text{ро}}$ – средняя в объеме температура регистра отопления; $T'_{\text{вд}}$ – средняя в объеме температура воды РО.

Под стационарным режимом понимается задача, когда температуры не меняются во времени.

Целью исследования является определение передаточных функций процесса теплообмена в динамическом, то есть нестационарном режиме, когда температура воды и на входе, и на выходе РО изменяются во времени. При этом следует учесть, что массы воды и трубопровода регистра отопления достигают значительных величин. Изменить мгновенно температуру объекта большой массы невозможно, поэтому уравнение (2) необходимо дополнить членом

$$m_{\text{вд}} C_{\text{вд}} \frac{dT'_{\text{вд}}}{dt}.$$

Тогда уравнение теплового баланса для рассматриваемой среды

$$\begin{aligned} m_{\text{вд}} C_{\text{вд}} \frac{dT'_{\text{вд}}}{dt} = \\ = G_{\text{вд}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд}} - T_{\text{вд.вых}}) - \\ - \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (T'_{\text{вд}} - T'_{\text{ро}}). \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с теорией регулярного режима Кондратьева Г.М. производная температуры по времени в любой точке охлаждаемого тела равна производной средней в объеме температуры [5, 6]. Кроме того, полагая, что в каждом сечении по длине трубопровода РО наблюдается одинаковая разность средних температур воды и материала трубопровода, в (2) можно перейти от средних по объему температур $T'_{\text{вд}}$ и $T'_{\text{ро}}$ к средним температурам $T_{\text{вд.вых}}$ и $T_{\text{ро}}$ в сечении на входе теплообменника. С учетом сказанного выражение (3) переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_{\text{вд}} C_{\text{вд}} \frac{dT_{\text{вд.вых}}}{dt} = \\ = \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд}} - T_{\text{вд.вых}}) G_{\text{вд}} - \\ - \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (T_{\text{вд.вых}} - T_{\text{ро}}). \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение баланса тепла, подведенного к регистру отопления, отданного воздуху теплицы и аккумулированному в материале трубопровода РО, определяется выражением [4]:

$$\begin{aligned} m_{\text{ро}} C_{\text{ро}} \frac{dT_{\text{ро}}}{dt} = \\ = \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (T_{\text{вд.вых}} - T_{\text{ро}}) + \\ + \alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (T_{\text{ро}} - T_{\text{т}}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $C_{\text{ро}}$ – удельная теплоемкость материала трубопровода регистра отопления; $\alpha_{\text{в.т}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенок регистра отопления к воздуху теплицы; $F_{\text{нар.ро}}$ – наружная площадь теплообмена РО; $T_{\text{т}}$ – средняя температура воздуха в теплице.

Необходимо обратить внимание на то, что интенсивность теплообмена между регистром отопления и воздухом представляет собой третья составляющая в (4), то есть

$$Q_{\text{ро}} = \alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (T_{\text{ро}} - T_{\text{т}}). \quad (6)$$

Также следует учесть, что интенсивность теплообмена между наружным воздухом, окружающим теплицу, путем естественной конвекции определяется формулой

$$Q_{\text{нар}} = \alpha_{\text{в.нар}} F_{\text{нар.т}} (T_{\text{т}} - T_{\text{в.нар}}). \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{в.нар}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенок теплицы к наружному воздуху теплицы; $F_{\text{нар.т}}$ – наружная площадь теплообмена теплицы; $T_{\text{в.нар}}$ – температура наружного воздуха.

Объединяя выражения (1), (4)-(6), получим систему уравнений, описывающую процесс формирования средней температуры воздуха в теплице:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\varepsilon.m} C_{\varepsilon.m} \frac{dT_m}{dt} &= Q_{po} + Q_c + Q_{св} + Q_p - Q_{нар} - Q_u - Q_m - Q_{вен}; \\
 m_{\varepsilon\delta} C_{\varepsilon\delta} \frac{dT_{\varepsilon\delta.вых}}{dt} &= G_{\varepsilon\delta} \rho_{\varepsilon\delta} C_{\varepsilon\delta} (T_{\varepsilon\delta} - T_{\varepsilon\delta.вых}) - \alpha_{\varepsilon\delta} F_{\varepsilon\delta.ро} (T_{\varepsilon\delta.вых} - T_{po}); \\
 m_{po} C_{po} \frac{dT_{po}}{dt} &= \alpha_{\varepsilon\delta} F_{\varepsilon\delta.ро} (T_{\varepsilon\delta.вых} - T_{po}) - \alpha_{\varepsilon.m} F_{нар.ро} (T_{po} - T_m); \\
 Q_{po} &= \alpha_{\varepsilon.m} F_{нар.ро} (T_{po} - T_m); \\
 Q_{нар} &= \alpha_{\varepsilon.нар} F_{нар.m} (T_m - T_{\varepsilon.нар}).
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Входными управляющими воздействиями в процессе регулирования температуры воздуха теплицы являются объемный расход воды $G_{\varepsilon\delta}$ в регистре отопления и температура воды на его входе $T_{\varepsilon\delta}$, регулируемой координатой – средняя температура воздуха в теплице T_m . К возмущающим воздействиям следует отнести изменения температуры наружного воздуха $T_{\varepsilon.нар}$ и величин.

Система уравнений (8) показывает, что процесс теплообмена в теплице является существенно нелинейным. Нелинейность определяется, прежде всего, перемножением переменных $G_{\varepsilon\delta}$ и $T_{\varepsilon\delta}$, а также $G_{\varepsilon\delta}$ и $T_{\varepsilon\delta.вых}$. Кроме того, известно, что коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\varepsilon\delta}$ и $\alpha_{\varepsilon.нар}$ являются нелинейными функциями скорости движения соответствующих сред. Тем не ме-

нее для обоснованного синтеза регуляторов электротехнического комплекса теплицы и выбора параметров регуляторов необходимо линеаризованное представление процесса теплообмена как объекта управления.

Предположим, что в районе некоторой рабочей точки с параметрами $G_{\varepsilon\delta 0}$, $T_{\varepsilon\delta 0}$ и $T_{\varepsilon\delta.вых 0}$ процесс характеризуется постоянными коэффициентами теплоотдачи, а величины Q_c , $Q_{св}$, Q_p , $Q_{нар}$, Q_u , Q_m и $Q_{вен}$ имеют постоянные значения. Тогда, переходя в (8) к приращениям, разлагая основные нелинейности в степенной ряд Тейлора и ограничиваясь первыми членами разложения, получим линеаризованную систему уравнений, описывающих динамику процесса изменения средней температуры воздуха теплицы:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\varepsilon\delta} C_{\varepsilon\delta} \frac{d\Delta T_{\varepsilon\delta.вых}}{dt} &= \rho_{\varepsilon\delta} C_{\varepsilon\delta} (T_{\varepsilon\delta 0} - \Delta T_{\varepsilon\delta.вых 0}) \Delta G_{\varepsilon\delta} + \rho_{\varepsilon\delta} C_{\varepsilon\delta} G_{\varepsilon\delta 0} \Delta T_{\varepsilon\delta} - \\
 &- \rho_{\varepsilon\delta} C_{\varepsilon\delta} G_{\varepsilon\delta 0} \Delta T_{\varepsilon\delta.вых} - \alpha_{\varepsilon\delta} F_{\varepsilon\delta.ро} (\Delta T_{\varepsilon\delta.вых} - \Delta T_{po}); \\
 m_{po} C_{po} \frac{d\Delta T_{po}}{dt} &= \alpha_{\varepsilon\delta} F_{\varepsilon\delta.ро} (\Delta T_{\varepsilon\delta.вых} - \Delta T_{po}) - \alpha_{\varepsilon.m} F_{нар.ро} (\Delta T_{po} - \Delta T_m); \\
 m_{\varepsilon.m} C_{\varepsilon.m} \frac{d\Delta T_m}{dt} &= \alpha_{\varepsilon.m} F_{нар.ро} (\Delta T_{po} - \Delta T_m) - \alpha_{\varepsilon.нар} F_{нар.m} (\Delta T_m - \Delta T_{\varepsilon.нар}).
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Заменяя в (9) операцию дифференцирования символом $p = \frac{d}{dt}$, запишем (9) в операторной форме:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{вд}} C_{\text{вд}} p \Delta T_{\text{вд.вых}} &= \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд0}} - \Delta T_{\text{вд.вых0}}) \Delta G_{\text{вд}} + \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}} \Delta T_{\text{вд}} - \\ &- \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}} \Delta T_{\text{вд.вых}} - \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (\Delta T_{\text{вд.вых}} - \Delta T_{\text{ро}}); \\ m_{\text{ро}} C_{\text{ро}} p \Delta T_{\text{ро}} &= \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (\Delta T_{\text{вд.вых}} - \Delta T_{\text{ро}}) - \alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (\Delta T_{\text{ро}} - \Delta T_{\text{т}}); \\ m_{\text{в.т}} C_{\text{в.т}} p \Delta T_{\text{т}} &= \alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (\Delta T_{\text{ро}} - \Delta T_{\text{т}}) - \alpha_{\text{в.нар}} F_{\text{нар.т}} (\Delta T_{\text{т}} - \Delta T_{\text{в.нар}}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Система уравнений (10) позволяет найти передаточные функции процесса изменения средней температуры воздуха теплицы по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям.

Для определения передаточной функции по отношению к изменению управляющего воздействия $\Delta G_{\text{вд}}$ воспользуемся принципом суперпозиции и положим в (10) $\Delta T_{\text{вд}} = 0$, $\Delta T_{\text{в.нар}} = 0$, тогда

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{вд}} C_{\text{вд}} p \Delta T_{\text{вд.вых}} &= \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд0}} - \Delta T_{\text{вд.вых0}}) \Delta G_{\text{вд}} - \\ &- \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}} \Delta T_{\text{вд.вых}} - \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (\Delta T_{\text{вд.вых}} - \Delta T_{\text{ро}}); \\ m_{\text{ро}} C_{\text{ро}} p \Delta T_{\text{ро}} &= \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} (\Delta T_{\text{вд.вых}} - \Delta T_{\text{ро}}) - \alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (\Delta T_{\text{ро}} - \Delta T_{\text{т}}); \\ m_{\text{в.т}} C_{\text{в.т}} p \Delta T_{\text{т}} &= \alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (\Delta T_{\text{ро}} - \Delta T_{\text{т}}) - \alpha_{\text{в.нар}} F_{\text{нар.т}} \Delta T_{\text{т}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из первого уравнения (11) выразим промежуточную переменную $\Delta T_{\text{вд.вых}}$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{вд.вых}} &= \frac{\rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд0}} - \Delta T_{\text{вд.вых0}})}{(\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} + \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}})(\tau_{\text{вд}} p + 1)} \Delta G_{\text{вд}} + \\ &+ \frac{\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}}}{(\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} + \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}})(\tau_{\text{вд}} p + 1)} \Delta T_{\text{ро}} \end{aligned} \quad (12)$$

где $\tau_{\text{вд}} = \frac{m_{\text{вд}} C_{\text{вд}}}{\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} + \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}}}$ – постоянная времени нагрева воды в регистре отопления.

