

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (36)
Сентябрь 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
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

№ 3 (36)
September 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
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

Коняев А.Ю., Багин Д.Н., Бектабанов Ч.А., Крылов Г.А. Влияние размеров проводящих частиц на эффективность индукционной сортировки в бегущем магнитном поле.....	5
Тригорлый С.В., Захаров В.В., Калганова С.Г., Артюхов И.И., Яковлев А.С. Моделирование термообработки диэлектриков в СВЧ-установке конвейерного типа	13
Телегин С.В., Гоц И.Ю. Влияние режимов лазерного излучения инфракрасного диапазона на формирование композиционных поверхностных слоев титановых изделий	22
Кожевников В.Ю., Федотов В.Д. Моделирование технологии получения нано- и микрочастиц оксида железа с помощью СВЧ-энергоподвода	31
Ерёмин В.П., Ершов А.С., Байбурин В.Б., Балакин М.И., Шелудяков Д.А., Мещанов В.П. Анализ возможностей создания магнетрона повышенной мощности для СВЧ-стерилизатора на основе математической модели и экспериментального образца	38

Сивак А.С., Калганова С.Г., Сивак Т.П. Расчетное моделирование СВЧ рабочих камер для обработки композиционных материалов	43
---	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Кошелев П.А. Источники питания анодных цепей СВЧ-приборов	51
Вырыханов Д.А. К вопросу о формировании энергетического баланса в системах электроснабжения.....	57
Ербаев Е.Т. Применение возобновляемых источников энергии для электроснабжения СВЧ-установок агропромышленного назначения.....	61
Стариков А.В., Косорлуков И.А., Казанцев А.А. Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей частотных преобразователей станций управления погружными насосами	66
Доманов В.И., Мурзаков Д.Г., Комаров Н.Е. Линеаризованная математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором как объекта управления	74
К сведению авторов	81

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

Konyaev A.Yu., Bagin D.N., Bektabanov Ch.A., Krylov G.A.	
Effects of the size of conductive particles on induction sorting efficiency in the traveling magnetic field	5
Trigorly S.V., Zakharov V.V., Kalganova S.G., Artyukhov I.I., Yakovlev A.S.	
Simulation of heat treatment processes of dielectrics in a conveyor-type microwave unit	13
Telegin S.V., Gots I.Y.	
Influence of ir laser radiation modes on the formation of composite surface layers of titanium products	22
Kozhevnikov V.Yu., Fedotov V.D.	
Modeling the technology for obtaining nano- and microparticles of iron oxide using the microwave power supply	31
Eremin V.P., Ershov A.S., Bayburin V.B., Balakin M.I., Sheludyakov D.A., Meshchanov V.P.	
Analysis of possibilities for creating a high-power magnetron to the microwave sterilizer based on a mathematical model and an experimental sample	38

Sivak A.S., Kalganova S.G., Sivak T.P.	
Computational modeling of microwave working chambers for processing composite materials	43

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Koshelev P.A.	
Power sources for anodic circuits of microwave devices	51
Vyrykhanov D.A.	
Formation of energy balance in power supply systems	57
Yerbayev Ye.T.	
Renewable energy application for power supply of microwave installations in agro-industrial sector	61
Starikov A.V., Kosorlukov I.A., Kazantsev A.A.	
Calculation of the optimum voltage at a field substation with special considerations for frequency converters at submersible pump control stations	66
Domanov V.I., Murzakov D.G., Komarov N.E.	
Linearized mathematical model to a wound-rotor induction motor as a control object	74
Information for Authors	81

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.313.17:621.928.1

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННОЙ СОРТИРОВКИ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, Ч.А. Бектабанов, Г.А. Крылов

EFFECTS OF THE SIZE OF CONDUCTIVE PARTICLES ON INDUCTION SORTING EFFICIENCY IN THE TRAVELING MAGNETIC FIELD

A.Yu. Konyaev, D.N. Bagin, Ch.A. Bektabanov, G.A. Krylov

*При промышленной переработке метал-
лосодержащих отходов и подготовке лома
цветных металлов к металлургическому пе-
ределу одной из важных технологических
операций является сортировка цветных ме-
таллов по видам и маркам сплавов. Для та-
кой технологической операции целесообразно
применять электродинамическую сепарацию
в бегущем магнитном поле. Важным пока-
зателем сепарации, характеризующим каче-
ство сортировки, является селективность.
На практике существует много факторов,
влияющих на селективность сепарации. В
статье выполнена оценка ряда таких фак-
торов и предложены пути улучшения каче-
ства сортировки. Основное внимание уделе-
но влиянию размеров проводящих частиц на
качество индукционной сортировки.*

Ключевые слова: индукционная сорти-
ровка металлов, электродинамический се-
паратор, селективность сепарации, влия-
ние размеров проводящих частиц

Введение

Важной стратегической задачей развития экономики нашей страны является развитие предприятий по переработке отходов произ-
водства и потребления, обеспечивающих
максимальное извлечение отдельных фрак-
ций, пригодных для использования в каче-
стве вторичного сырья [1]. Среди утилизи-

*One of important technological opera-
tions used in industrial processing of metal-
containing waste and preparation of non-
ferrous metal scrap for metallurgical treat-
ment is sorting of nonferrous metals in line
with alloy types and grades. The given
technological operation requires applica-
tion of electro-dynamic separation in the
travelling magnetic field. Selectivity proce-
dure is an important separation index which
characterizes the sorting quality. There are
many factors affecting selectivity of separa-
tion. This article provides estimation of a
number of such factors and proposes tech-
niques for improving the separation quality.
The focus is made on the impact of size of
conductive particles on the quality of induc-
tion sorting.*

Keywords: induction sorting of metals,
electrodynamic separator, separation
selectivity, effect of the size of conducting
particles

руемых фракций наиболее ценными явля-
ются металлы, сбор и вторичное использо-
вание которых могут дать большой эконо-
мический эффект и улучшить экологические
показатели производств [2-4]. При этом эф-
фективность таких производств во многом
зависит от совершенствования технологий и
технологического оборудования. В частно-

сти, для предприятий вторичной цветной металлургии актуально развитие технологий подготовки лома и отходов металла к металлургическому переделу. Чаще всего лом поступает на предприятия в несортированном виде. Непосредственная плавка такого лома сопровождается рядом нежелательных последствий: потери легирующих добавок; выпуск низкокачественных сплавов; повышение энергозатрат, связанное как с увеличением времени плавки, так и с расходами на последующее рафинирование расплавов; ухудшение свойств шлака и выделение вредных выбросов, обусловленные наличием в металлоломе неметаллических включений. Поэтому задача сортировки лома и отходов цветных металлов имеет первостепенную важность [4-5].

В настоящее время на предприятиях преобладает ручная сортировка по видам металлов и сплавов, при которой используются внешние признаки (цвет, характер излома и др.); предметные признаки (наименование деталей); наличие клейма на деталях и изделиях. Получают распространение портативные анализаторы металлов (рентгеновские или лазерные спектрометры), позволяющие определять химический состав и марки сплавов. Указанные спосо-

бы сортировки затруднительно применять к мелким фракциям металлолома с крупностью кусков менее 60-65 мм. Такие фракции образуются при дроблении лома с целью уменьшения размеров (при утилизации крупногабаритных изделий или отходов) и с целью раскрытия материалов при обработке сложных видов амортизационного лома (автомобильный лом, отходы электротехнического и электронного оборудования, кабельный лом и т.д.). Мелкие фракции металлолома целесообразно подвергать механизированной обработке. При этом для сортировки цветных металлов и сплавов широкое применение могут находить технологии электродинамической сепарации в бегущем магнитном поле [6-17]. Электродинамическая сепарация позволяет сортировать лом и отходы металлов как по крупности (например, отделение кускового лома от стружки), так и по сортам и видам сплавов, а также отделять от металлов неметаллические фракции. Для индукционной сортировки цветных металлов и сплавов целесообразно использовать электродинамический сепаратор на основе трехфазного линейного индуктора с подачей сортируемых материалов по наклонной плоскости, схематично показанный на рис. 1.

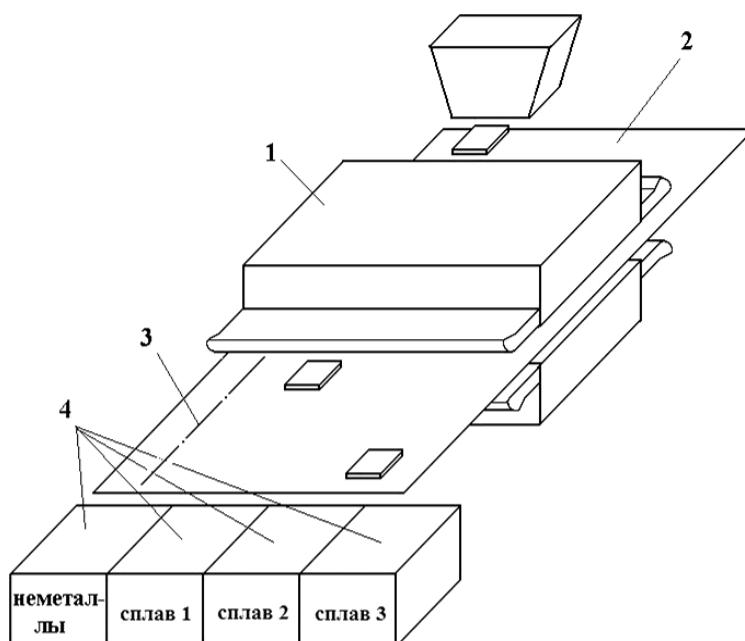


Рис. 1. Схема сепаратора для индукционной сортировки цветных металлов и сплавов:
1 – линейный индуктор, 2 – наклонная плоскость, 3 – линия подачи, 4 – приемники

Частицы сепарируемых материалов подаются в активную зону линейного индуктора 1 по наклонной плоскости 2 вдоль линии подачи 3. Частицы материалов, не обладающих электропроводностью, движутся по плоскости без отклонения. На проводящие частицы цветных металлов действуют электромагнитные силы, обусловленные взаимодействием наводимых в металлах вихревых токов с бегущим магнитным полем. В результате такого действия проводящие частицы отклоняются от линии подачи. При этом разные сплавы собираются в разные приемники 4. Траектории движения частиц в сепараторе зависят от многих случайных факторов, влияющих на качество сепарации. В данной статье основное внимание уделяется исследованию влияния на селективность сортировки размеров сепарируемых частиц.

Результаты исследований

Одним из достоинств электродинамической сепарации является получение селек-

тивных концентратов металлов и сплавов. Это обуславливает целесообразность их применения при первичной обработке металлолома. В Уральском федеральном университете на протяжении ряда лет разрабатываются сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов для индукционной сортировки цветных металлов и сплавов (например, для сепарации электронного и кабельного лома, для разделения сплавов цветных металлов в дробленном автомобильном ломе и т.п.) [12, 15-17]. В данной работе обсуждаются результаты исследований электродинамических сепараторов на примере обработки дробленного автомобильного лома.

При электродинамической сепарации для разделения материалов используются различия в их физических свойствах (удельной электропроводности и плотности). Например, в таблице представлены физические свойства сплавов цветных металлов, используемых в автомобилестроении (усредненные по видам и группам сплавов).

Физические свойства сплавов цветных металлов, применяемых в автомобилестроении

№	Виды и группы сплавов	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная электропроводность γ , МСм/м	Разделительный признак $10^3 \times \gamma/\rho$, (МСм×м ²)/кг
1	Деформируемые алюминиевые сплавы (АД31, АД33, АД35, АМц, Д16, АМг3 и др.)	2710	27,0	9,96
2	Литейные алюминиевые сплавы (АЛ6, АЛ9, АК9, АК12 и др.)	2680	21,0	7,84
3	Сплавы магния (МА2, МА5, МЛ5 и др.)	1800	8,0	4,44
4	Цинковые сплавы (ЦАМ4-1 и др.)	6700	16,5	2,46
5	Сплавы меди (латуни: Л90, Л63, ЛС59-1, ЛЦ25С2 и др.)	8700	17,0	1,95

Работоспособность электродинамических сепараторов целесообразно оценивать по значению удельного электромагнитного усилия (отношения электромагнитного усилия к массе извлекаемой проводящей частицы $F_m = F_{эм}/m$, Н/кг или м/с²). Поскольку электродинамический сепаратор

работает по принципу асинхронного электродвигателя, то зависимости электромагнитного усилия от основных параметров (частоты магнитного поля, скорости движения частиц или скольжения) имеют сложный характер и по форме соответствуют механической характеристике асин-

хронной машины. Как было показано ранее в [17], для индукционной сортировки целесообразно использовать линейную часть таких зависимостей, соответствующую, например, работе в зоне больших скольжений, близких к $s = 1,0$. При этом электромагнитное усилие, действующее на частицу, пропорционально ее удельной электропроводности γ , а удельное электромагнитное усилие – отношению удельной электропроводности к плотности γ/ρ , которое можно считать разделительным признаком сепарации. Как видно из таблицы, значения разделительных признаков рассматриваемых групп сплавов цветных металлов существенно различаются. При этом качество сортировки на начальной стадии разработки сепараторов можно охарактеризовать коэффициентами селективности $k_{\text{сел}0}$, равными отношению расчетных удельных электромагнитных усилий или отношению разделительных признаков соответствующих групп сплавов. Например, по данным табл. 1 для разделения деформируемых и литейных алюминиевых сплавов получаем $k_{\text{сел}0_1/2} = 1,27$, для сплавов магния и цинка $k_{\text{сел}0_3/4} = 1,80$ и т.д. На практике качество сепарации зависит от множества случайных факторов (размеры частиц, их форма и ориентация в бегущем магнитном поле, состояние поверхности частиц и поверхности плоскости, конструктивные размеры установки и т.п.), большая часть которых приводит к снижению селективности сортировки. При приближении коэффициента селективности $k_{\text{сел}}$ к 1,0 увеличивается взаимозасорение фракций, и сортировка становится невозможной. Поэтому оценка влияния различных факторов на селективность сепарации и поиск путей повышения селективности являются актуальными задачами. На первом этапе выполняемых авторами исследований основное внимание уделено влиянию на селективность сортировки размеров сепарируемых частиц цветных металлов и сплавов.

При теоретических исследованиях по методике, разработанной в Уральском федеральном университете [18-19], рассчитаны зависимости удельных электромаг-

нитных усилий F_m , действующих на сепарируемые проводящие частицы, от крупности частиц. В [18-19] получены аналитические выражения для таких усилий, что позволило реализовать алгоритм расчета в пакете Mathcad. Основным достоинством данной методики является корректный учет распределения вихревых токов во вторичном элементе индукционной машины, имеющем ограниченные размеры (как правило, в электродинамических сепараторах размеры частиц меньше полюсного деления индуктора). При исследованиях в качестве вторичных элементов принимались квадратные пластины с размерами $a \times b$ (b – размер пластины в направлении движения бегущего магнитного поля). Результаты расчетов, представленные на рис. 2, выполнены при неизменной толщине частиц ($d = 3$ мм) для сепаратора с односторонним линейным индуктором, имеющем полюсное деление $\tau = 0,132$ м, амплитуду линейной плотности тока 110 кА/м, частоту $f = 50$ Гц, при удалении частиц от поверхности индуктора $h = 2$ мм. Выбранные параметры соответствуют данным одной из опытно-промышленных установок электродинамической сепарации, созданных в УрФУ совместно с заинтересованными предприятиями.