Подставим $\Delta T_{\text{вд.вых}}$ из (12) во второе уравнение (11) и выразим из него промежуточную переменную $\Delta T_{\text{ро}}$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{ро}} &= \frac{\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд0}} - \Delta T_{\text{вд.вых0}})}{k_2 \left[\frac{k_1 \tau_{\text{вд}} \tau_{\text{ро}}}{k_2} p^2 + \frac{k_1 (\tau_{\text{вд}} + \tau_{\text{ро}})}{k_2} p + 1 \right]} \Delta G_{\text{вд}} + \\ &+ \frac{\alpha_{\text{в.т}} F_{\text{нар.ро}} (\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} + \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}})(\tau_{\text{вд}} p + 1)}{k_2 \left[\frac{k_1 \tau_{\text{вд}} \tau_{\text{ро}}}{k_2} p^2 + \frac{k_1 (\tau_{\text{вд}} + \tau_{\text{ро}})}{k_2} p + 1 \right]} \Delta T_{\text{т}} \end{aligned} \quad (13)$$

где $\tau_{po} = \frac{m_{po} C_{po}}{\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} + \alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}}}$ – постоянная времени нагрева трубопровода регистра отопления;

$$k_1 = \alpha_{\text{вд}}^2 F_{\text{вн.ро}}^2 + \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}} + \alpha_{\text{вд}} \alpha_{\text{вт}} F_{\text{вн.ро}} F_{\text{нар.ро}} + \alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}};$$

$$k_2 = \alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}} + \alpha_{\text{вд}} \alpha_{\text{вт}} F_{\text{вн.ро}} F_{\text{нар.ро}} + \alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}}.$$

Подставляя (13) в третье уравнение системы (11), переходя к преобразованиям Лапласа и обозначая $T_m(p) = L\{\Delta T_m\}$, $G_{\text{вд}}(p) = L\{\Delta G_{\text{вд}}\}$, найдем искомую передаточную функцию процесса изменения средней температуры воздуха в теплице T_m по отношению к изменению объемного расхода воды $G_{\text{вд}}$

$$W_G(p) = \frac{T_m(p)}{G_{\text{вд}}(p)} = \frac{k_G}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1}, \quad (14)$$

где

$$k_G = \frac{\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} \alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (T_{\text{вд0}} - \Delta T_{\text{вд.вых0}})}{k_2 k_3 - k_4};$$

$$k_3 = \alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}} + \alpha_{\text{внар}} F_{\text{нар.т}};$$

$$k_4 = \alpha_{\text{вд}}^2 F_{\text{вн.ро}}^2 (\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} + \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}});$$

$$a_0 = \frac{k_3 \tau_{\text{вд}} \tau_{po} \tau_m}{k_2 k_3 - k_4};$$

$$a_1 = \frac{k_1 k_3 (\tau_{\text{вд}} \tau_{po} + \tau_{\text{вд}} \tau_m + \tau_{po} \tau_m)}{k_2 k_3 - k_4};$$

$$a_2 = \frac{k_2 k_3 \tau_m + k_1 k_3 (\tau_{\text{вд}} + \tau_{po}) - k_4 \tau_{\text{вд}}}{k_2 k_3 - k_4};$$

$\tau_m = \frac{m_{\text{вт}} C_{\text{вт}}}{\alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}} + \alpha_{\text{внар}} F_{\text{нар.т}}}$ – постоянная времени нагрева воздуха теплицы.

Аналогичным образом найдем передаточную функцию теплицы по отношению к изменению температуры воды $\Delta T_{\text{вд}}$ на входе в регистр отопления:

$$W_{T_{\text{вд}}}(p) = \frac{T_m(p)}{T_{\text{вд}}(p)} = \frac{k_{T_{\text{вд}}}}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1}, \quad (15)$$

где

$$k_{T_{\text{вд}}} = \frac{\alpha_{\text{вд}} F_{\text{вн.ро}} \alpha_{\text{вт}} F_{\text{нар.ро}} \rho_{\text{вд}} C_{\text{вд}} G_{\text{вд0}}}{k_2 k_3 - k_4}.$$

Проводя преобразования, аналогичные приведенным выше, получим передаточную функцию теплицы по отношению к основному возмущающему воздействию – изменению температуры наружного воздуха

$$W_{T_{\text{внар}}}(p) = \frac{T_m(p)}{T_{\text{внар}}(p)} = \frac{k_{T_{\text{внар}}} (b_0 p^2 + b_1 p + 1)}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + 1}, \quad (16)$$

где

$$k_{T_{\text{вд}}} = \frac{\alpha_{\text{внар}} F_{\text{нар.т}} k_2}{k_2 k_3 - k_4}; \quad b_0 = \frac{k_1 \tau_{\text{вд}} \tau_{po}}{k_2}; \quad b_1 = \frac{k_1 (\tau_{\text{вд}} + \tau_{po})}{k_2}.$$

С учетом полученных передаточных функций (14)-(16) линеаризованную структурную схему тепловых процессов, протекающих в теплице, можно представить следующим образом (рис. 4).

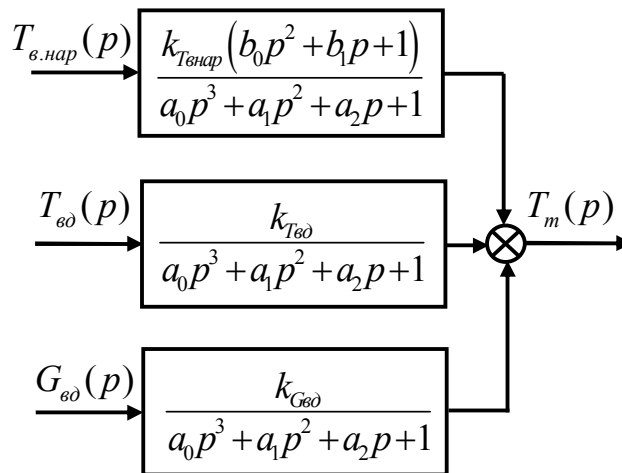


Рис. 4. Линеаризованная структурная схема процесса изменения средней температуры воздуха в теплице

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

- теплица является нелинейным объектом управления, температура которой зависит от большого числа факторов;
- проведенная линеаризация системы уравнений дала возможность получить пе-

редаточные функции по всем основным переменным;

- передаточные функции $W_{Твд}(p)$ и $W_{Гвд}(p)$ различаются только коэффициентами передачи;
- все полученные передаточные функции имеют одинаковый знаменатель.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption / X. Blasco [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. January 2007. Vol. 55. Iss. 1. P. 49-70.
2. Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. Москва: Высшая школа, 1979. 302 с.
3. Семенов В.Г., Крушель Е.Г. Математическая модель микроклимата теплицы // Известия ВолГТУ. 2009. № 6 (54). С. 32-35.

4. Михеев М.А. Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1977. 344 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. Москва: Высшая школа, 1967. 599 с.
6. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. Москва: Гостехтеориздат, 1954. 408 с.

Стариков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Alexander V. Starikov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

Доманов Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

Певчева Елена Викторовна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

Viktor I. Domanov – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Electric Drives and Industrial Plants Automation, Ulyanovsk State Technical University

Elena V. Pevcheva – Postgraduate, Department «Electric Drives and Industrial Plants Automation, Ulyanovsk State Technical University

Статья поступила в редакцию 11.02.22, принята к опубликованию 22.03.22

УДК 621.365.55: 621.314.58

МУЛЬТИГЕНЕРАТОРНАЯ СВЧ-УСТАНОВКА КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА С ЭЛЕКТРОПИТАНИЕМ ОТ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

И.И. Артюхов, Е.К. Пыльская, А.И. Земцов

MULTI-GENERATOR CONVEYOR MICROWAVE INSTALLATION POWERED BY AUTONOMOUS ENERGY SOURCE

I.I. Artyukhov, E.K. Pylskaya, A.I. Zemtsov

Для осуществления широкого спектра технологических процессов применяют СВЧ-установки конвейерного типа. Если эти установки получают электроэнергию от промышленной сети, то применение типовых решений для построения магнетронных генераторов не вызывает проблем. Однако при подключении СВЧ-установки к автономному источнику энергии, например, в виде дизель-генератора, происходит нарушение ее работоспособности. В статье с использованием результатов имитационного моделирования анализируются возникающие проблемы. Предлагаются технические решения, обеспечивающие электромагнитную совместимость дизель-генератора с электрооборудованием СВЧ-установки.

Ключевые слова: СВЧ-установка, система электропитания, дизель-генератор, преобразование энергии, выпрямитель, инвертор, имитационное моделирование

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ-нагрева в термических процессах обусловлены особенностями ее поглощения. СВЧ-энергия преобразуется в тепло внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1]. Области применения СВЧ-нагрева являются деревообрабатывающая, резинотехническая, текстильная, фармацевтиче-

To implement a wide range of technological processes, conveyor-type microwave units are used. If these installations receive electricity from the industrial network, then the use of standard solutions for the construction of magnetron generators does not cause problems. However, when the microwave installation is connected to an autonomous energy source, for example, in the form of a diesel generator, the installation malfunctions. In the article, using the results of simulation modeling, the emerging problems are analyzed. Technical solutions are proposed to ensure the electromagnetic compatibility of the diesel generator with the electrical equipment of the microwave installation.

Keywords: microwave installation, power supply system, synchronous generator, energy conversion, rectifier, inverter, simulation

ская отрасли промышленности [2, 3]. Большое число СВЧ-установок используется, в частности, для термообработки сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, которые обычно содержат много воды и поэтому хорошо поглощают СВЧ-энергию. При этом широкое применение получили установки конвейерного типа [4], в которых СВЧ-энергия распределяется по всему объему установки за счет применения нескольких генераторов СВЧ-колебаний.

Конструкция СВЧ-установки конвейерного типа показана на рис. 1. Основными узлами этой установки являются конвейер с элементами подачи и приема обрабатываемого материала, рабочие камеры с генераторами СВЧ-колебаний и вентиляционная система. Кроме того, конвейер оснащен системой, которая предотвращает утечку СВЧ-энергии за пределы установки. Ленточный конвейер состоит из замкнутого тягового элемента (ленты), являющегося

одновременно и рабочим элементом, который перемещается по стационарным роликовым опорам и огибает направляющие устройства. Верхняя ветвь ленты, на которой расположен груз, движется по стационарным желобчатым роликовым опорам. Нижняя часть ленты (холостая) движется, опираясь на прямые роликовые опоры. Лента приводится в движение от приводного барабана, связанного через передаточный механизм с электродвигателем.

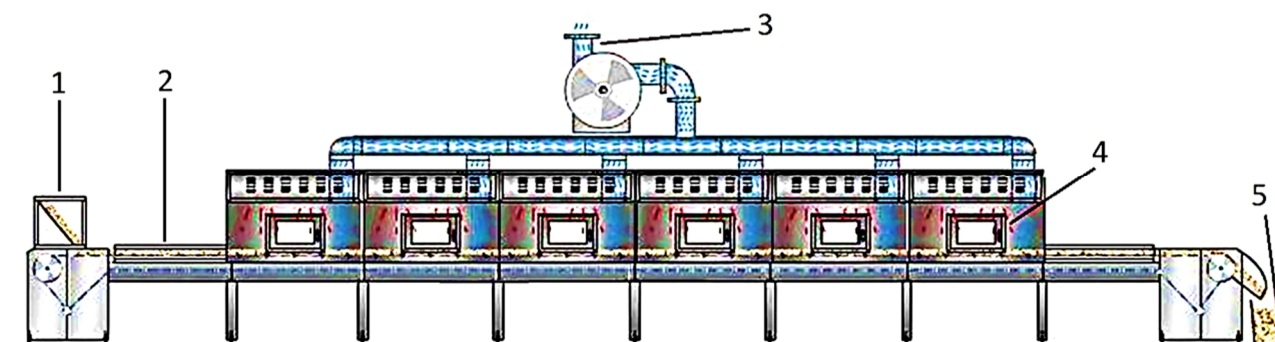


Рис. 1. Конструкция СВЧ-установки конвейерного типа:

- 1 – система подачи обрабатываемого материала на конвейерную ленту;
2 – система гашения микроволн; 3 – вентиляционная система; 4 – камера с генератором СВЧ-колебаний; 5 – система приема материала с конвейерной ленты

Рабочие камеры, оснащенные генераторами СВЧ-колебаний, расположены над конвейерной лентой и образуют туннель. Обрабатываемые продукты перемещаются в туннеле через рабочие камеры и нагреваются до необходимой температуры. В качестве генераторов СВЧ-колебаний наиболее часто применяют магнетроны, работающие на частоте 2450 МГц. Для обеспечения однородного поля магнетроны расположены в шахматном порядке. Электромагнитные волны посылаются через прямоугольные излучающие волноводы в верхней части туннеля.

Во время работы СВЧ-установки конвейерного типа происходит испарение из обрабатываемых продуктов, которое может негативно сказываться на рабочем процессе. Для предотвращения попадания пара внутрь волноводов и обеспечения заданной влажности готового продукта используется система вентиляции с пароотводами.

В [5] подробно исследованы электромагнитные процессы в системе электропи-

тания СВЧ-установок конвейерного типа, когда источником энергии является промышленная сеть 50 Гц. Однако возможны ситуации, когда СВЧ-установка должна работать от автономного источника энергии, например от дизель-генератора (ДГ) или ветрогенератора. При этом возникают опасения, что изменение типа источника энергии может привести к существенному изменению режима работы магнетронов, вплоть до нарушения работоспособности СВЧ-установки.

Из-за нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) магнетрона отклонения напряжения питающей сети от номинального значения приводят к существенным изменениям выходной мощности СВЧ-генератора. Использование ДГ в качестве автономных источников энергии не может обеспечить во многих случаях требуемую стабильность напряжения. Кроме того, сверхпереходное реактивное сопротивление X''_d генератора составляет прибли-

тельно от 10 до 12 % по сравнению с 4 или 5 % для напряжения короткого замыкания трансформатора. Иначе говоря, выходное сопротивление ДГ в 2-3 раза выше, чем у трансформатора той же мощности. Поэтому перевод электропитания СВЧ-установки от промышленной сети на ДГ усугубляет проблему зависимости выходной мощности генераторов от питающего напряжения.

Другой важной задачей является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования СВЧ-установки с ДГ. Хорошо известно, что характеристики ДГ зависят от гармонического состава тока нагрузки. В [6] показано, что высшие гармоники тока являются причиной нагрева генератора и механических вибраций. Вместе с тем электрооборудова-

ние СВЧ-установки является потребителем несинусоидального тока.

На рис. 2 показана схема электропитания СВЧ-установки конвейерного типа, содержащей группу магнетронных генераторов (МГ). Источником питания является синхронный генератор, вал которого приводится во вращение дизельным двигателем.

Для равномерной загрузки источника питания на каждую фазу подключены N магнетронов. Таким образом, общее количество МГ составляет $3N$. Кроме того, в состав электрооборудования СВЧ-установки могут входить преобразователи частоты ПЧ1, ПЧ2 для управления электродвигателями М1, М2 приводов конвейера и вентилятора.

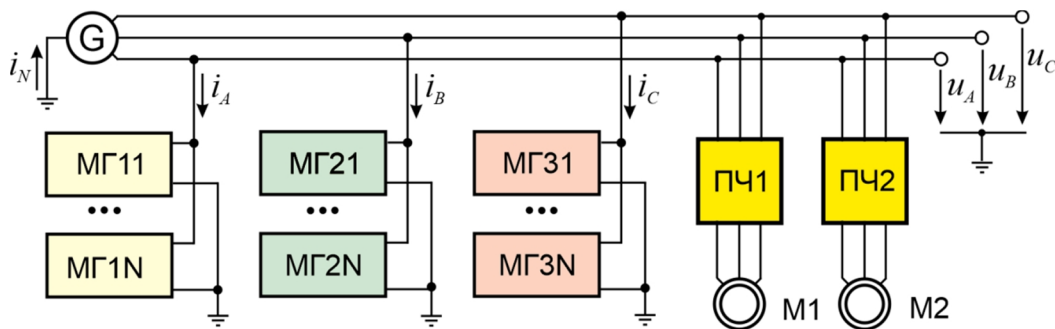


Рис. 2. Схема электропитания СВЧ-установки от дизель-генератора

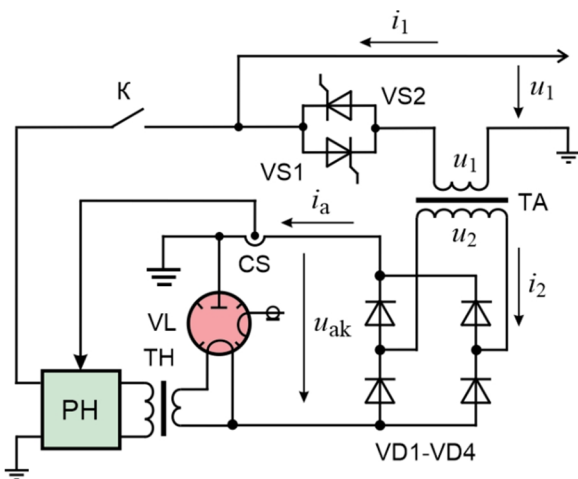


Рис. 3. Схема магнетронного генератора с тиристорным регулятором напряжения

Для определенности будем полагать, что каждый МГ построен по схеме, которая показана на рис. 3. Основу составляет магнетрон TOSHIBA 2M164, который предна-

значен для использования в СВЧ-установках промышленного назначения [7]. Магнетрон генерирует СВЧ-колебания в диапазоне частот от 2440 до 2460 МГц. Средняя выходная мощность составляет 1300...1600 Вт.

Согласно инструкции по эксплуатации магнетрона TOSHIBA 2M164 электропитание цепи анод – катод осуществляется с применением однофазного мостового выпрямителя VD1-VD4, вход которого подключен к высоковольтной обмотке повышающего трансформатора ТА.

Накал катода осуществляется с помощью трансформатора ТН, первичная обмотка которого соединена с фазой источника питания через регулятор напряжения РН. В начальный момент работы СВЧ-установки замыкается контакт К, который подключает РН к сети. В течение опреде-

ленного времени катод подогревается, затем ток накала уменьшается.

Для исследования электромагнитных процессов в рассматриваемой системе электропитания разработана имитационная модель в среде MATLAB с пакетом расши-

рения Simulink [8]. Схема модели показана на рис. 4. При ее составлении не учтены элементы цепей накала магнетронов, так как в установившемся режиме они потребляют очень малую часть энергии по сравнению с остальным оборудованием.