Существенное отличие расчетных кривых усилий, представленных на рис. 2, служит теоретической предпосылкой для формирования разных траекторий частиц и сбора их в разные приемники, то есть для сортировки сплавов. Такая возможность подтверждается данными экспериментов на опытной установке электродинамической сепарации, подобной показанной на рис. 1. Например, на рис. 3 показаны отклонения частиц разных сплавов от линии подачи (B) в зависимости от начального положения частиц на плоскости (L_0 – расстояние от точки подачи частиц до входного края индуктора). Зависимости сняты для квадратных пластин (40×40 мм) толщиной $d = 3$ мм, вырезанных из образцов сплавов, имеющих в автомобильном ломе и предоставленных заинтересованными предприятиями. Опыты проводились при угле наклона тек-

столиковой плоскости подачи $\alpha = 30^\circ$ и расстоянии от индуктора до приемников $L_{\text{п}} =$

0,45 м. Полная мощность линейного индуктора в данных опытах $S = 1,2$ кВА.

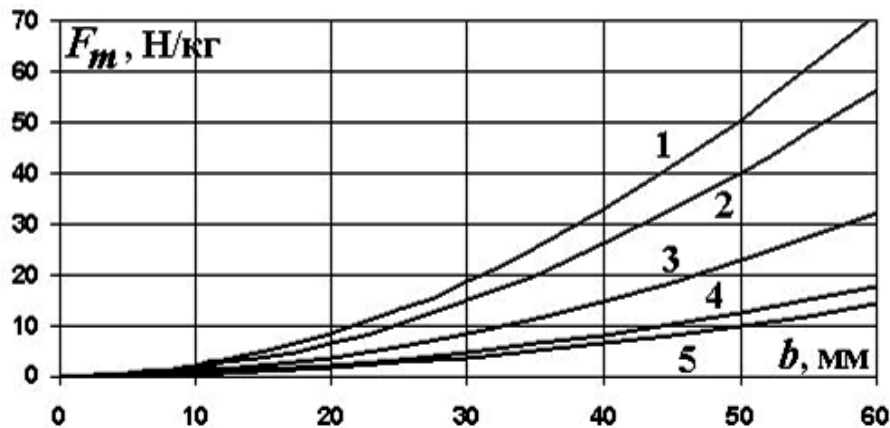


Рис. 2. Зависимости удельных электромагнитных усилий от крупности сепарируемых частиц (цифры на графиках соответствуют номерам строк табл. 1 с описанием свойств сплавов)

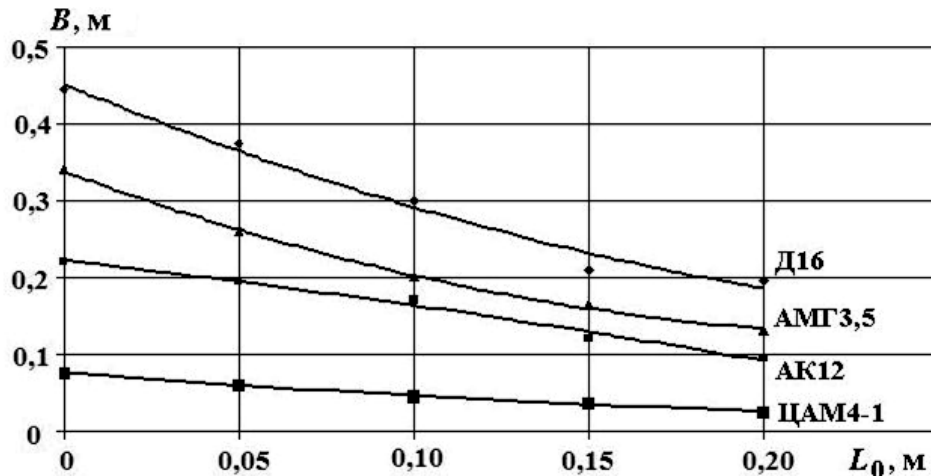


Рис. 3. Отклонения частиц от линии подачи для ряда сплавов, содержащихся в автомобильном ломе

При обработке результатов, показанных на рис. 2, подтверждено, что коэффициенты селективности $k_{\text{сел}}$, рассчитанные как отношения значений расчетных удельных электромагнитных усилий при одинаковой крупности, совпадают со значениями начальных значений $k_{\text{сел}0}$, определенных через значения разделительных признаков γ/ρ . В то же время при разных размерах частиц селективность сепарации будет уменьшаться. Так частицы деформируемых сплавов алюминия при размерах $a = b < 50$ мм будут смешиваться с крупными частицами литейных сплавов алюминия. При размерах частиц алюминиевых сплавов менее 35-40 мм

начинается их смешение с частицами магниевых сплавов и т.д. Отметим, что подобным возмущающим фактором, уменьшающим селективность сепарации, является также различие физических свойств сплавов, входящих в одну группу. Для снижения такого негативного влияния на качество индукционной сортировки можно рекомендовать предварительную сортировку лома по крупности с целью сужения диапазона крупности одновременно обрабатываемых частиц (например, можно выбрать диапазоны: +40–60 мм, +20–40 мм, +0–20 мм). Указанный подход был опробован при испытаниях описанной выше опытной установки.

На рис. 4 представлены отклонения разных сплавов, обеспечивающие селективность разделения в диапазоне крупности +20–40 мм. Например, для начальной точки подачи

сортируемых частиц $L_0 = 0,1$ м при размещении разделителя потока на расстоянии $B = 0,1$ м можно собирать алюминиевые и цинковые сплавы в разные приемники.

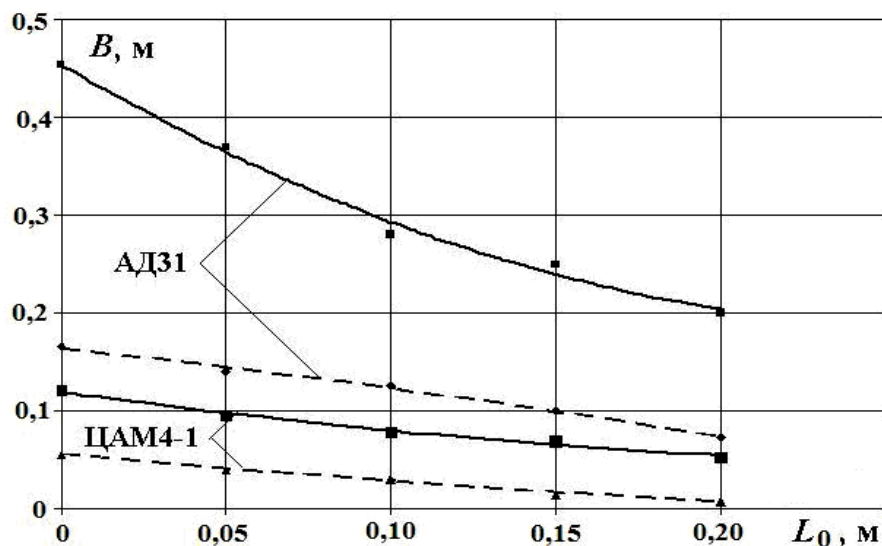


Рис. 4. Пример селективного разделения частиц алюминиевых и цинковых сплавов в диапазоне крупности от 20 мм (пунктирные линии) до 40 мм (сплошные линии)

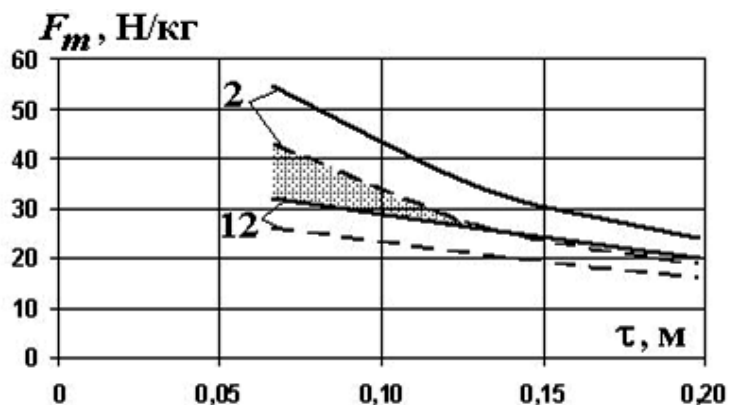


Рис. 5. Зависимости удельных электромагнитных усилий для деформируемых (сплошные линии) и литейных (пунктир) сплавов алюминия от величины полюсного деления при изменении толщины частиц от 2 до 12 мм (цифры на графиках)

Еще одним фактором, влияющим на селективность сортировки цветных металлов и сплавов, является толщина частиц d (размер в направлении перпендикулярном поверхности индуктора). Например, при расчетах сепаратора для сортировки деформируемых и литейных алюминиевых сплавов были получены зависимости удельных электромагнитных усилий от величины полюсного деления, показанные на рис. 5. Расчеты выполнены для квадратных пластин со сторо-

ной 40 мм при изменении их толщины от 2 до 12 мм. Очевидно, что в данном случае коэффициент селективности должен определяться как отношение удельного электромагнитного усилия, действующего на частицу деформируемого сплава алюминия толщиной 12 мм, и удельного усилия, действующего на частицу литейного сплава толщиной 2 мм. Как видно на рис. 5, в области малых полюсных делений такой коэффициент селективности $k_{\text{сел}} < 1$, что озна-

чает взаимозасорение фракций (заштрихованный сектор). Следует отметить, что негативное влияние толщины частиц на селективность индукционной сортировки снижается с увеличением полюсного деления индуктора. Следовательно, выбор большего полюсного деления при проектировании линейных индукторов, служит одним из способов, обеспечивающих селективность индукционной сортировки.

Заключение

Таким образом, в ходе выполненных исследований показано, что сортировка лома и отходов цветных металлов и сплавов существенно повышает ценность продуктов разделения как вторичного сырья для выплавки качественных сплавов. Одним из эффективных способов получения селективных концентратов цветных металлов и сплавов является электродинамическая

сепарация в бегущем магнитном поле. Результаты исследований показывают, что на процессы сепарации влияет множество случайных факторов: параметры бегущего магнитного поля (амплитуда индукции, частота, полюсное деление), характеристики линейного индуктора (ширина активной зоны, воздушный зазор и др.), а также параметры механической части сепаратора (размеры плоскости подачи, угол ее наклона, коэффициент трения и т. п.). Без оценки влияния таких факторов на эффективность индукционной сортировки и поиска путей повышения селективности нельзя обеспечить необходимое качество индукционной сортировки лома. Возможность решения такой задачи показана на примере оценки влияния на селективность размеров сепарируемых частиц металлов. Исследования в указанном направлении необходимо продолжить.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/.
2. Тенденции и перспективы развития рециклинга металлов / А.И. Татаркин, О.А. Романова, В.Г. Дюбанов, А.В. Дюшин, О.С. Брянцева // Экология и промышленность России. 2013. № 5. С. 4-10.
3. **Овсянников Б.В.** Изготовление деформированных изделий с использованием лома и отходов алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2014. № 5. С. 66-70.
4. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов / Г.А. Колобов, В.Н. Бредихин, В.М. Чернобаев. Москва: Металлургия. 1993. 288 с.
5. **Макаров Г.С.** Современные проблемы и перспективы рециклинга алюминия в России // Металлургия машиностроения. 2019. № 2. С. 28-33.
6. **Zhang S., Forssberg E.** Cable and wire scrap recycling by physical separation technologies // Environmental and Waste Management. 1998. Vol. 1. Issue 3. P. 189-202.
7. **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.
8. Aluminium 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.
9. Overview of the recycling technology for copper-containing cables / Liquan Li, Gongqi Liu, Dean Pan, Wei Wang, Yufeng Wu, Tieyong Zuo // Resources, Conservation & Recycling. 2017. Issue 126. P. 132-140.
10. **Cui J., Roven H.** Recycling of automotive aluminium // Transaction of non-ferrous metals society of China. 2010 (20). P. 2057-2063. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60417-9.

11. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems / S. Sakai, H. Yoshida, F. Passarini etc. // Journal of Material Cycles and Waste Management. Vol. 16. Issue 1. February 2014. P. 2-20. DOI 10.1007/s10163-013-0173-2

12. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, Т.Н. Дерендяева, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Промышленная энергетика. 2001. № 6. С. 16-19.

12. **Володин Г.И.** Металлоуловитель цветных металлов на основе двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Электромеханика. 1999. № 4. С. 16-18.

13. **Lungu M., Rem P.C.** Eddy-current separation of small non-ferrous particles using a single disc separator with permanent magnet // IEEE Transaction on Magnetics. 2003. № 39(4). P. 2062-2067.

14. **Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л.** Применение электродинамиче-

ских сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 22-25.

15. Переработка электронного лома: применение электродинамических сепараторов / В.В. Воскобойников, А.А. Дистанов, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Твердые бытовые отходы. 2014. № 2. С. 26-30.

16. Индукционная сортировка цветных металлов в бегущем магнитном поле / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев, С.Л. Назаров // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 42-49.

17. **Коняев А.Ю., Назаров С.Л.** Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели // Электротехника. 1998. № 5. С. 52-57.

18. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 104 с.