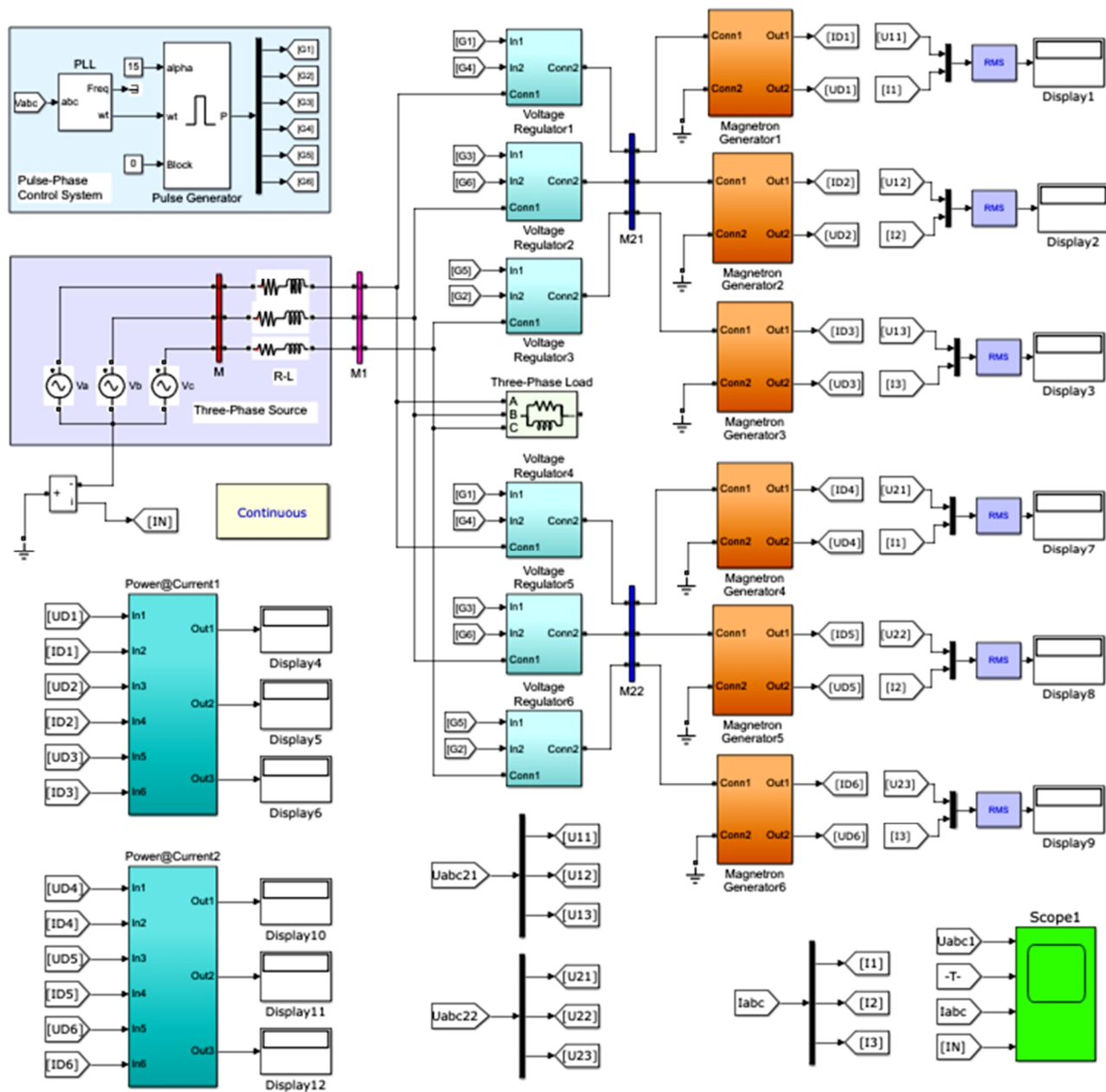


Рис. 4. Имитационная модель системы электропитания СВЧ-установки

Кроме того, полагается, что электроприводы конвейера и вентилятора являются неуправляемыми, поэтому при моделировании представлены активно-индуктивной нагрузкой (блок *Three-Phase Load*).

Источник питания представлен блоком *Three-Phase Source* в виде трех источников ЭДС и активно-индуктивных сопротивлений. Тиристорные регуляторы моделируются подсистемами *Voltage Regulator*, схе-

мы которых показаны на рис. 5. Управляющие импульсы подаются на входы In1, In2 с выходов подсистемы *Pulse-Phase Control System*, который образован блоками *PLL* и *Pulse Generator*.

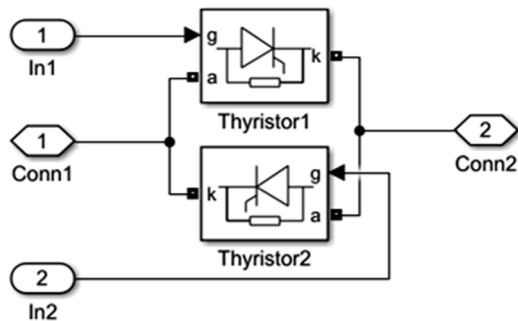


Рис. 5. Схема подсистемы *Voltage Regulator*

Магнетроны с цепями питания и контроля параметров представлены подсистемами *Magnetron Generator* (рис. 6). В соответствии с кусочно-линейной аппроксимацией ВАХ магнетрона его моделью является цепь, содержащая последовательно соединенные диод *Diode*, динамическое сопротивление R_{din} и встречно включенный источник постоянного тока *DC Voltage Source*, величина которого соответствует пороговому напряжению U_0 моделируемого магнетрона. Повышающий трансформатор и высоковольтный выпрямитель представлены блоками *Transformer* и *Universal Bridge*.

В составе модели на рис. 4 имеются также блоки, с помощью которых осуществляется сбор информации о напряжениях и токах системы, расчет средних значений токов магнетронов и их выходной

мощности, действующих значений напряжений на первичных обмотках повышающих трансформаторов напряжений и потребляемых ими токов.

С помощью имитационной модели проведены виртуальные эксперименты, которые позволили определить взаимное влияние автономного источника питания (ДГ) и электрооборудования СВЧ-установки в различных режимах работы.

На рис. 7 показаны осциллограммы фазных напряжений и токов источника питания, напряжений регуляторов и тока нулевого провода, которые получены для угла управления $\alpha = 15$ эл. град. В качестве источника питания был принят ДГ мощностью 100 кВт с номинальным током 180 А и реактивным сопротивлением $X''_d = 12\%$.

Номинальное напряжение вторичной обмотки повышающего трансформатора ТА равно 3300 В. Для магнетрона 2М164 на основании его паспортных характеристик были приняты следующие значения параметров модели: $R_{din} = 100$ Ом; $U_0 = 3100$ В. Усредненный КПД составил 65 %.

МГ в количестве, кратном трем, представляют собой равномерную нагрузку для источника питания. Действующее значение тока каждой фазы для принятых при моделировании параметров равно 25 А. Однако фазные токи имеют несинусоидальную форму. Суммарный коэффициент гармоник составляет 37 %. Основной вклад в искажение формы, как показано на рис. 8, вносит третья гармоника, коэффициент которой равен 36 %.