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

Багин Дмитрий Николаевич – доцент, кандидат технических наук, профессор Военно-учебного центра Уральского федерального университета, Екатеринбург

Бектабанов Чингис Айдарбекович – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Крылов Глеб Александрович – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

Andrey Yu. Konyaev – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Electrical Engineering, the Ural Federal University, Yekaterinburg

Dmitry N. Bagin – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, the Ural Federal University, Yekaterinburg

Chingis A. Bektabanov – Master student, Department of Electrical Engineering, the Ural Federal University, Yekaterinburg

Gleb A. Krylov – Master student, Department of Electrical Engineering, the Ural Federal University, Yekaterinburg

Статья поступила в редакцию 15.08.22, принята к опубликованию 07.09.22

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ-УСТАНОВКЕ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА

С.В. Тригорлый, В.В. Захаров, С.Г. Калганова,
И.И. Артюхов, А.С. Яковлев

SIMULATION OF HEAT TREATMENT PROCESSES OF DIELECTRICS IN A CONVEYOR-TYPE MICROWAVE UNIT

S.V. Trigorly, V.V. Zakharov, S.G. Kalganova,
I.I. Artyukhov, A.S. Yakovlev

В статье представлены результаты исследований электромагнитного и температурного полей в диэлектрике при термообработке в конвейерной СВЧ-установке. В качестве излучающих систем использовались два волноводно-щелевых излучателя, работающих на частоте 2,45 ГГц. Для получения наиболее равномерного распределения напряженности электрического поля и температуры на поверхности диэлектрика было выбрано оптимальное количество излучающих щелей и взаимное расположение излучателей. Исследование проводилось с помощью численного моделирования процесса СВЧ-нагрева с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Исследовано влияние мощности СВЧ-излучения и скорости движения конвейерной ленты на интенсивность нагрева диэлектрика. В результате моделирования определены оптимальная скорость движения конвейерной ленты и мощность СВЧ-излучения, при которых обеспечивается заданное тепловыделение и равномерность нагрева в диэлектрике.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, конвейерная установка, излучающая система, численное моделирование, скорость движения, мощность, равномерность нагрева

Микроволновые технологии широко применяются для интенсификации процессов нагрева и сушки различных диэлектри-

The article presents the results of research into electromagnetic and temperature fields in the dielectrics under thermal treatment processes in a conveyor-type microwave unit. Two slotted waveguide radiating elements operating at the frequency of 2.45 GHz have been used as radiating systems. To obtain most uniform distribution of the electric field strength and temperature over the dielectric surface, an optimal number of radiating slots and relative position of emitters were selected. The research was conducted by means of numerical simulation of the microwave heating process using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software package. Effects of the microwave radiation capacity and the conveyor belt speed on intensity of dielectric heating has been investigated. The simulation procedure allowed for determination of the optimal speed of the conveyor belt and capacity of the microwave radiation, which ensure a given heat release and uniformity of heating in the dielectric.

Keywords: microwave heating, conveyor system, radiating system, numerical simulation, movement speed, capacity, uniformity of heating

ческих материалов. В технологических целях актуально применение СВЧ-установок конвейерного типа (методического дейст-

вия), в которых термообработка материалов осуществляется в непрерывном потоке. Например, для термообработки сыпучих или малогабаритных материалов используются конвейерные СВЧ-установки [1, 2]. В конвейерных СВЧ-установках управление интенсивностью тепловыделения в диэлектриках может быть достигнуто изменением мощности СВЧ-излучения или скорости движения конвейерной ленты. Возможно и комбинированное управление. К СВЧ электротехнологическим установкам для термообработки материалов, как правило, предъявляются высокие требования по равномерности нагрева, что обеспечивается путем рационального выбора конструкции рабочих камер и излучающих систем. Оптимизация конструкции СВЧ-установок и режимов термообработки может быть выполнена с применением средств численного моделирования, например, программного обеспечения COMSOL Multiphysics [3].

Целью данной работы является моделирование электродинамических и тепловых процессов при термообработке ди-

электриков в СВЧ-установке конвейерного типа. Исследовано влияние скорости движения конвейерной ленты с нагреваемым материалом и мощности СВЧ-излучения на интенсивность тепловыделения и равномерность термообработки.

СВЧ-установка представляет собой нагревательную камеру, через щели в торцевых стенках которой движется конвейерная лента с нагреваемым материалом. В верхней части камеры установлены волноводно-щелевые излучатели, работающие на частоте 2,45 ГГц.

На рис. 1 представлена геометрическая модель СВЧ-установки. Для контроля температуры используется пирометрический датчик, подключаемый через запредельную волноводную трубку. Датчик расположен на расстоянии 1,5 см от второго излучателя по направлению движения конвейерной ленты. Модель имитирует измерение температуры на поверхности движущегося диэлектрика непосредственно под пирометрическим датчиком.

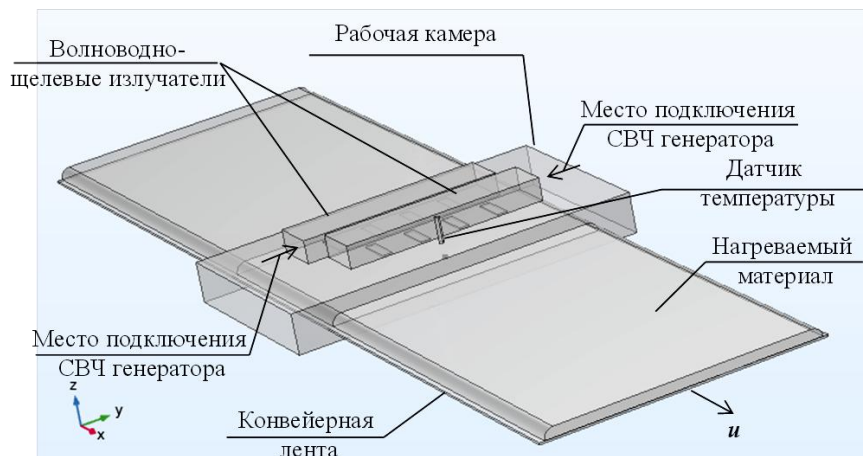


Рис. 1. Геометрическая модель СВЧ-установки конвейерного типа

Задача электродинамики волновых процессов в диэлектрических средах описывается уравнением Гельмгольца для вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ с соответствующими граничными условиями [4]. Дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарного режима нагрева с учетом известной скорости движения конвейера имеет вид:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_p \rho \cdot \mathbf{v} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = q_v. \quad (1)$$

Здесь c_p и ρ – удельная теплоемкость и плотность нагреваемого материала; T – температура; τ – время, $\mathbf{v}$ – вектор скорости движения нагреваемого материала (конвейера); λ – коэффициент теплопроводности; q_v – мощность внутренних ис-

точников теплоты, обусловленная диэлектрическими потерями в поле СВЧ.

На границе воздух – диэлектрик теплообмен происходит по закону Ньютона-Рихмана:

$$\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right)_S = -\alpha \cdot (T - T_{ext}), \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности S нагреваемого материала; T_{ext} – температура окружающей среды. Коэффициент теплоотдачи определяется на основе критериальных уравнений для конвективного теплообмена. Учитывается принудительная конвекция за счет подачи воздуха в рабочую камеру.

Связь между задачами электродинамики и теплопроводности определяется соотношением:

$$q_v = 0,5\omega\epsilon_0\epsilon_r'' \cdot |E|^2, \quad (3)$$

где ϵ_r'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости.

Для решения связанных задач (1)-(3) используется метод конечных элементов, реализованный в программе COMSOL Multiphysics [5, 6]. Определение минимальной мощности СВЧ-излучения и максимальной скорости движения диэлектрика по конвейерной ленте, при которых достигается требуемая однородность температурного поля для заданной толщины диэлектрика, производится на основании следующего критерия оптимизации:

$$J = \max_D |T(M, \tau_{set}, q) - T_{set}| \leq \psi, \quad (4)$$

где M – точка, принадлежащая рассматриваемой области D ; τ_{set} – заданное время достижения требуемой температуры; q – управляющая функция, зависящая от вида

управляющего воздействия (мощности СВЧ-генератора или скорости перемещения нагреваемого объекта); T_{set} – заданная температура нагрева; ψ – допуск на неравномерность нагрева.

На первом этапе исследований необходимо было добиться наиболее равномерного распределения электрического поля в области рабочей камеры вблизи поверхности нагретого диэлектрика.

Для этого были проведены исследования влияния количества щелей в волноводах и смещения волноводно-щелевых излучателей относительно друг друга. Установлено, что при ширине конвейерной ленты с нагретым материалом 55 см на заданной частоте 2,45 ГГц оптимальное количество щелей размером 7×2 см при длине каждого излучателя 40 см составляет 4 шт. Относительное смещение излучателей по оси y (рис. 1) составляет 4 см.

Для СВЧ-мощности 5 кВт при подключении СВЧ-генераторов с противоположных сторон волноводов распределение электрического поля на поверхности нагреваемого материала под излучателями получается наиболее равномерное (рис. 2).

На втором этапе исследования на основе численного моделирования определялась необходимая мощность СВЧ-генераторов и скорость конвейерной ленты, исходя из технологических требований к нагреву диэлектрика до температуры не менее 70° С.

В качестве объекта термической обработки (обеззараживания) рассматривался почвенный грунт, используемый для выращивания растений. При моделировании использовались основные исходные данные, представленные в таблице.

Параметр	Значение
Ширина нагреваемого материала, м	0,55
Толщина слоя нагреваемого материала, м	0,02
Длина рабочей камеры, м	0,4
Ширина рабочей камеры, м	0,7
Высота рабочей камеры, м	0,08

Параметр	Значение
Длина волноводно-щелевого излучателя, м	0,4
СВЧ-мощность каждого волноводно-щелевого излучателя, кВт	5
Диэлектрические свойства нагреваемого материала	2,6-0,377·j
Коэффициент теплопроводности нагреваемого материала, Вт/(м·°C)	1,49
Удельная теплоемкость нагреваемого материала, Дж/(кг·°C)	1150
Плотность нагреваемого материала, кг/м ³	2000
Начальная температура нагреваемого материала, °C	20
Температура подаваемого в камеру воздуха, °C	20
Скорость подаваемого в камеру воздуха, м/с	1

В результате моделирования были получены распределения электромагнитного и температурного полей в различных участках обрабатываемого объекта. Распределение напряженности электрического поля и температуры по поверхности диэлектрика показано на рис. 2 и 3 при мощности двух излучателей по 5 кВт каждый и скорости движения нагреваемого материала 20 мм/с в момент времени 30 с.

На рис. 2 и 3 видно, что при перемещении нагреваемого материала по рабочей камере

температурные поля, создаваемые двумя волноводно-щелевыми излучателями, накладываются друг на друга, обеспечивая более высокую равномерность нагрева, чем при использовании одного излучателя.

При СВЧ-мощности 2×5 кВт и скорости конвейерной ленты 20 мм/с обеспечивается заданная температура нагрева (не менее 70° C), а неравномерность тепловыделения в разных участках нагреваемого материала находится в пределах от 10 до 33%.

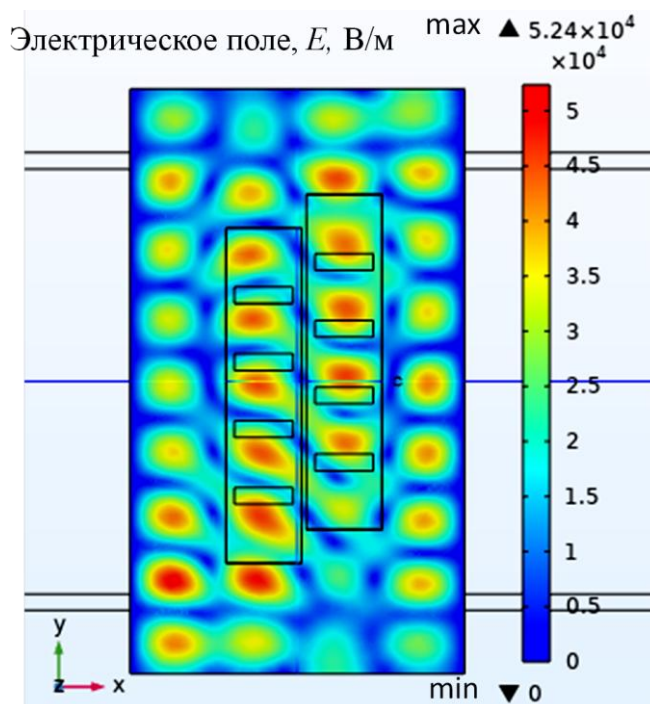


Рис. 2. Напряженность электрического поля внутри рабочей камеры при СВЧ-мощности 2×5 кВт

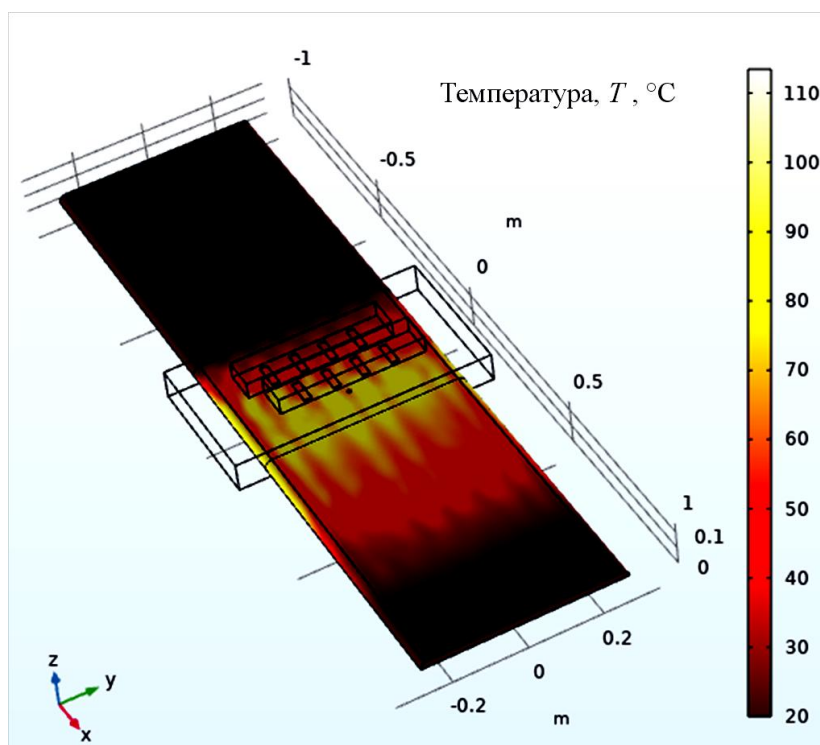


Рис. 3. Температурное поле при СВЧ-мощности 2×5 кВт и скорости движения нагреваемого материала 20 мм/с в момент времени 30 с

На рис. 4 и 5 представлены графики изменения температуры во времени в точке нахождения пирометрического датчика в зависимости от мощности СВЧ-излучения (при

фиксированной скорости движения конвейерной ленты 20 мм/с) и скорости движения конвейерной ленты (при фиксированной мощности СВЧ-излучения 2×5 кВт).