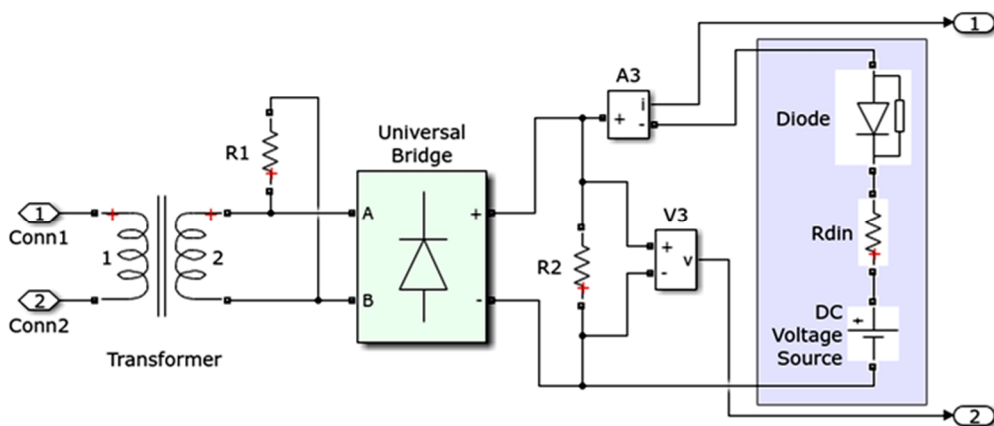


Рис. 6. Схема подсистемы *Magnetron Generator*

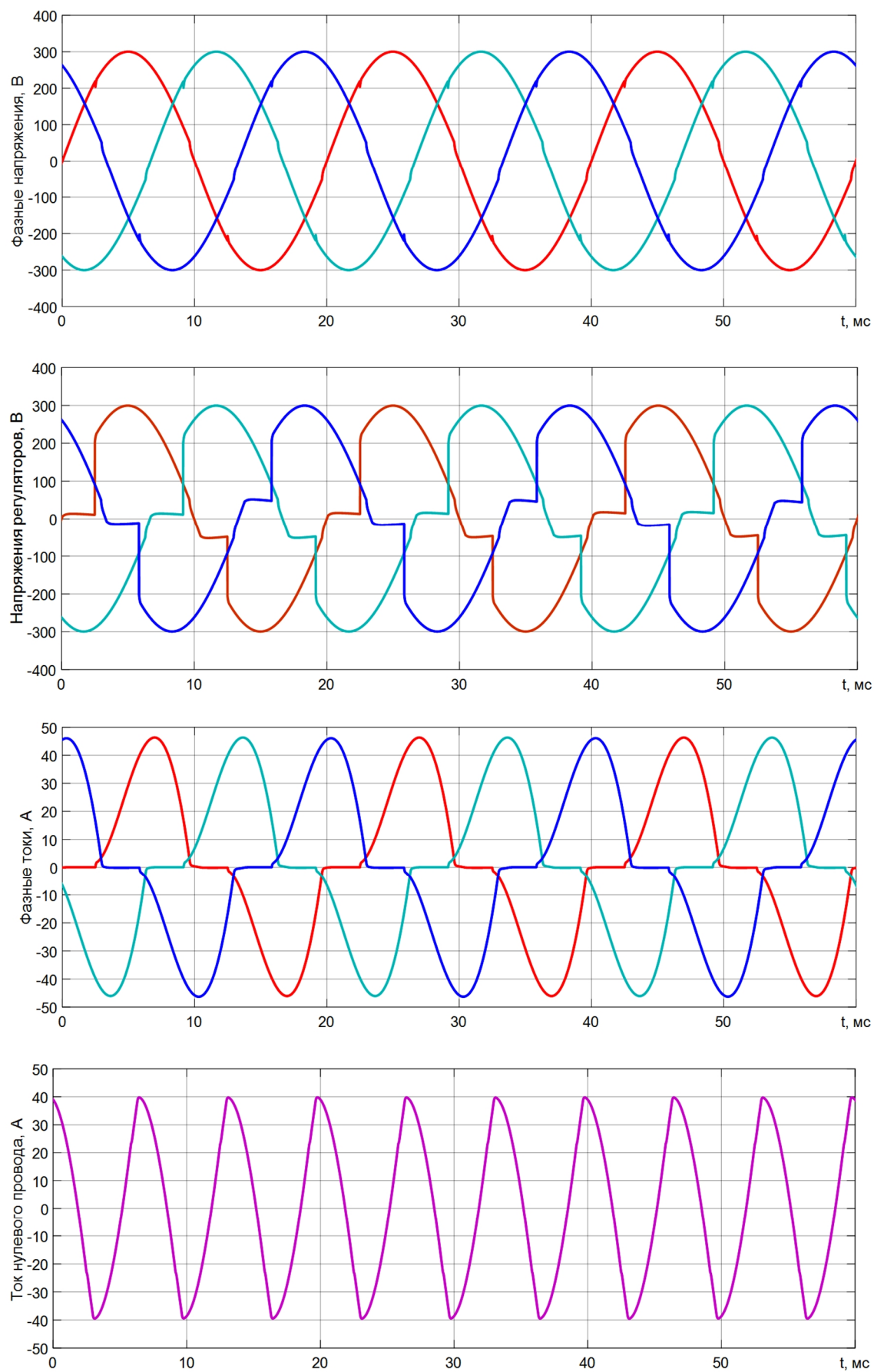


Рис. 7. Осциллограммы напряжений и токов при угле управления 15 эл. град

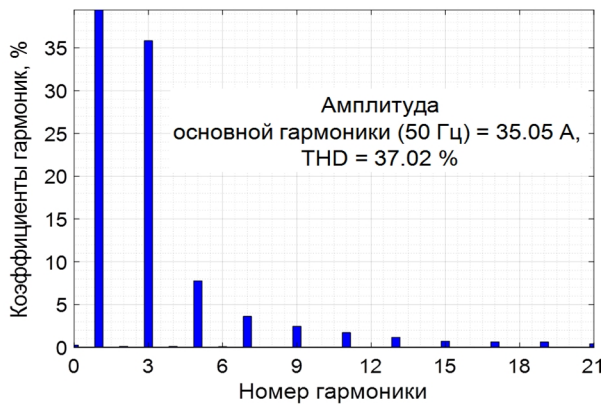


Рис. 8. Спектральный состав фазного тока

Из-за того, что фазные токи имеют в своем составе третью и кратную ей гармоники, по нулевому проводу протекает ток, величина которого соизмерима с фазными токами. При этом ток нулевого провода имеет частоту 150 Гц.

Наличие тока в нулевом проводе является существенным недостатком схемы, показанной на рис. 2. Дело в том, что ДГ оснащают защитой от несимметрии фазных токов, принцип действия которой предполагает включение реле в нулевой провод. В инструкциях по эксплуатации ДГ указывают, что несимметрия токов нагрузки не должна превышать 20-25 % номинального тока.

Если ДГ работает на электроприемники с линейными ВАХ, то при симметричной нагрузке фаз ток нулевого провода

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0.$$

При возникновении несимметричного режима $i_N \neq 0$. При определенном значении тока нулевого провода срабатывает реле, которое выключает ДГ.

При работе ДГ на нагрузку, фазные токи которых содержат третью и кратные ей гармоники, по нулевому проводу всегда протекает ток. Для рассматриваемой схемы величина этого тока зависит от выходного напряжения ДГ и угла управления α . Поэтому после включения СВЧ-установки и вывода ее на рабочий режим в некоторый момент обязательно будет происходить срабатывание защиты и отключение ДГ.

Проблемой является также высокий уровень гармоник фазных токов. Это заставляет применять ДГ существенно большей мощ-

ности, чем требовалось бы для питания линейной нагрузки [9]. В результате возрастают затраты на приобретение оборудования. Кроме того, при работе частично загруженного ДГ происходит увеличение удельного расхода топлива по сравнению с работой при номинальной нагрузке [10].

Проанализируем еще один недостаток типовой схемы МГ, показанной ранее на рис. 3. На основании результатов моделирования построены регулировочные характеристики МГ для различных значений напряжений на выходе ДГ. На рис. 9 и 10 представлены графики зависимостей напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора ТА (после тиристорного регулятора) и выходной мощности МГ от угла управления α соответственно.

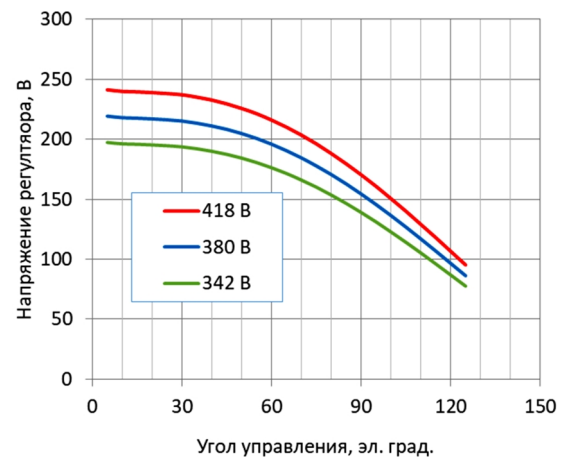


Рис. 9. Зависимость напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора от угла управления

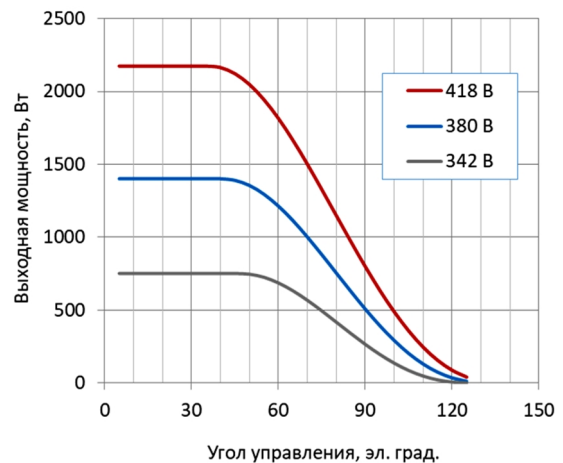


Рис. 10. Зависимость выходной мощности МГ от угла управления

Эти графики показывают, что применение регулятора в виде встречно-параллельно соединенных тиристоров с импульсно-фазовым управлением позволяет изменять среднеквадратичное значение напряжения в широком диапазоне угла управления α . Это свойство является полезным для электротермических установок резистивного нагрева, так как мощность этих установок при заданном сопротивлении нагревательных элементов зависит от квадрата действующего напряжения. Однако в системе электропитания магнетрона импульсно-фазовое регулирование напряжения не приводит к требуемому эффекту. Это объясняется тем, магнетрон входит в режим генерации СВЧ-колебаний только после того, как напряжение между анодом и катодом магнетрона превышает поро-

вое значение U_0 . Поэтому изменение угла управления α тиристорами в диапазоне от 0 до некоторого значения, которое зависит от величины питающего напряжения, не приводит к изменению тока магнетрона и соответствующему изменению его выходной мощности. Из графиков на рис. 9 видно, что зона нечувствительности регулятора СВЧ-мощности увеличивается при уменьшении питающего напряжения.

Решением обозначенных проблем может быть переход к схеме, которая показана на рис. 11. В данной схеме цепи питания МГ объединены в звено постоянного тока, которое образовано трехфазным мостовым выпрямителем В. Выпрямитель подключен к выходу ДГ через фильтр ЭМС, снижающий уровень высших гармоник в кривой фазного тока.

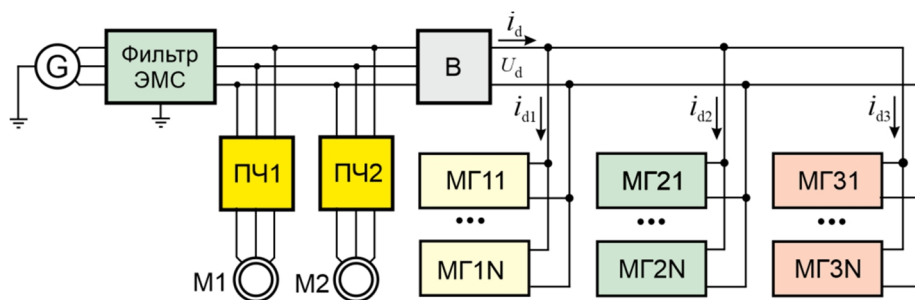


Рис. 11. Схема электропитания СВЧ-установки со звеном постоянного тока

МГ выполнены по схеме (рис. 12), содержащей инвертор И, который подключается к звену постоянного тока через импульсный преобразователь напряжения ИПН и сглаживающий фильтр СФ. Инвертор формирует напряжение повышенной частоты (порядка 20 кГц), благодаря чему трансформатор ТА имеет существенно меньшие массу и габариты, чем трансформатор в схеме на рис. 3.

Импульсный преобразователь напряжения позволяет поддерживать заданный уровень мощности СВЧ-генератора при колебаниях напряжения ДГ и соответствующих изменениях напряжения звена постоянного тока, среднее значение которого определяется по формуле

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_0 - \frac{3\omega L_0 I_d}{\pi} - 2R_0 I_d - 2\Delta U,$$

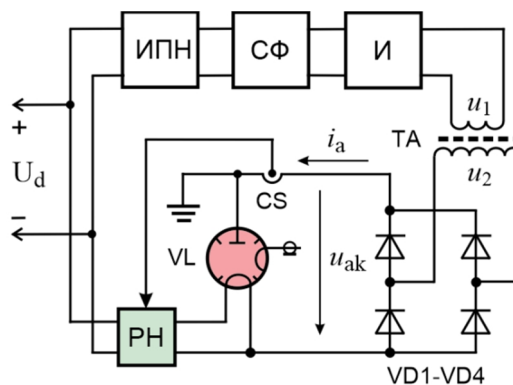


Рис. 12. Схема магнетронного генератора с питанием на постоянном токе

где E_0 – ЭДС синхронного генератора, которая зависит от основного магнитного потока в воздушном зазоре и частоты вращения вала ДГ; L_0 , R_0 – соответственно индуктивность и сопротивление синхронного генератора по схеме замещения; I_d – среднее

значение выходного тока выпрямителя; $2\Delta U$ – падение напряжения на диодах выпрямителя.

Среднее значение выходного тока выпрямителя рассчитывается по формуле

$$I_d = \int_0^T (i_{d1} + i_{d2} + i_{d3}) dt,$$

где i_{dk} – ток, потребляемый k -й группой МГ.

Таким образом, напряжение U_d в звене постоянного тока может изменяться в широком диапазоне, так как оно зависит от нескольких возмущающих факторов. Без применения импульсного преобразователя напряжения задача поддержания требуемого уровня СВЧ-мощности магнетронов была бы неосуществима.

Выводы

Результаты имитационного моделирования показали, что применение типовых технических решений МГ не позволяет использовать ДГ в качестве автономного источника электропитания СВЧ-установки конвейерного типа.

Предложена схема электропитания МГ со звеном постоянного тока (рис. 10), в ко-

торой при работе в нормальных режимах ток нулевого провода равен нулю, поэтому отсутствует проблема ложного срабатывания защиты.

Токи, потребляемые ДГ, не содержат третью и кратные ей гармоники. Даже в тех случаях, когда МГ должны работать с разными уровнями выходной мощности, сохраняется равномерная загрузка фаз. Наиболее интенсивные пятая и седьмая гармоники минимизируются фильтром ЭМС. Поэтому для электропитания СВЧ-установки может быть применен ДГ, мощность которого меньше, чем при использовании типовой схемы электропитания МГ, представленной на рис. 2.

Дальнейшее развитие темы автономного электропитания СВЧ-установок может идти по пути применения в схеме на рис. 10 ДГ с изменяемой в зависимости от нагрузки скоростью вращения вала с целью уменьшения расхода топлива [11]. При этом возникнет необходимость решения задачи по обеспечению электроэнергией заданного качества электроприемников, не входящих в состав СВЧ-установки, например объектов инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Okress E.** Microwave Power Engineering. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.
2. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко и др. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 2-6.
3. Novel foodstuff conveyor belts compound for energy saving: the effect of microwave pre-heating and mixed fillerson mechanical properties / S. Limhengha, S. Limnarat, I. Jangchud, W. Sriseubsai // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. № 4. P. 1105-1110.
4. **Артюхов И.И., Земцов А.И.** Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 3 (54). С. 149-154.
5. Применение имитационного моделирования для исследования системы электропитания мультигенераторной установки СВЧ-нагрева / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.К. Пыльская и др. // Вопросы электротехнологии. 2020. № 4 (29). С. 56-63.
6. Analysis of Operation of Synchronous Generator under the Distortion of Harmonic Current / J.-q. Wang, P.-c. Song, C.-h. Cui, J.-k. Li, T. Yang // 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2012. DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307699.
7. TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164. [Электронный ресурс]. URL: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf.
8. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

9. Hoevenaars A.H., McGraw M., Alexander J. Rightsizing generators through harmonic mitigation realizes energy, emissions and infrastructure reductions // 2015 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC). 2015. P. 1-9. DOI: 10.1109/PCICON.2015.7435107.

10. Завалишин В.В. Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной

частотой вращения дизеля // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. Т. 3. № 1 (46). С. 128-136.

11. Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, Д.А. Бочкарев и др. // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 58-64.

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

Пыльская Елена Константиновна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Земцов Артем Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани

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

Elena K. Pylskaya – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem I. Zemtsov – Ph.D., Head: Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Branch of Samara State Technical University in Syzran

Статья поступила в редакцию 26.02.22, принята к опубликованию 02.03.22

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.317.32

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ
МОЩНЫХ ДИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

В.М. Пиксаев, М.С. Алямкина, Д.В. Пьянзин

DIAGNOSIS SYSTEM FOR POWERFUL DIODE RECTIFIERS

V.M. Piksaev, M.S. Alyamkina, D.V. Pyanzin

В работе приведены результаты разработки системы диагностики мощных диодных выпрямителей с передачей информации по радиоканалу. Система обеспечивает измерение температуры диодов выпрямителя, величины обратного напряжения, проверку на пробой и визуализацию полученных результатов.

Ключевые слова: выпрямитель, диод, система диагностики, радиоканал

The paper presents the results of the development of a diagnostic system for high-power diode rectifiers with information transmission over a radio channel. The system provides temperature measurement of rectifier diodes, reverse voltage value, breakdown test and visualization of the obtained results.

Keywords: rectifier, diode, diagnostic system, radio channel

Выпрямители серии В-ТПЕД предназначены для работы в составе выпрямительных агрегатов, которые преобразуют переменный ток в постоянный на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог, а также для городского наземного электрифицированного транспорта (трамвая, троллейбуса). Данные выпрямители строятся на базе трехфазной мостовой схемы выпрямления (рис. 1) [1].

ПАО «Электровыпрямитель» выпускает выпрямители В-ТПЕД-2к-600-04-УХЛ4, В-ТПЕД-1к-600-05-УХЛ4 для электрооборудования подстанций городского электрифицированного транспорта и В-ТПЕД-3,15к-3,3к-УХЛ4 для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог постоянного тока [2]. В таблице приведены основные электрические характеристики выпрямителя В-ТПЕД-3,15к-3,3к-УХЛ4.

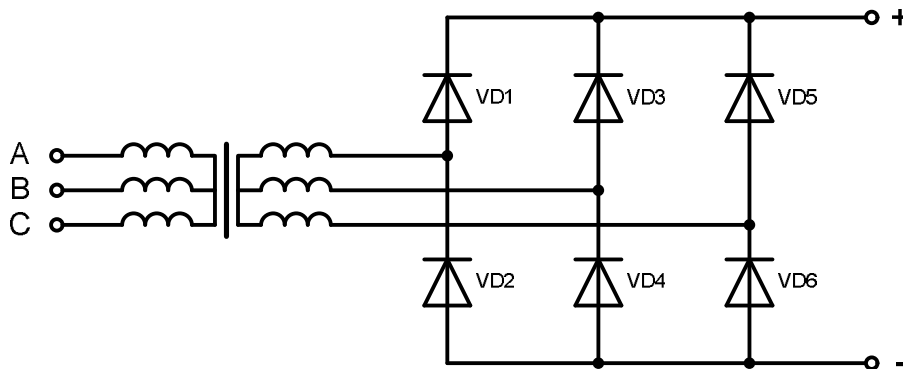


Рис. 1. Трехфазная мостовая схема выпрямления

Электрические характеристики выпрямителя В-ТПЕД-3,15к-3,3к-УХЛ4

Наименование параметра	Значение
1. Номинальное входное фазное напряжение, В	2×750
3. Частота входного напряжения, Гц	50±1
4. Номинальное выходное напряжение (ср. знач.), В	3300
5. Наибольшее значение выходного напряжения (ср. знач.), В	4000
6. Номинальный выходной ток (ср. знач.), А	3150
7. Номинальная выходная мощность, МВт	10,4
8. КПД выпрямителя, %, не менее (ср. знач.)	99,5
9. Номинальное напряжение цепей управления и защиты постоянного тока, В	220 или 110

Конструктивно выпрямители представляют собой три одинаковых шкафа с выпрямительными диодами. Выпрямитель В-ТПЕД-3,15к-3,3к-УХЛ4 может быть включен как в последовательную, так и в параллельную двенадцатипульсовую схему выпрямления [1]. В состав каждого шкафа входят по два диодных вентиля (рис. 2), таким образом, общее количество диодов выпрямителя составляет 96 штук. Каждый диодный вентиль выпрямителя состоит из четырех параллельных ветвей, каждая ветвь состоит из четырех последовательно соединенных диодов, средние точки всех ветвей объединены. В любой момент времени работают два вентиля, в катодной группе в открытом состоянии будет находиться вентиль с наибольшим положительным потенциалом на аноде, в анодной группе работает вентиль, катод которого имеет наиболее отрицательный потенциал.

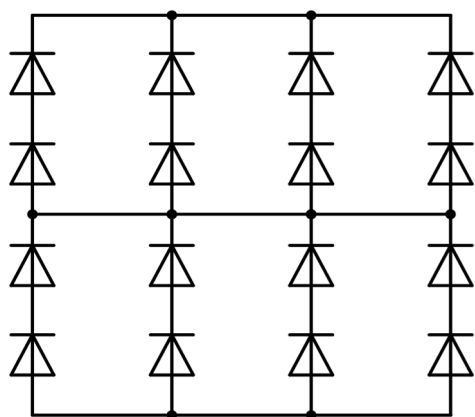


Рис. 2. Схема диодного вентиля

Используются силовые лавинные диоды ДЛ153-2000-20 с охладителями, предназначенные для работы в цепях статических преобразователей электроэнергии постоянного и переменного токов на частотах до 2 кГц.

Важнейшей задачей в процессе эксплуатации таких выпрямителей является выполнение диагностики состояния диодов. Отделом микропроцессорных систем управления ПАО «Электровыпрямитель» разработана система диагностики мощных диодных выпрямителей с передачей информации по радиоканалу (рис. 3). Данная система обеспечивает контроль состояния каждого диода по критериям: «нормальная работа», «пробой» и «ухудшение параметров», выполняет контроль температуры диодов с выдачей информации в систему управления верхнего уровня.

В состав системы диагностики входят: платы контроля пробоя диодов; плата интерфейсов и плата индикации или система управления верхнего уровня.

Каждая плата контроля пробоя диодов (рис. 4) подключается к контролируемому силовому диоду и выполняет сбор информации для его диагностики.

С помощью термодатчиков выполняется измерение температуры диода, а блоками определения величины обратного напряжения и проверки на выход из строя производится проверка диода на неисправность. Измеренные данные поступают на порты ввода-вывода микроконтрол-

лера, а затем – на блок радиомодуля через последовательный интерфейс *SPI*. В качестве термодатчиков используются термо-

резисторы, которые подключаются через соответствующие *RC*-цепочки к портам микроконтроллера (рис. 5).