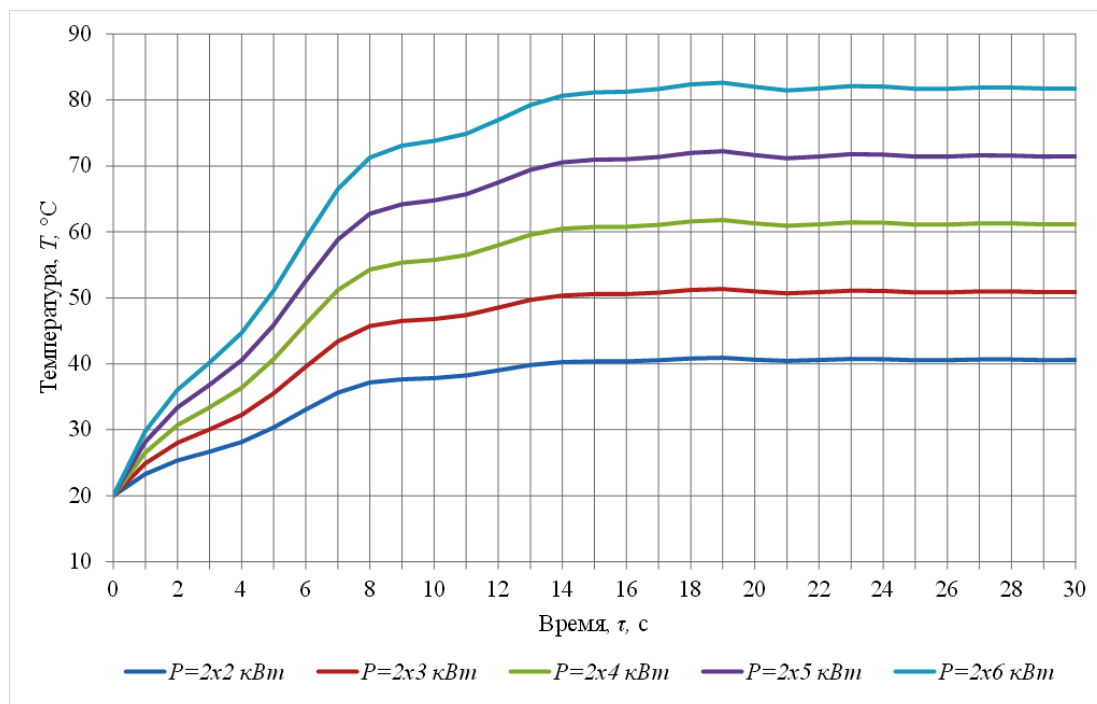


Рис. 4. Изменение температуры во времени при фиксированной скорости движения нагреваемого материала 20 мм/с и различной мощности СВЧ-излучения

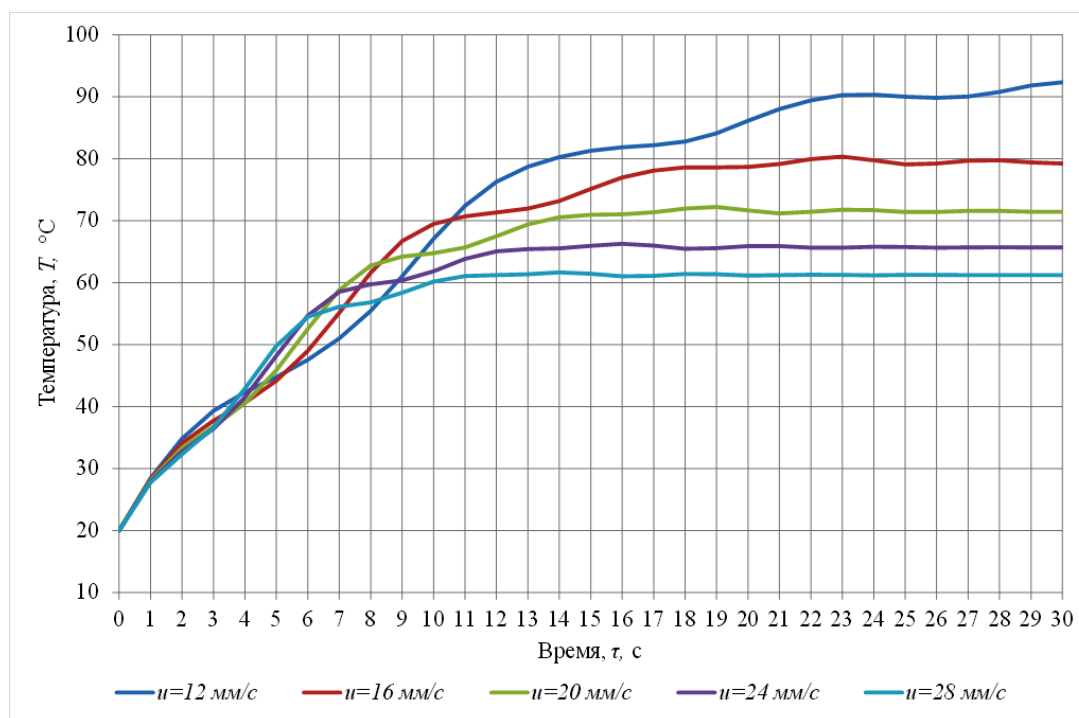


Рис. 5. Изменение температуры во времени при фиксированной СВЧ-мощности 2×5 кВт и различной скорости движения нагреваемого материала

В результате моделирования были установлены следующие зависимости.

При фиксированной скорости конвейерной ленты 20 мм/с увеличение СВЧ-мощности каждого излучателя на 1 кВт приводит к повышению температуры на 10°C в квазистационарном режиме нагрева, который можно описать линейной зависимостью (точность аппроксимации $R^2 = 1$):

$$T = 10,29 \cdot P + 20,006, \quad (5)$$

где P – мощность каждого излучателя.

Следует отметить, что время выхода на квазистационарный режим нагрева практически не зависит от мощности СВЧ и при скорости конвейерной ленты 20 мм/с составляет около 14 с.

Влияние скорости конвейерной ленты на температуру диэлектрика при фиксированной мощности каждого СВЧ-излучателя 5 кВт в квазистационарном режиме нагрева можно описать степенной зависимостью (точность аппроксимации $R^2 = 0,99$):

$$T = 304,18 \cdot v^{0,482}, \quad (6)$$

где v – скорость перемещения конвейерной ленты, мм/с.

Изменение скорости конвейерной ленты при фиксированной СВЧ-мощности (5 кВт для каждого излучателя) существенно влияет на время выхода на квазистационарный режим нагрева ($\tau_{\text{КС}}$). Эту зависимость можно описать полиномиальной функцией (точность аппроксимации $R^2 = 0,96$):

$$\tau_{\text{КС}} = 0,0357 \cdot v^2 - 2,2786 \cdot v + 46,743. \quad (7)$$

В данной работе рассмотрено также моделирование процессов при регулировании скорости движения транспортирующей ленты по температуре поверхности нагреваемого диэлектрика. В качестве датчика температуры применяется инфракрасный пирометр, измеряющий температуру на поверхности диэлектрика (рис. 1).

С помощью программы COMSOL Multiphysics создан блок моделирования регулятора скорости движения транспортирующей ленты в зависимости от измеряемой температуры. Закон регулирования в общем виде

$$v(\tau) = v_0 + k_p [T_{set} - T(\tau)] + k_I \int_0^{\tau} [T_{set} - T(\tau)] d\tau - k_D \frac{d}{d\tau} T(\tau). \quad (8)$$

Здесь $v(\tau)$ – изменение скорости от времени; v_0 – начальная скорость; T_{set} , $T(\tau)$ – заданная и текущая температура нагрева диэлектрика в точке измерения; k_p , k_I , k_D – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты.

Предыдущими исследованиями было установлено, что из-за нелинейности вольт-амперной характеристики магнетрона выходная мощность СВЧ-генератора существенно зависит от величины сетевого напряжения [7, 8]. Следовательно, изменение напряжения питания СВЧ-генератора можно рассматривать как возмущающий фактор в системе стабилизации температуры обрабатываемого диэлектрика. Управляющим воздействием в такой системе будет изменение скорости конвейерной ленты. Другим управляющим воздействием в системе стабилизации температуры обрабатываемого материала может быть изменение мощности СВЧ-генератора, однако в данной работе этот фактор не рассматривался.

В силу большой инерции тепловых процессов при СВЧ-диэлектрическом нагреве рассматривалось моделирование регулирования скорости движения транспортирующей ленты по температуре поверхности нагреваемого диэлектрика с применением П-регулятора. С помощью программных средств задано условие, при котором ско-

рость движения конвейера равна нулю до тех

пор, пока температура в контрольной точке на поверхности диэлектрика не достигнет величины $T_{set} = 70^\circ\text{C}$. При этом СВЧ-мощность, подаваемая на каждый излучатель, составляет $P = 5$ кВт, $v_0 = 0$ см/с, $k_p = 3$.

Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7 в виде графика изменения температуры во времени в контрольной точке и графика изменения скорости движения конвейера.

Установлено, что до момента времени 14 с скорость движения транспортной ленты равна нулю. После этого начинается движение конвейера и регулирование скорости.

Изменение скорости в диапазоне от 14 с до 40 с имеет колебательный характер (от 3,1 до 0,6 см/с). Затем скорость изменяется плавно, достигая установившегося значения 0,9 см/с. Колебания температуры в диапазоне от 20 с до 40 с незначительны: максимальное отклонение температуры от заданной величины в контролируемой точке не превышает $+2,7^\circ\text{C}$.

Таким образом, поддержание заданного значения температуры при термообработке диэлектриков в СВЧ-установке конвейерного типа возможно на основе использования П-регулятора. Автоматическое регулирование скорости движения транспортирующей ленты можно осуществить с помощью частотного регулируемого электропривода.

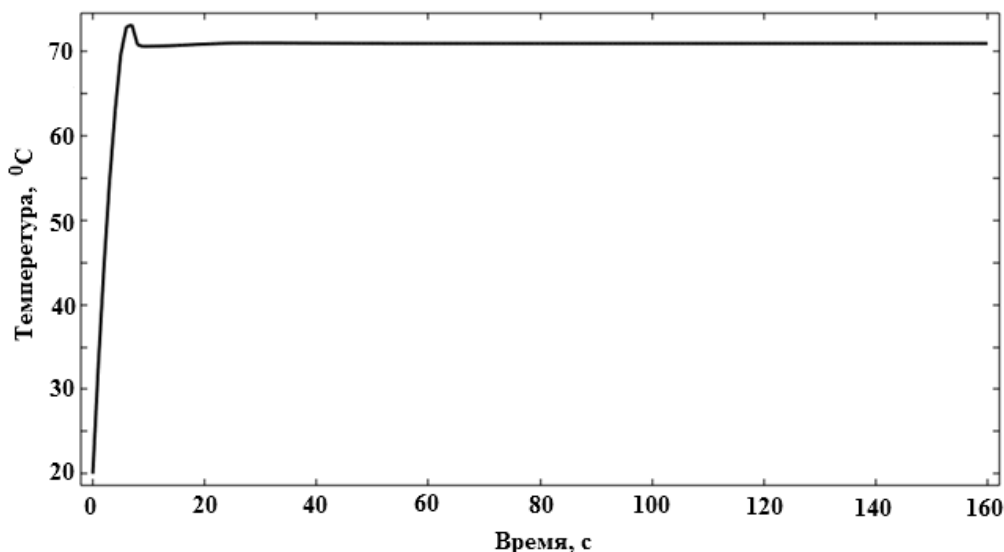


Рис. 6. Изменение температуры во времени в контрольной точке при $P = 5$ кВт, $k_p = 3,0$

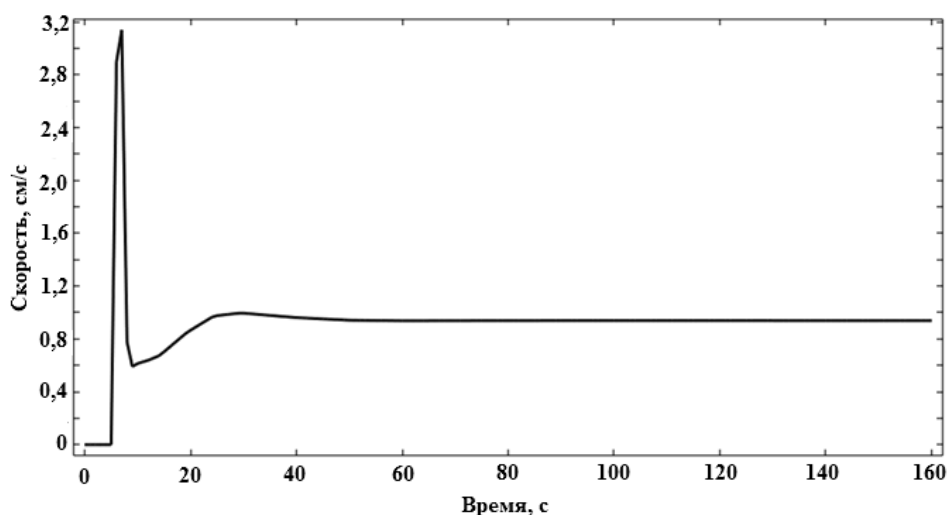


Рис. 7. Изменение скорости конвейера

Выводы

1. Изучение процесса нагрева грунта в СВЧ-установке конвейерного типа с целью обеззараживания позволило получить оптимальные параметры СВЧ-установки. Установлено, что заданная температура нагрева – не менее 70°C , позволяющая эффективно проводить процесс обеззараживания, может быть достигнута при использовании двух волноводно-щелевых излучателей, смещенных друг относительно друга, мощность излучения каждого из которых 5 кВт. При такой мощности оптималь-

ная скорость перемещения конвейерной ленты составляет 20 мм/с.

2. Получены зависимости температуры нагрева диэлектрика от мощности СВЧ-излучения и скорости движения конвейерной ленты. Установлена зависимость времени выхода на квазистационарный режим нагрева диэлектрика от скорости движения конвейерной ленты.

3. Результаты работы могут быть использованы при разработке систем автоматического управления СВЧ-нагревом диэлектриков в конвейерных установках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Methlouthi A., Rouaud O., Boillereaux L.** Microwave Applicator with Conveyor Belt System // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris. URL: https://www.comsol.ru/paper/download/63600/methlouthi_paper.pdf (accessed October 24, 2021).

2. Novel Foodstuff Conveyor Belts Compound For Energy Saving: The effect of microwave pre-heating DND mixed fillerson mechanical properties / S. Limhengha, S. Limnararat, I. Jangchud, W. Sriseubsai // ARPN Journal of engineering and applied sciences. 2017. Vol. 12. № 4. P. 1105-1110.

3. **Kalganova S., Trigorly S., Zakharov V.** Computer Simulation of Microwave Heat Treatment of Dielectrics // IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (INFORINO), MPEI. Moscow, 2018. P. 1-5.

4. **Jin J.-M.** The Finite Element Method in Electromagnetics, 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2002. 389 p.

5. Моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков с применением пакета COMSOL MULTIPHYSICS / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 6-10.

6. Моделирование СВЧ электротехнологических процессов и установок с помощью программного пакета COMSOL MULTIPHYSICS / С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, С.Г. Калганова, В.В. Захаров. Саратов: Амирит, 2019. 105 с.

7. Артюхов И.И., Земцов А.И., Тютьманова В.В. Экспериментальное исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (8). С. 96-100.

8. Моделирование и исследование системы электропитания мультигенераторной установки СВЧ-нагрева / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.К. Пыльская, С.В. Молот // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические наук. 2020. Т. 28. № 4 (68). С. 106-117.