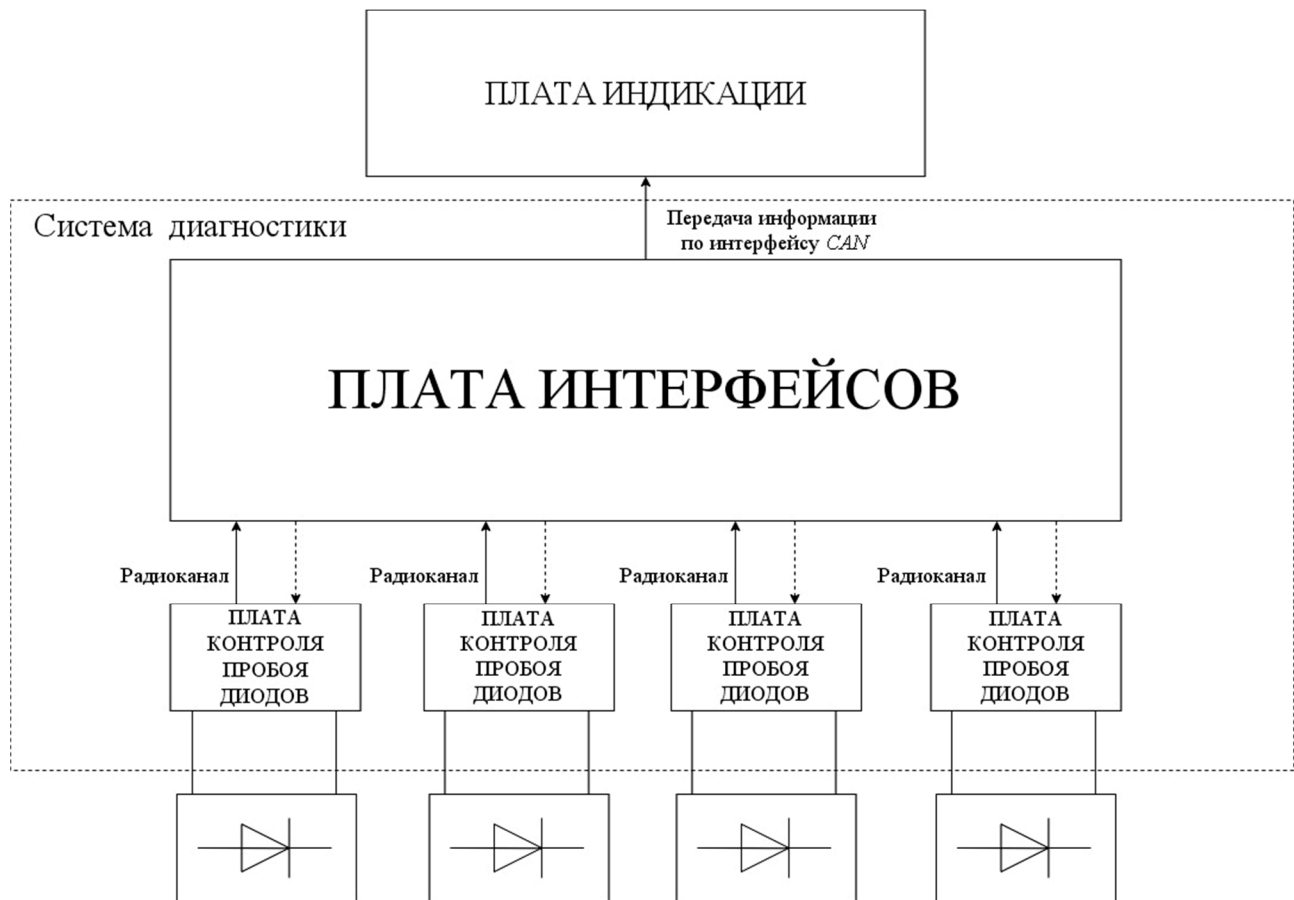


Рис. 3. Обобщенная структурная схема системы диагностики

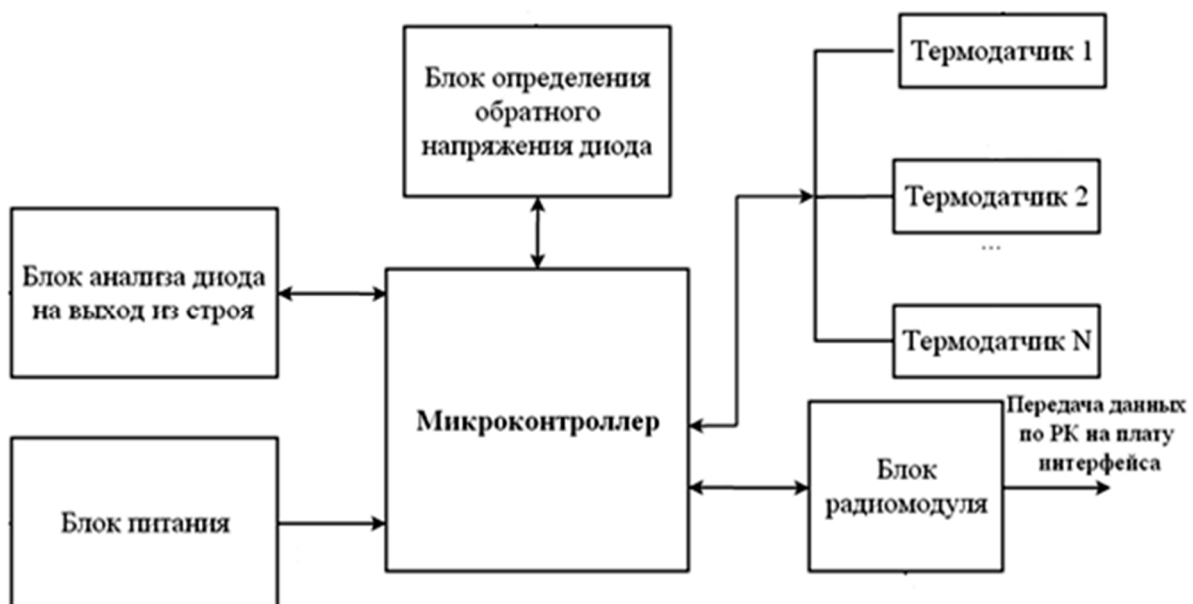


Рис. 4. Структурная схема платы контроля пробоя диодов

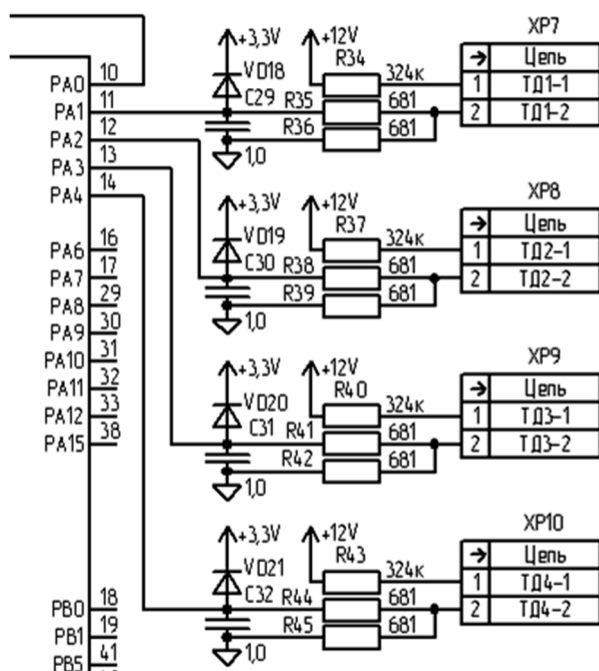


Рис. 5. Схема подключения термодатчиков к микроконтроллеру

Контроль температуры диодов осуществляется с целью защиты выпрямителя от перегрева. Кроме того, измерение температуры на каждом полупроводниковом приборе позволяет получить и проанализировать общую тепловую картину в шкафу преобразователя.

Температура верхних силовых полупроводниковых приборов в шкафу всегда выше в результате конвекции теплого воздуха, температура полупроводниковых приборов, находящихся на одном уровне, примерно одинакова, то есть градиент температуры шкафа направлен вверх. В качестве примера на рис. 6 изображена картина увеличения нагрева одного из полупроводниковых приборов с течением времени. Постоянное измерение тепловой картины и анализ изменения градиента температур позволяет сделать вывод об увеличении нагрева какого-либо прибора в силу различных причин. К таким причинам можно отнести: потерю класса прибора в результате деградации его структуры, неправильное распределение тока в параллельных ветках, ухудшение качества контактных соединений в процессе эксплуатации или некорректном монтаже. На основе полученных данных можно с высокой долей вероятности спрогнозировать выход из строя соответствующего полупроводникового прибора.

На рис. 7 приведена структурная схема, поясняющая принцип определения диагностирования пробоя или ухудшения параметров диодов.

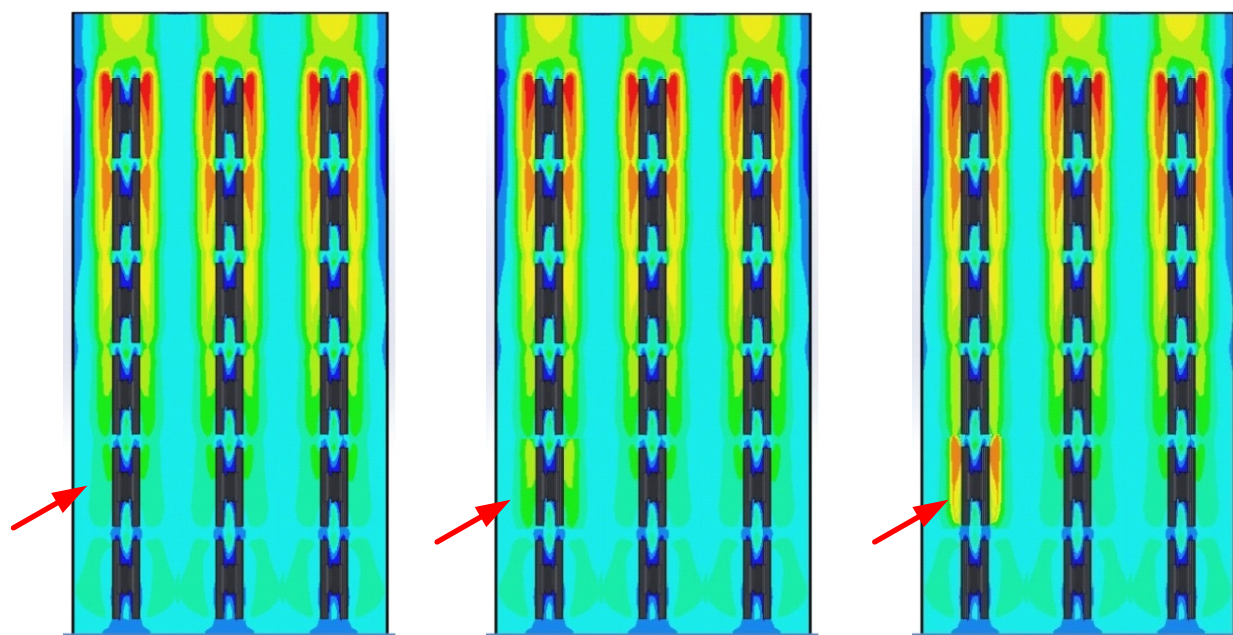


Рис. 6. Тепловая картина увеличения нагрева одного из полупроводниковых приборов с течением времени