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Захаров Вадим Валерьевич – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории Управления научных исследований и разработок АО «Гипрониигаз», Саратов

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

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

Яковлев Андрей Сергеевич – аспирант

Sergey V. Trigorly – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim V. Zakharov – PhD (Technical Sciences), Head of Research Laboratory of the Department of Scientific Research and Development, JSC «Giproniigaz», Saratov

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

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

Andrey S. Yakovlev – Postgraduate, Depart-

кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

ment of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.08.22, принята к опубликованию 12.09.22

УДК 621.785.545

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

С.В. Телегин, И.Ю. Гоц

INFLUENCE OF IR LASER RADIATION MODES ON THE FORMATION OF COMPOSITE SURFACE LAYERS OF TITANIUM PRODUCTS

S.V. Telegin, I.Y. Gots

Исследование посвящено изучению морфологии, механических свойств и коррозионной стойкости поверхности технического титана после модификации импульсным лазерным излучением. Показано, что морфология, механические свойства и коррозионная стойкость металлокерамических композиционных поверхностных слоев зависят от энергетических и пространственно-временных параметров процесса лазерной модификации, изменение которых позволяет формировать покрытия с заданными свойствами.

Ключевые слова: лазерная обработка, технический титан, металлокерамика, композиционные поверхностные слои

The research is devoted to the study of morphology, mechanical properties and corrosion resistance of technical titanium surfaces after modification by pulsed laser irradiation. It is shown that morphology, mechanical properties and corrosion resistance of metal-ceramic composite surface layers depend on the energy and space-time parameters of the laser modification process, where the changes will allow to form coatings with specified properties.

Keywords: laser processing, technical titanium, metal-ceramics, composite surface layers

Введение

В машино- и приборостроении для соответствия современному уровню качества изделий требуется сочетание определенной морфологии и физико-механических характеристик поверхности изделий, что достигается путем нанесения или формирования различных покрытий. В этом случае ключевые роли играют микротвердость слоя и его прочность сцепления с основой [1]. Широкое применение нашли изделия системы «титан-покрытие», так как это позволяет снизить вес изделий без потери их функциональных характеристик [1, 4]. В качестве материала основы для после-

дующего формирования покрытий предпочтения отдаются техническому титану ВТ1-00 и ВТ1-0 вследствие минимального содержания примесей, что позволяет прогнозировать химический и фазовый состав покрытий и поверхностных слоев. В последующем на их поверхности наносят или формируют композиционные покрытия или поверхностные слои различными технологическими методами, включая электротехнологические: газотермическое напыление, оксидирование и осаждение из газовой фазы [4-7].

В данной работе как альтернатива электрохимическим и химическим методам

формирования покрытий системы Ti-O-N, предлагается создавать поверхностные слои на изделиях из технического титана, в частности мембранах преобразователей давления, с требуемой морфологией, высокими механическими свойствами, а также высокой коррозионной стойкостью за счет термического лазерно-упрочняющего воздействия с одновременным формированием металлокерамических композиционных поверхностных слоев системы Ti-O-N.

Целью исследования является установление зависимостей образования композиционных поверхностных слоев системы Ti-O-N при импульсной лазерной обработке (ИЛО) за счет установления влияния режимов технологического процесса на морфологию, механические свойства и коррозионную стойкость.

Методика эксперимента

В качестве образцов использовались плоские пластины из технического титана BT1-00 размером 20×20×2,5 мм. Очистка и обезжиривание производились с использованием ультразвуковой ванны УЗУМИ-2

при частоте 22 кГц в водном растворе (3...5 г/л Na₃PO₄ и 3...5 г/л поверхностно-активного вещества ОП-10) при температуре от 38±2°С в течение 5 минут. Энергетическое воздействие лазерным излучением осуществлялось на лазерном технологическом комплексе LRS-50. В качестве управляющих факторов технологического процесса выступали: напряжение на лампе накачки лазера; длительность импульса; частота следования импульсов, а также число импульсов в одну зону воздействия. На основе раннее проведенного планирования полного факторного эксперимента и построенного плана эксперимента с 2 уровнями варьирования факторов и 4 факторами были определены 16 режимов импульсной лазерной модификации при различной нагрузке на энергетическую систему лазера. Далее на основании составленных режимов обработки проводилось измерение энергетических параметров процесса: плотности мощности и плотности энергии лазерного излучения с использованием измерителя энергии и мощности фирмы «Laserstar Orphi» (табл. 1).

Таблица 1. Технологические режимы импульсной лазерной обработки

Номер режима	Фактор					
	Напряжение, U, В	Длительность импульса, τ, мс	Частота следования, f, Гц	Число импульсов, N, шт.	Нагрузка на энергетическую систему лазера, %	Плотность энергии, Q, Дж/м ²
1	400	8	2	5	100	3,03×10 ⁷
2	400	3,3	2	5	75	1,62×10 ⁷
3	400	8	1	5	100	3,03×10 ⁷
4	400	3,3	1	5	75	1,62×10 ⁷
5	400	8	2	2	100	1,21×10 ⁷
6	400	3,3	2	2	75	0,65×10 ⁷
7	400	8	1	2	100	1,21×10 ⁷
8	400	3,3	1	2	75	0,65×10 ⁷
9	310	8	2	5	50	1,60×10 ⁷
10	310	3,3	2	5	25	0,85×10 ⁷
11	310	8	1	5	50	1,60×10 ⁷
12	310	3,3	1	5	25	0,85×10 ⁷

Окончание табл. 1

Номер режима	Фактор					
	Напряже- ние, U, В	Длительность импульса, τ , мс	Частота следования, f , Гц	Число импульсов, N , шт.	Нагрузка на энергетиче- скую систему лазера, %	Плотность энергии, Q , Дж/м ²
13	310	8	2	2	50	$0,64 \times 10^7$
14	310	3,3	2	2	25	$0,32 \times 10^7$
15	310	8	1	2	50	$0,64 \times 10^7$
16	310	3,3	1	2	25	$0,32 \times 10^7$

Исследование морфологии поверхности проводилось путем получения и дальнейшего анализа изображений оптической микроскопии на металлографическом микроскопе МИМ-8М.

Исследование параметров структуры поверхности производили на анализаторе изображения микроструктур АГПМ-6М ФУЛК 401163.001-01 с программой «Металлограф». Измерение микротвердости производилось с использованием микротвердомера модели HVS-1000B, оснащенного видеоизмерительной системой SP-5 (ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников»).

Адгезионная прочность исследовалась методом сдвига при помощи машины испытательной универсальной «ИР 5082-100» (ГОСТ 14759-69).

Определение коррозионной стойкости проводилось методом снятия поляризационных кривых в потенциодинамическом режиме в 3-процентном растворе хлористого натрия при нормальных условиях и скорости линейной развертки потенциалом 8 мВ/с (ГОСТ 9.302-88). Электрохимическая ячейка состояла из трех электродов. Исследуемые образцы выступали в качестве катодов, платина служила анодом. Измерения зависимости потенциала от тока снимались относительно стандартного водного хлорсеребряного электрода сравнения ($E = 0,223$ В). Для снятия и регистрации данных использовался импульсный компакт-потенциостат П-8 в комплекте с компьютерным программным обеспечением.

Результаты и их обсуждение

Изменение режимов лазерного излучения позволяет изменять энергетические параметры воздействия, регулировать температурное воздействие, влияющее на морфологию, механические свойства, а также коррозионную стойкость поверхностного слоя технического титана. В качестве основного электротехнологического параметра обработки была выбрана плотность энергии лазерного излучения, рассчитываемая как энергия, деленная на площадь лазерного луча.

В ходе исследования было выявлено, что использование напряжения на лампе накачки лазера от 310 до 400 В и длительности импульсов от 3,3 до 8 мс увеличивает энергетические параметры лазерной модификации, что способствует достижению температур обработки с оплавлением поверхности и формированию при дальнейшей кристаллизации развитой поверхностной (рис. 1 и 2). Частота следования импульсов f позволяет минимизировать изменение температуры в пятне нагрева в ходе импульсной лазерной обработки. Число импульсов N оказывает прямое влияние на морфологию поверхностного слоя. Так каждый последующий импульс увеличивает температурное воздействие на поверхностный слой, при учете незначительного снижения температуры между импульсами вследствие отвода теплоты в глубь материала и в окружающую атмосферу. При использовании более 5 импульсов при аналогичных других параметрах происходит разрушение поверхности, при этом формируются трещины на периферии зоны воздействия, а в центре образуется кратер за счет процессов лазерной абляции.

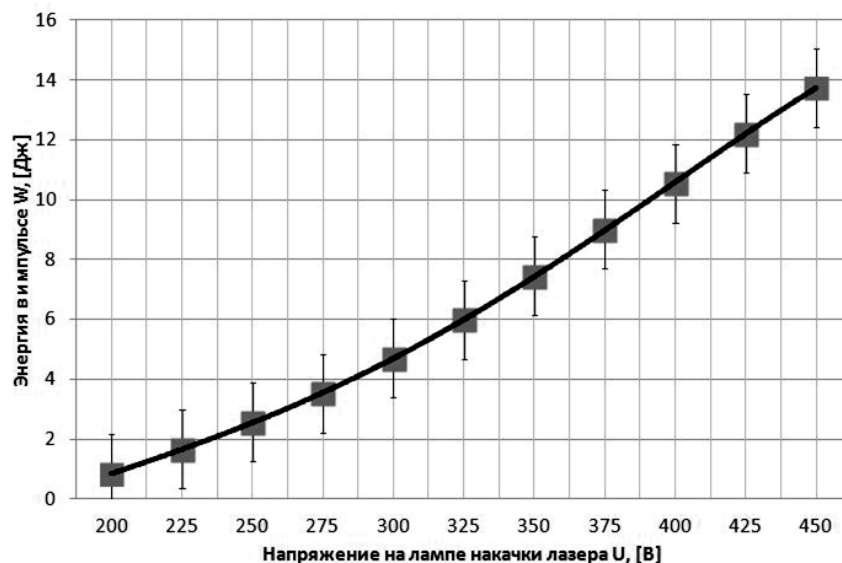


Рис. 1. Влияние напряжения лампы накачки лазера на энергию в импульсе

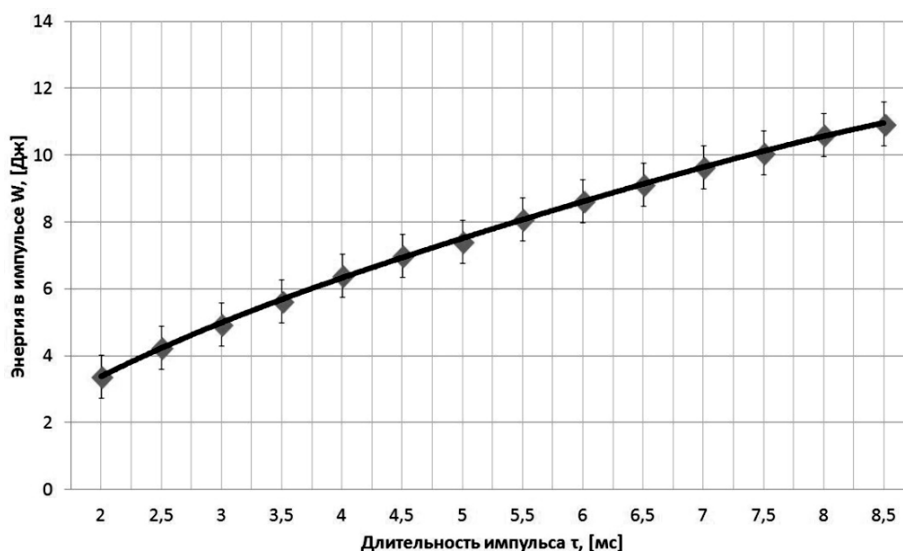


Рис. 2. Влияние длительности импульса излучения на энергию в импульсе

Существует возможность проводить лазерную модификацию поверхностных слоев титана с оплавлением и без оплавления поверхности. В ходе эксперимента было выявлено, что при обработке с оплавлением при плотности энергии свыше 1×10^7 Дж/м² (режимы с нагрузкой на энергетическую систему лазера более 50 %) формируется более развитая морфология поверхностного слоя. При обработке без оплавления, нагрузка менее 50 %, на топографию поверхности оказывает влияние качество ее предварительной обработки, т.е. шероховатость, при этом формируется тонкий металлокерамический слой, покрывающий исходную

поверхность [8]. Использование плотности энергии более 4×10^7 Дж/м² приводит к образованию трещин в поверхностном слое, вызванные высокими внутренними напряжениями в поверхности [9].

В ходе анализа изображений оптической микроскопии определено, что на конечную морфологию металлокерамических поверхностных слоев оказывают влияние все выше описанные технологические режимы процесса ИЛО (рис. 3). При лазерной модификации по режиму 1 и 3 с плотностью энергии $3,03 \times 10^7$ Дж/м² поверхность состоит из зерен размером 0,62 мкм, а при плотности энергии $1,62 \times 10^7$ Дж/м² (режимы № 2 и 4) – 0,79 мкм.

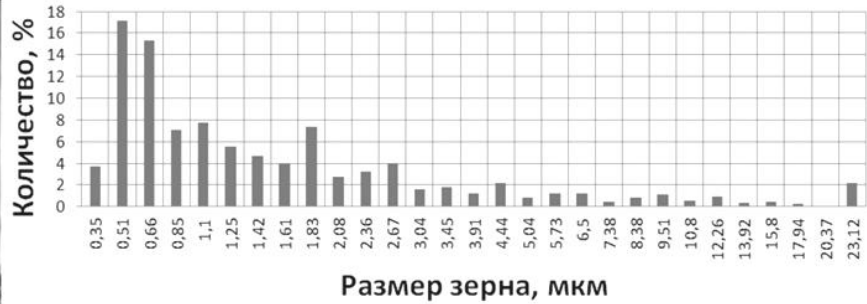
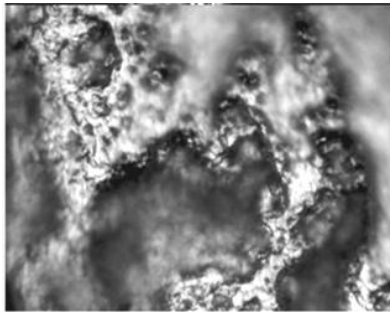


Рис. 3. Гранулометрический анализ металлокерамического поверхностного слоя сформированного при использовании по режиму № 1 ($U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 5$, $Q = 3,0 \times 10^7$ Дж/м²)

Толщина модифицированного слоя, т.е. слой с измененной структурой, варьируется от 40 до 140 мкм в зависимости от параметров лазерной обработки (рис. 4). Из представленной гистограммы видно, что при воздействии на поверхность лазерным излучением с плотностью энергии до $0,85 \times 10^7$ Дж/м² толщина слоя не превышает 70 мкм, что связано с низкоэнергетической обработкой и как следствие малой глубиной проникновения лазерного излучения в поверхностные слои. Напряжение на лампе накачки 400 В и длительность импульса

8 мс играют главную роль в формировании требуемой толщины поверхностных слоев.