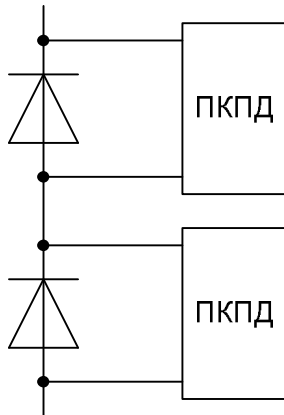


Рис. 7. Диагностирование состояния диодов

Диагностирование состояния диодов осуществляется с помощью анализа напряжений, поступающих с последовательно соединенных диодов в вентильных блоках. Если при поданном силовом напряжении на вход выпрямителя измеренное напряжение на диоде равно нулю, то данное состояние диагностируется как «пробой». Если напряжения на двух последовательно соединенных диодах отличаются более чем на 10 %, т. е. делятся неравномерно, то данное состояние диагностируется как «ухудшение параметров». Указанная ситуация более подробно анализируется с помощью данных о температурах на диодах. Например, если распределение напряжений происходит неравномерно, при этом наблюдается повышенный или пониженный нагрев, то вероятнее всего произошло ухудшение контактного соединения одного из диодов. Если тепловых аномалий не наблюдается, то, скорее всего, происходит деградация структуры со снижением класса диода, на котором наблюдается пониженное напряжение.

Основой платы контроля пробоя является микроконтроллер *STM32F103C8T6* [3].

Для организации связи по радиоканалу использовался модуль *NRF24L01+* [4], в который входят синтезатор частот, демодулятор, усилители. Рабочая частота модуля определяется номером канала, диапазон рабочих частот 2,4-2,483 ГГц. Частоты сетки каналов в указанном диапазоне располагаются через 1 МГц. Модуль имеет четыре рабочих режима – выключение, спящий режим, прием данных и передача данных. Максимальная скорость передачи данных – 2 Мбит/с, дальность связи – до 100 м. Для защиты передаваемых данных от помех используется циклически избыточный код, так называемая контрольная сумма.

Информация с плат контроля пробоя диодов по радиоканалу поступает на плату интерфейсов, где выполняются сбор информации о каждом диоде и дальнейшая ее обработка. Данный блок реализован на основе микроконтроллера *STM32F407* [5]. Кроме того, важнейшей задачей данной платы является передача всей информации о состоянии диодов и выпрямителя в целом в систему управления верхнего уровня. Это может быть как панель для индикации, так и АСУ ТП подстанции.

Заключение

В результате работы разработана система диагностики мощных диодных выпрямителей с передачей информации по радиоканалу. Система обеспечивает измерение температуры нагрева исследуемого диода, проверку исследуемого диода на пробой, измерение величины обратного напряжения диода, обмен данными с платой интерфейсов по радиоканалу и визуализацию полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж-д транспорта. Москва: Транспорт, 1999. 464 с.
2. <http://www.elvpr.ru/about/index.php>

3. <http://www.st.com>
4. <http://www.nordicsemi.com>
5. <https://www.olimex.com/Products/ARM/ST/STM32-E407/resources/STM32-E407.pdf>
6. http://itt-ltd.com/reference/ref_can.html

Пиксаев Виталий Михайлович – начальник отдела микропроцессорных систем управления научно-инженерного центра ПАО «Электровыпрямитель», Саранск

Алямкина Марина Сергеевна – инженер-конструктор отдела микропроцессорных систем управления научно-инженерного центра ПАО «Электровыпрямитель», Саранск

Пьянзин Денис Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва

Vitaly M. Piksaev – Head: Department of Microprocessor Control Systems of the Scientific and Engineering Center PAO Electrovypryamitel, Saransk

Marina S. Alyamkina – Design Engineer, Department of Microprocessor Control Systems of the Scientific and Engineering Center PAO Electrovypryamitel, Saransk

Denis V. Pyanzin – PhD, Associate Professor, Head: Department of Radio Engineering, National Research Mordovia State University

Статья поступила в редакцию 14.02.22, принята к опубликованию 03.03.22

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
член Международной энергетической академии



Ушел из жизни **Архангельский Юрий Сергеевич** – профессор, доктор технических наук, который широко известен в научных кругах в России и за рубежом как основатель СВЧ электротермии.

Юрий Сергеевич родился в декабре 1936 г. в г. Саратове в семье служащего. Его детство пришлось на годы войны и запомнилось ему голодом, холодом и, как он сам говорил: «Уверенностью, что наше дело правое, победа будет за нами!».

В 1954 г. он окончил с золотой медалью школу и поступил на физический факультет Саратовского государственного университета (СГУ). Учился Юрий Сергеевич как одержимый, после занятий по расписанию шел в научную библиотеку и корпел над

книгами до конца рабочего дня. В десять вечера в зал заходила библиотекарь и предлагала ему сдать до утра книги. На пятом курсе он долго выбирал тему дипломной работы, которая была бы на стыке электродинамики и теплотехники, потому что знал – на стыке работать интереснее. Воображение выпускника рисовало задачу о дальней радиолокации через океан, но на деле все оказалось прозаичнее и интереснее, надо было придумать расчет калориметрической нагрузки для измерения больших уровней мощности широкополосных СВЧ генераторов. Необходимо было решать трансцендентные уравнения на комплексной плоскости, компьютеров тогда не было. Ему удалось решить эту зада-

чу, упростив ее с помощью приближенных граничных условий Леонтовича. Юрий Сергеевич был очень горд, что нашел решение, и тогда он еще не думал, что нагрев диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле станет для него основной областью научных интересов.

После окончания СГУ по специальности «Радиоэлектроника», получив квалификацию «физик-исследователь», три года работал по распределению инженером, старшим инженером, окончил заочную аспирантуру кафедры «Радиофизика» СГУ.

В 1968 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электронная техника и приборы» и продолжил свою научно-педагогическую деятельность в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. (СГТУ) (тогда Саратовский политехнический институт (СПИ)) в должности доцента кафедры «Электроника». В этот период Юрий Сергеевич Архангельский начал научную работу в новом для кафедры направлении – применение СВЧ энергии в технологических процессах. Началось все с консультации сотрудников лаборатории одного из предприятий г. Саратова по проблемам эксплуатации первого отечественного СВЧ пастеризатора молока. В установке в качестве рабочей камеры использовалась обычная калориметрическая нагрузка, в которой по стеклянной трубе прокачивалось молоко, которая постоянно трескалась. Архангельский Ю.С. получил первое авторское свидетельство на изобретение совместно с инженерами лаборатории принципиально новой конструкции рабочей камеры, не содержащей стеклянных деталей.

Это послужило в 1969 году началом исследований в области СВЧ нагрева в СПИ. Под руководством Архангельского Ю.С. была создана научная группа, которая активно с большим энтузиазмом начала исследования в области СВЧ диэлектрического нагрева.

В 1982 г. Архангельский Ю.С. получил ученую степень доктора технических наук, в 1984 г. – звание профессора. В 1997 г. по инициативе Юрия Сергеевича была откры-

та новая специальность «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» и одноименная кафедра, которую он возглавлял более 20 лет.

Юрий Сергеевич создал научную школу и продолжил исследования в области СВЧ электротермии, в том числе в новых научных направлениях, таких как технико-экономическое проектирование СВЧ электротехнологических установок, нетепловая модификация полимеров в СВЧ электромагнитном поле, ущерб и резервирование в СВЧ электротермии, социальные аспекты электротехнологии, проектирование СВЧ электротехнологических установок с учетом факторов риска.

За годы работы в СПИ-СГТУ 30 лет Архангельский Ю.С. являлся членом Ученого совета вуза, под его руководством защищены три докторские и одиннадцать кандидатских диссертаций. В 1980 г. за успехи в развитии народного хозяйства СССР награжден бронзовой медалью ВДНХ. В 1999 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». В 2005 г. награжден нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». В 2006 г. научная школа под руководством Архангельского Ю.С. признана ведущей научной школой РФ в области инженерных и технических наук № НИИ-9553.2006.8.

В 2013 году Архангельский Ю.С. стал основателем и главным редактором научного журнала «Вопросы электротехнологии», который впоследствии вошел в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России.

Архангельским Ю.С. опубликовано более 250 научных работ, в том числе более 20 монографий и 17 авторских свидетельств на изобретение и патентов.

Юрий Сергеевич Архангельский – талантливый ученый, педагог, настоящий патриот России, он был из тех, для кого наука – дело жизни и служение одновременно!

Калганова Светлана Геннадьевна

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 телефону:

8 (8452) 99-88-72 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/124б, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Калгановой С.Г. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

- Рукопись статьи оформляется в программе Microsoft Word для Windows
 - Формат страницы – А4, ориентация книжная
 - Размеры полей страниц: верхнее и нижнее – по 25 мм, левое и правое – по 20 мм
 - Абзацный отступ – 0,63 см
 - Шрифт текста рукописи – Times New Roman, размер 12 pt
 - Междустрочный интервал – 1,0
 - Общий объем рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объема рукописи не распространяется на сведения об авторах.

Иллюстрации (рисунки, графики, фотографии) располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Чертежи, схемы и другие графические материалы выполняются с хорошей проработкой деталей в программах Corel Draw (с расширением *.cdr) или других редакторах (с расширением *.jpeg или *.tiff). Все графические материалы должны быть доступны для редактирования, поэтому необходимо представлять их в исходном формате. Цветные иллюстрации должны быть адаптированы для черно-белой печатной версии журнала. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ Р 7.0.5-2008 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 Ю.Л. Жупиловой
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 24.03.2022
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 11, 45 Уч. изд. л. 5,0
Тираж 500 экз. Заказ 23 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2020 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by 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: 24.03.2022
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 11,75 Publication base sheet 5,0
Circulation: 500 printed copies. Order 23 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*