Для получения толщины модифицированного слоя свыше 100 мкм требуется выбирать режимы лазерной обработки, сочетающие напряжение на лампе накачки лазера 400 В, длительность импульса 3,3 мс и 5 импульсов в одну зону воздействия. Однако, при обработке тонколистовых заготовок использовании 5 импульсов может привести к короблению изделия. В этом случае необходимо использовать 2 импульса, но с увеличением их длительности до 8 мс.

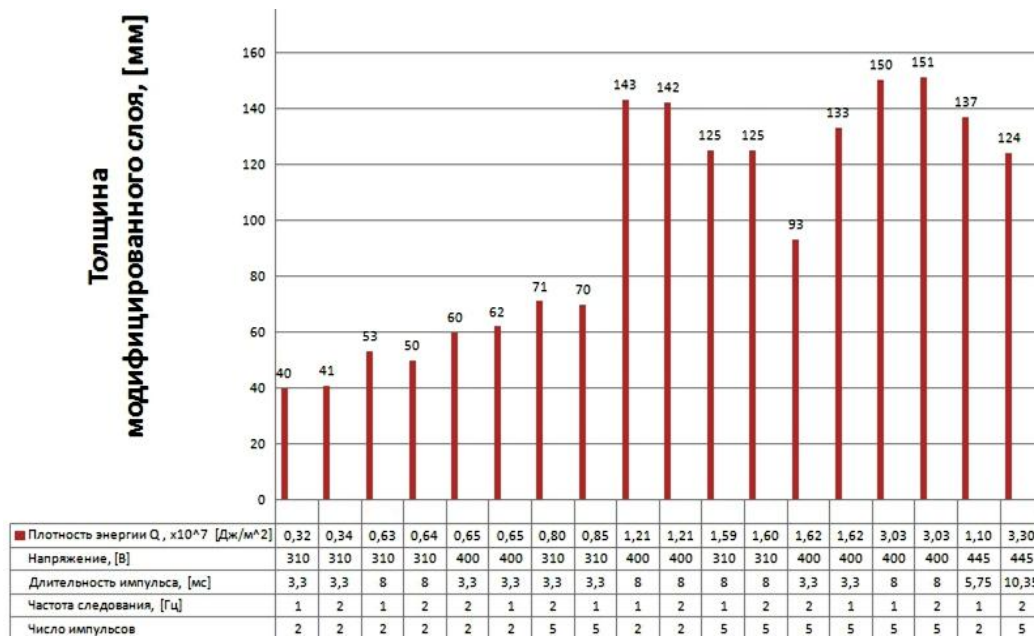


Рис. 4. Зависимость толщины металлокерамических поверхностных слоев от плотности энергии лазерного излучения

Микротвердость исходного титана ВТ1-00, не подвергнутого обработке, составляла $1,6 \pm 0,2$ ГПа и была не равномерна по пло-

щади поверхности, что объясняется технологическим процессом изготовления титановых пластин на металлургическом предприятии.

Лазерная обработка по режимам № 14 ($U = 310$ В, $\tau = 3,3$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 2$) и № 16 ($U = 310$ В, $\tau = 3,3$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 2$) способствуют выравниванию распределения значения микротвердости в поверхностном слое, при этом установлено увеличение микротвердости на 30 % по сравнению с исходной. Это объясняется началом фазово-структурных изменений в поверхностном слое титановых сплавов за счет температурного воздействия. Высокоэнергетическая обработка при использовании режимов сочетающих в себе $U = 400$ В, $\tau = 3,3$ мс, $N = 5$ или $U = 310$ В, $\tau = 8$ мс, $N = 5$, приводит к оплавлению по-

верхности титана, активации диффузионных процессов в жидкой фазе кислорода и азота из окружающей атмосферы, что приводит к фазово-структурным преобразованиям с образованием поверхностных слоев системы Ti-O-N. При этом происходит значительное увеличение значений микротвердости до 10-11 ГПа, что в 6 раз больше, чем у титана в необработанном состоянии (рис. 5). Дальнейшее увеличение плотности энергии лазерного излучения приводит к снижению величины микротвердости, так как в поверхностном слое начинают образовываться трещины.

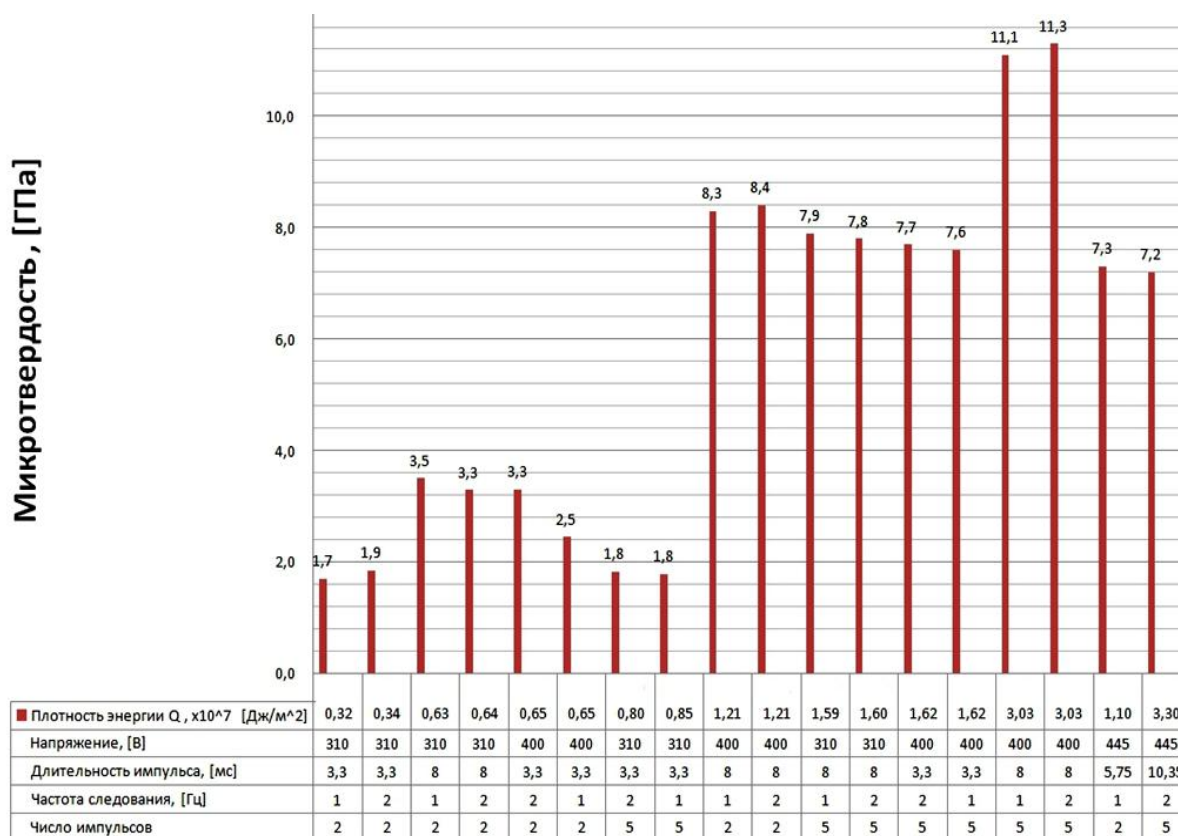


Рис. 5. Влияние плотности энергии лазерного излучения на микротвердость металлокерамических поверхностных слоев

Проведенные исследования адгезионной прочности металлокерамических поверхностных слоев показали, что максимальная величина достигается при импульсной лазерной обработке при использовании режима № 1 ($U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$, $Q = 3,03 \times 10^7$ Дж/м²) и составляет $28 \pm 1,5$ МПа (рис. 6), что соответствует требованиям предъявляемым к

металлокерамическим покрытиям полученным электрохимическими и химическими методами на мембранах преобразователей давления, предназначенных для пропорционального непрерывного преобразования давления и разрежения давлений жидкостей и газов в нейтральных и агрессивных средах в унифицированный токовый выходной сигнал.

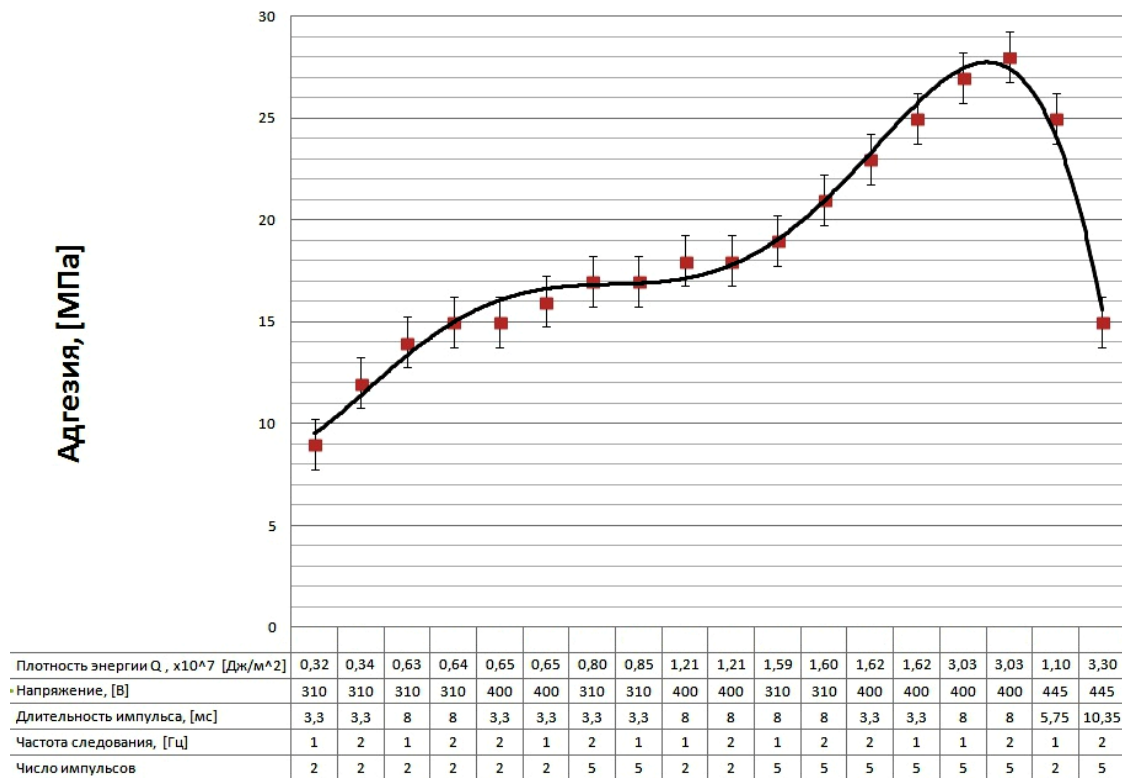


Рис. 6. Влияние плотности энергии лазерного излучения на микротвердость металлокерамических поверхностных слоев

При использовании напряжения на лампе накачки более 400 В и длительности импульса более 8 мс приводит к резкому снижению адгезии модифицированного слоя. Данным момент связан с образованием трещин между модифицированным слоем и исходной титановой основой.

Кривые зависимости плотности тока от потенциала (i , E) при заданной линейной скорости развертки потенциала 8 мВ/с снимали от бестокового потенциала в анодную и катодную сторону до резкого подъема тока. Так как в данных условиях процесс коррозии контролируется катодной реакцией, то построение коррозионных диаграмм позволило определить потенциал и ток коррозии протекающей с кислородной и водородной деполяризацией.

Анализ результатов показал, что более положительный потенциал соответствует образцу металлокерамического поверхностного слоя сформированного по режиму № 1 при использовании $U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$, $Q = 3,03 \times 10^7$ Дж/м² и составляет $E_{cm} = -0,079$ В (отн.в.х.с.э.). Он же обладает и более

широкой областью термодинамический стабильности (крайние точки начала кислородной и водородной коррозии) $\Delta E = 2,62$ В, в то время как на чистом титане $\Delta E = 2,5$ В. Значения плотностей катодного и анодного токов коррозии близки к токам обмена, что указывает на высокое электросопротивление полученных слоев.

Как видно из результатов исследований, эти данные имеют неоднозначный характер. Согласно этому методу наибольшей коррозионной стойкостью обладают образцы с чистым титаном (рис. 7 а) и модифицированные слои, сформированные по режиму № 1 при использовании $U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$, $Q = 3,03 \times 10^7$ Дж/м² с образованием поверхностных слоев системы Ti-O-N (рис. 7 б), а образцы по режиму № 16 ($U = 310$ В, $\tau = 3,3$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$, $Q = 0,32 \times 10^7$ Дж/м²) состоящие системы Ti-O им проигрывают (рис. 7 в). Это несоответствие связано, предположительно, с различием типов поверхностных слоев и делать однозначные выводы сложно.

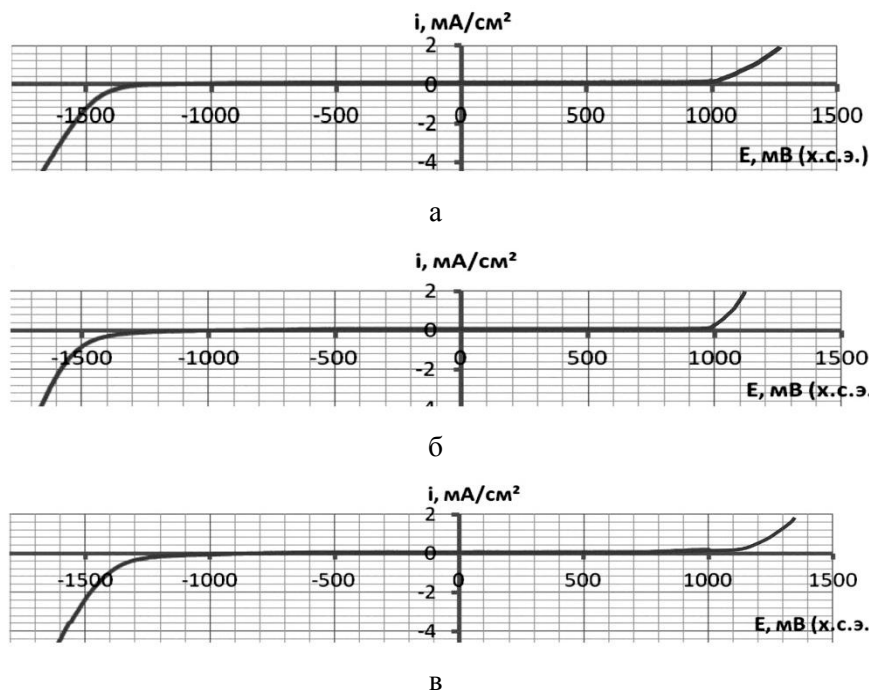


Рис. 7. Потенциодинамические кривые, снятые в 3%-м растворе NaCl при скорости линейной развертки потенциала $v = 8$ мВ/с при температуре 25°C:
 а) чистый необработанный титан; б) на металлокерамическом поверхностном слое, сформированном по режиму № 1 ($U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$, $Q = 3,03 \times 10^7$ Дж/м²);
 в) на металлокерамическом поверхностном слое, сформированном по режиму № 16 ($U = 310$ В, $\tau = 3,3$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 2$, $Q = 0,32 \times 10^7$ Дж/м²)

Таблица 2. Влияние технологических операций на электрохимическое поведение титанового электрода

Наименование образца	ΔE , В	i_{κ}^a , мА/см²	i_{κ}^k , мА/см²	E_{cm} , (В)
Режим № 16: $U = 310$ В, $\tau = 3,3$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 2$ (плотность энергии $0,32 \times 10^7$ Дж/м²)	1,15	0,411	0,179	-0,238
Режим № 1: $U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$ (плотность энергии $3,03 \times 10^7$ Дж/м²)	2,62	0,178	0,357	-0,079
Чистый Ti (без лазерной обработки)	2,5	0,178	0,263	-0,085

Заключение

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что, варьируя режимы импульсной лазерной модификации, существует возможность путем управления энергетическими параметрами процесса формировать поверхностные слои с различной морфологией, механическими свойствами и коррозионной стойкостью в зависимости от области применения изделий из титана.

При увеличении напряжения на лампе накачки до $U = 400$ В и длительности сле-

дования импульсов до $\tau = 8$ мс, частоты следования импульсов до $f = 2$ Гц происходит оплавление поверхности с дальнейшей перекристаллизацией модифицированного слоя, приводящее к увеличению основных характеристик морфологии поверхности. За счет фазово-структурных изменений в поверхностном слое обеспечивается 6-кратное увеличение микротвердости исходной титановой основы с 1,5 до 11 ГПа. Максимальная адгезионная прочность составляет $28 \pm 1,5$ МПа, что соответствует

требованиям предъявляемым к покрытиям мембран полученных электрохимическими и химическими методами. Повышение механических свойств титановой поверхности после воздействия импульсной лазерной обработки связано с достижением высо-

ких температур нагрева и дальнейшим охлаждением с высокими скоростями, что приводит к фиксации пересыщенных твердых растворов, неоднородных по химическому составу фаз, которые, создают межфазовые напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Laser-induced surface alloying in nanosized Ni/Ti multilayer structures / S. Petrovic, B. Radak, D. Perusko et al. // Appl. Surf. Sc. 2013. № 264. P. 273-279.

2. **Лясников В.Н., Протасова Н.В., Толмачёв К.С.** Плазмонапылённые материалы и покрытия. Свойства, технология, оборудование и применение: учеб. пособие / М-во образования и науки Рос. Федерации. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 489 с.

3. **Хаскин В.Ю.** Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения: (обзор) // Автомат. Сварка. 2008. № 12. С. 24-32.

4. Structural characterization and surface modification of titanium plates after Nd:YAG laser treatment / A. Bahloul, R. Oumeddour, M.C. Sahour, G. Pillon // Portugaliae Electrochimica Acta. 2020. Vol. 38. № 4. P. 215-228. DOI 10.4152/pea.202004215. EDN DYSPDZ.

5. Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Application / Editors Jonathan Lawrence. John Wiley & Sons, Inc. 2018. 802 p. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-05718-5>.

6. **Митрофанов А.А., Чашин Е.А., Балашова С.А.** Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 103-105.

7. Влияние ионной имплантации на структурно-фазовое состояние и коррозионные свойства титана с различным размером зерна / И.А. Курзина, Н.А. Попова, Е.Б. Фирхова и др. // Материаловедение. 2013. № 6. С. 25-32.

8. **Телегин С.В., Лясников В.Н., Гоц И.Ю.** Анализ химического и фазово-структурного состава поверхности титана после импульсной лазерной обработки // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 3. № 1 (80). С. 97-101.

9. Лазерная модификация поверхности титана: технология, свойства, перспективы применения / С.В. Телегин, В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2019. № 3. С. 70-73.

Телегин Сергей Владимирович – ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Гоц Ирина Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Telegin – Assistant lecturer, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina Yu. Gots – PhD (Chemistry), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.08.22, принята к опубликованию 12.09.22

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНО- И МИКРОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ЭНЕРГОПОДВОДА

В.Ю. Кожевников, В.Д. Федотов

MODELING THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING NANO- AND MICROPARTICLES OF IRON OXIDE USING THE MICROWAVE POWER SUPPLY

V.Yu. Kozhevnikov, V.D. Fedotov

Рассмотрена технология получения нано и микрочастиц оксида железа при СВЧ-воздействии на коллоидные растворы. Приведены результаты моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics СВЧ-воздействия на коллоидные растворы в непрерывном режиме, позволяющие получать стабильные растворы железа с достаточно узким распределением нано- микрочастиц по размеру.

Ключевые слова: СВЧ-воздействие, нано- и микрочастицы, оксид железа, численное моделирование, коллоидные растворы, технология, СВЧ-установка

Одним из наиболее перспективных способов синтеза нано частиц в водных растворах является метод химического восстановления при СВЧ-воздействии [1]. Размер образующихся частиц лежит в диапазоне 0,7-100 нм. СВЧ-нагрев имеет ряд других преимуществ перед традиционными способами нагрева.

СВЧ-установка для получения нано-частиц в водных растворах состоит из следующих основных узлов: источника СВЧ-энергии, линии передачи, рабочей камеры проточного типа, позволяющей обеспечивать эффективное взаимодействие энергии СВЧ электромагнитного по-

The article considers the technology applied to obtain nano- and microparticles of iron oxide under microwave exposure to colloidal solutions. We present the results of modeling in the COMSOL Multiphysics environment of microwave exposure to colloidal solutions in the continuous mode, which allow for obtaining stable iron solutions with a fairly narrow distribution of nano- and microparticles.

Keywords: microwave exposure, nano- and microparticles, iron oxide, numerical modeling, colloidal solutions, technology, microwave unit

ля с раствором, системы дозирования и системы управления (рис. 1).

В данной работе произведен расчет камеры СВЧ-установки. Для эффективного синтеза нано-и микрочастиц железа рассмотрена камера с бегущей волной (КБВ) на круглом волноводе с экспоненциальным согласующим экраном. Этот тип камеры позволяет получить не только практически идеальное согласование рабочей камеры с линией передачи, но и равномерное тепловыделение в обрабатываемом объекте по всей длине камеры [2], а это является одним из условий образования нано- и микрочастиц и более узкого распределения частиц по размерам.



Рис. 1. Блок-схема установки по получению нано- и микро частиц оксида железа

Для расчета параметров камеры использован метод эквивалентных схем, который позволяет существенно ускорить проектирование рабочих камер и получить общий алгоритм решения задачи синтеза КБВ.

Исходные данные для расчета: $f = 2450 \cdot 10^6$ Гц – частота СВЧ-генератора, $\lambda = 0,122$ м – длина волны (м), $Z_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление СВЧ-разъема ли-

нии, диэлектрические параметры $\epsilon' = 26,86$, $\text{tg } \delta = 0,16$.

На рис. 2 представлен общий вид СВЧ-камеры проточного типа для воздействия на жидкую среду, где 1 – прямоугольный волновод, 2 – согласующий экран, 3 – диэлектрическая фторопластовая труба, 4 – волноводно-коаксиальный переход, 5 – обрабатываемая жидкость.

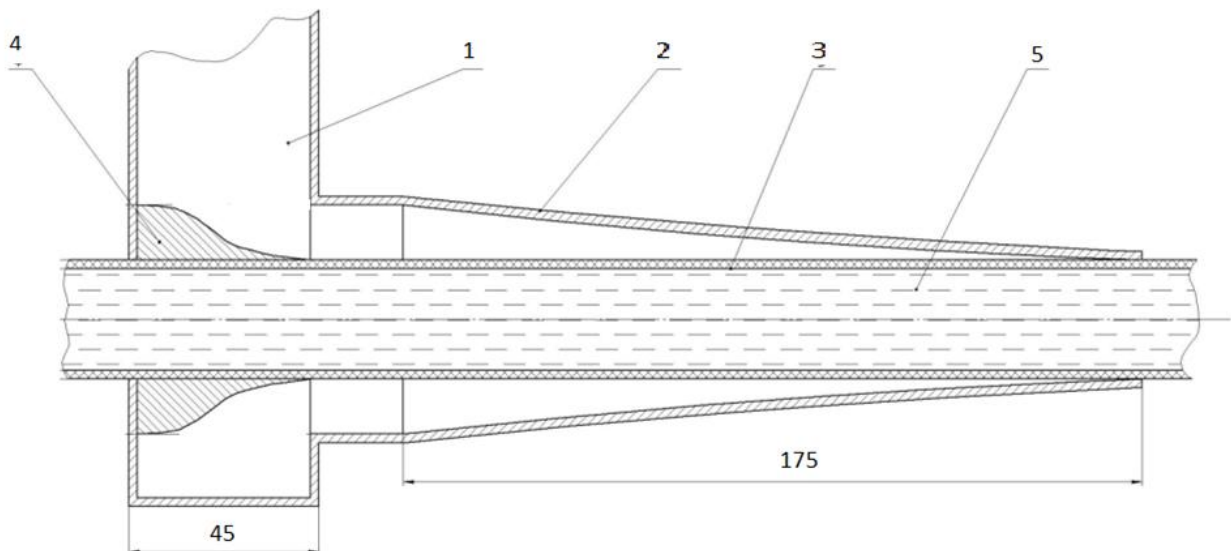


Рис. 2. СВЧ-камера бегущей волной (КБВ) на круглом волноводе с экспоненциальным согласующим экраном проточного типа

Для согласования КБВ с линией передачи используется так называемый согласующий экран.

Согласующий экран с изменяющимся внешним проводником, при воздушном заполнении над обрабатываемой средой рассчитывается по соотношению

$$D(z) = 2r \cdot \exp \left\{ \left[-\lambda X_n / 4\pi + \sqrt{(\lambda X_n / 4\pi)^2 + (R_n z)^2} \right] / 60 \right\}, \quad (1)$$

где R_n , X_n – активная и реактивная составляющая погонного сопротивления обрабатываемого объекта.

Основные параметры камеры: длина камеры $l = 0,175$ м, радиус внутреннего проводника (технологического канала)

$r = 0,012$ м, внешний проводник $D(0,175) = 0,054$ м, $KCB = 1$.

После разработки эскиза рабочей камеры решалась задача численного моделирования процесса нагрева раствора солей. Математическая модель, описывающая

процесс СВЧ-нагрева диэлектрика, представляет собой самосогласованную задачу электродинамики и теплопереноса [3].

Задача электродинамики описывается уравнениями Максвелла. Для описания волновых процессов используется их преобразование к виду уравнений Гельмгольца для векторов напряженности электрического и магнитного поля [1]. Волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля записывается в виде:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r' - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0, \quad (2)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ϵ_r' – относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть); $\sigma = \omega \epsilon_0 \epsilon_r''$ – электрическая проводимость; ω – угловая частота и ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость ($8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м); ϵ_r'' – фактор потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости).

На внутренних металлических границах рабочей камеры задается граничное условие, характеризующее неидеальное отражение электромагнитной волны от поверхностей (тангенциальная составляющая вектора близка к нулю, но не равна нулю):

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - j\sigma/\omega}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} = 0,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля.

Между всеми контактирующими областями расчетной модели рабочей камеры (воздух – кварцевая труба, фторопластовая труба – раствор соли) имеют место граничные условия сопряжения:

$$[\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1, \mathbf{n}] = 0, \quad [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0,$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0, \quad \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0,$$

где $\mathbf{H}_2, \mathbf{H}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_1$ – векторы напряженности магнитного и электрического поля; $\mathbf{D}_2, \mathbf{D}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_1$ – векторы электрической и магнитной

индукции для сред 2 и 1 соответственно; $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2.

Напряженность электрического поля, полученная выше из уравнения (2) и свойства материала необходимы для расчета объемной мощности за счет СВЧ-воздействия, с помощью следующего уравнения:

$$Q = \sigma |\vec{E}|^2 = 2\pi \epsilon_0 \epsilon'' f |\vec{E}|^2,$$

где σ – электрическая проводимость материала (См/м), и f – частота (Гц).

Задача теплопроводности для каждого из элементов конструкции СВЧ-камеры описывается уравнением

$$p C_p \frac{dT}{dt} + p C_p \mathbf{u}^* \nabla T + \nabla^* q = Q, \quad (3)$$

$$q = -k \nabla T,$$

где p – плотность; C_p – удельная теплоемкость; T – температура; t – время; k – коэффициент теплопроводности; $\mathbf{u}$ – скорость жидкости; Q – мощность внутренних источников теплоты.

Алгоритм для решения самосогласованной задачи электродинамики и теплопроводности потока жидкой смеси был реализован в программе COMSOL Multiphysics. Из решения волнового уравнения (2) были определены распределение электромагнитных полей и мощность внутренних источников теплоты. Диэлектрические свойства жидкой смеси были экспериментально измерены методом волноводного тройника на частоте 3000 МГц. Данные измерений раствора Fe_3O_4 обрабатывались в программе Mathcad 14. В данной программе был реализован расчет ϵ' и $\text{tg } \delta$ методом двух толщин с выводом результатов в виде таблицы в конце программы.

В табл. 1 представлены значения, полученные в ходе измерений [3].

Таблица 1. Результаты расчёта в программе Mathcad 14

	ϵ'	ϵ''	$\text{tg } \delta$
Фторопласт	2.105	0.153	0.073
Раствор Fe_3O_4	26.864	0.43	0.016

Для построения геометрии были использованы результаты расчета технических характеристик.

Моделирование проводилось в 2D приближении. В ходе работы использовался мультифизический интерфейс *Microwave heating* (микроволновый нагрев), к модели автоматически добавляются два физических интерфейса: *Electromagnetic Waves* (электромагнитные волны) и *Heat Transfer in fluids* (Теплопередача в жидкостях). Мультифизические связи описывают рассеивание электромагнитной энергии как источник тепла и, в дополнение к этому, может быть задана зависимость электромагнитных свойств материалов от температуры.

Мультифизический интерфейс *Electromagnetic heating* (электромагнитный нагрев) состоит из двух интерфейсов физик: *Electromagnetic waves* (электромагнитные волны) и *Heat Transfer in fluids* (теплопередача в жидкостях), а также мультифизических связей, доступных в разделе *Multiphysics* (мультифизика).

На рис. 3 представлены свойства меди, из которой изготовлен волновод, необходимые для построения модели.

На рис. 4 представлены свойства фторопласта, необходимые для моделирования СВЧ-нагрева.

На рис. 5 представлены свойства магнитной жидкости, необходимые для моделирования СВЧ-нагрева.

Моделирование проводим в режиме *Heat Transfer in Fluids*. В окне настроек по умолчанию заданы все блоки. Во вкладке значения *Fluid 1* изменяем скорость протекания магнитной жидкости. В ходе работы произведено математическое моделирование нагрева магнитной жидкости в камере СВЧ-установки при частоте 2,4 ГГц. Для наглядности процесса результатов математического моделирования нагрева приведем результаты нескольких экспериментов, с разной скоростью протекания магнитной жидкости по фторопластовой трубке.

Property	Variable	Expression	Unit
Relative permeability	mur_iso...	1	1
Electrical conductivity	sigma_is...	5.998e7[S/m]	S/m
Heat capacity at co...	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg·K)
Relative permittivity	epsilon_r...	1	1
Surface emissivity	epsilon_...	0.5	1
Density	rho	8940[kg/m^3]	kg/m³
Thermal conductivity	k_iso ; ki...	400[W/(m*K)]	W/(m·K)

Рис. 3. Свойства меди

Material Contents				
Property	Variable	Value	Unit	
Relative permeability	mur_is...	1	1	
Electrical conductivity	sigma...	1e-12[S...	S/m	
Heat capacity at constant pres...	Cp	820[J/(k...	J/(kg·K)	
Relative permittivity	epsilo...	4.2	1	
Surface emissivity	epsilo...	0.7	1	
Density	rho	2600[kg...	kg/m³	
Thermal conductivity	k_iso ; ...	3[W/(m...	W/(m·K)	

Рис. 4. Свойства фторопласта

▼ Material Contents			
»	Property	Variable	Value
☒	Heat capacity at constant pres...	Cp	1.9
☒	Density	rho	1
☒	Thermal conductivity	k_iso ;...	0.001
☒	Ratio of specific heats	gamma	1.4
	Electrical conductivity	sigma...	0
	Relative permittivity	epsilo...	26.864
	Relative permittivity (imaginar...	epsilo...	1
	Relative permittivity (real part)	epsilo...	26.864
	Dielectric loss factor	eta_ep...	0.01
	Loss tangent, dissipation factor	tanDel...	0.016

Рис. 5. Свойства магнитной жидкости

Входные параметры: начальная температура, конечная температура, время, скорость протекания магнитной жидкости, а также мощность представлены в табл. 2.

На рис. 6 представлены результаты нагрева магнитной жидкости при эксперименте № 1: скорость протекания магнитной жидкости по фторопластовой трубке составляет 0,3 м/с, изначальная температура раствора 23°C, конечная температура нагреваемой жидкости в камере составляет 76°C, время протекания нагрева 10 секунд, мощность 100 Вт.

На рис. 7 представлены результаты нагрева магнитной жидкости при эксперименте № 8 (табл. 2). Графики зависимостей распределения температуры нагревания жидкости представлены на рис. 8, 9.

Таблица 2. Входные параметры

№	V, м/с	$T_{нач}, ^\circ\text{C}$	$T_{конечн}, ^\circ\text{C}$	t, с	P, Вт
1.	0,3	23	76	10	100
2.	0,4	23	74	10	100
3.	0,3	23	80	10	120
4.	0,4	23	78	10	120
5.	0,3	23	82	10	140
6.	0,4	23	80	10	140
7.	0,3	23	85	10	160
8.	0,4	23	82	10	160

Установлено, что поток раствора солей эффективно взаимодействует с СВЧ-энергией и нагревается до нужных температур за минимальное количество времени (рис. 8, 9).

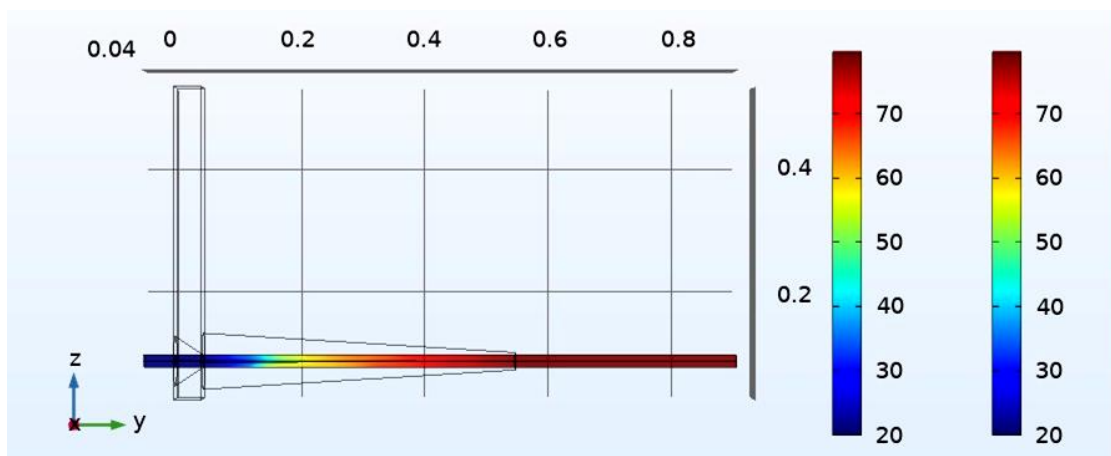


Рис. 6. Результат нагрева жидкости в СВЧ-камере при эксперименте № 1

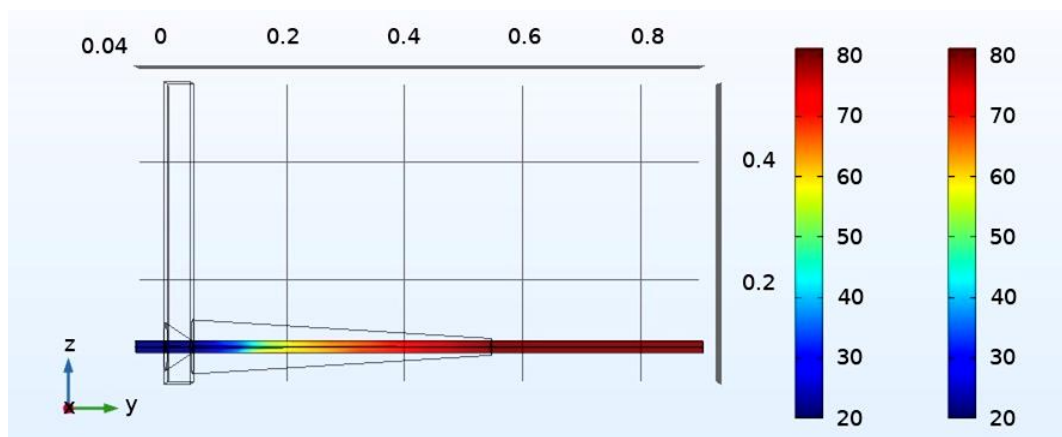


Рис. 7. Результат нагрева жидкости в СВЧ-камере при эксперименте № 8

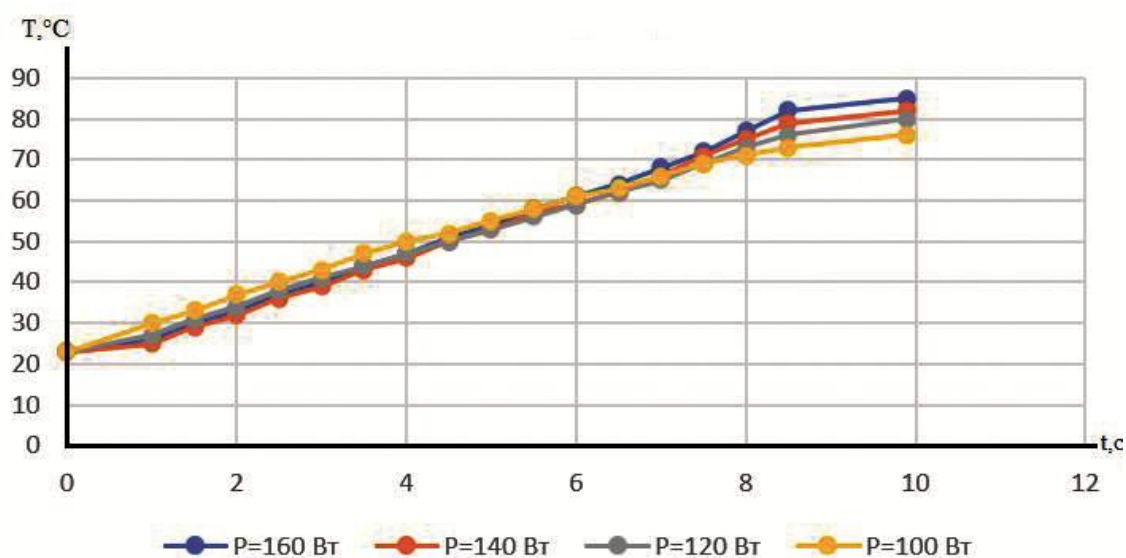


Рис. 8. График распределения температуры при скорости протекания жидкости по фторопластовой трубке $v = 0,3$ м/с

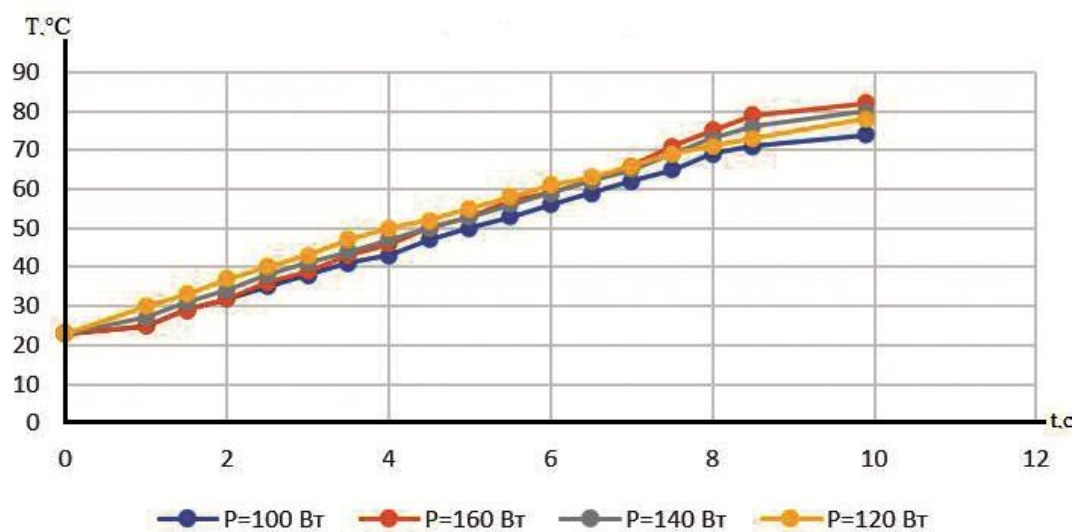


Рис. 9. График распределения температуры при скорости протекания жидкости по фторопластовой трубке $v = 0,4$ м/с

Оптимальным режимом для создания промышленной СВЧ-камеры является эксперимент № 3, при мощности 120 Вт необходимая температура (80° С) достигается в кратчайший срок, при этом габариты камеры не превышают заложенные изначально размеры.

СВЧ-нагрев имеет ряд преимуществ перед традиционными способами нагрева: интенсификация процесса термообработки за счет объемного нагрева раствора, существ-

венное сокращение времени реакции, высокое качество нагрева за счет большой равномерности тепловыделения, высокая точностью управления технологическим процессом благодаря возможности точного дозирования СВЧ-энергии. Все эти преимущества приводят к уменьшению размера образующихся частиц. Таким образом, данный метод получения нано- и микрочастиц металлов в коллоидных растворах может быть реализован в промышленных масштабах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Access to small size distributions of nanoparticles by microwave-assisted synthesis. Formation of Ag nanoparticles in aqueous carboxymethylcellulose solutions in batch and continuous-flow reactors / S. Horkoshi, H. Abe, K. Torigoe, M. Abea, N. Serpone // *Nanoscale*. 2010. Vol. 2. P. 1441-1447.

2. **Архангельский Ю.С.** Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2003. 344 с.

3. **Кожевников В.Ю., Федотов В.Д.** СВЧ камеры с бегущей волной для синтеза сферических оксидных наночастиц // *Вопросы электротехнологии*. 2020. № 2. С. 5-10.

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

Федотов Владислав Дмитриевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav Yu. Kozhevnikov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladislav D. Fedotov – Master degree, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.06.22, принята к опубликованию 10.09.22

УДК 621.37, 621.385.69, 004.942

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ МАГНЕТРОНА
ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СВЧ-СТЕРИЛИЗАТОРА
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА**

**В.П. Ерёмин, А.С. Ершов, В.Б. Байбурин,
М.И. Балакин, Д.А. Шелудяков, В.П. Мещанов**

**ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR CREATING
A HIGH-POWER MAGNETRON TO THE MICROWAVE STERILIZER
BASED ON A MATHEMATICAL MODEL
AND AN EXPERIMENTAL SAMPLE**

**V.P. Eremin, A.S. Ershov, V.B. Bayburin,
M.I. Balakin, D.A. Sheludyakov, V.P. Meshchanov**

Одной из актуальных проблем СВЧ-технологии является создание устройств, позволяющих исследовать влияние электромагнитного излучения на различные объекты в области медицины, биомедицины, фармакологии и др. с целью раскрытия механизмов указанного влияния, а также решения практических задач, связанных, в частности, с деконтаминацией бактериальной микрофлоры. Целью работы является анализ возможностей создания магнетронного генератора дециметрового диапазона повышенной мощности. Это позволит провести разработку компактного переносного СВЧ-стерилизатора с минимальным временем стерилизационной обработки и простейшей технологией использования. Основой моделирования является численная многопериодная математическая модель электронно-волнового взаимодействия в скрещенных полях, а также экспериментальная характеристика разработанного базового экспериментального образца магнетрона.

Ключевые слова: магнетрон, стерилизация, повышенная мощность излучения

One of the urgent problems in microwave technology is creation of devices used to study the effects of electromagnetic radiation on various objects in the field of medicine, biomedicine, pharmacology, etc. which could reveal the mechanisms of this influence, as well as solve the practical problems related particularly to decontamination of bacterial microflora. The purpose of the work is to analyze the possibilities of creating a magnetron generator with a decimeter range of increased power. This will promote development of a compact portable microwave sterilizer with minimal sterilization processing time and simplest application technology. The simulation is based on a numerical multi-period mathematical model of electron-wave interaction in the cross fields, as well as experimental characteristics of the developed basic experimental magnetron sample.

Keywords: magnetron, sterilization, increased radiation power

В последние годы возросла актуальность исследований, связанных с воздействием СВЧ-излучения на бактериальную микрофлору различных медицинских, биологических, фармакологических объектов. Эти исследования необходимы для изучения фундаментальных механизмов влияния электромагнитного поля на микрофлору, так и для решения практических задач стерилизации. В частности, в работах [1, 2] представлены результаты различных способов деконтаминации медицинских инструментов: в плазме, при импульсном и непрерывном СВЧ-облучении. Было показано, что последний вариант наиболее эффективен, позволяет уничтожать самые стойкие спорозоносные бактерии и открывает возможность создания быстрodeйствующих (не более 10 минут обработки), компактных, переносного типа стерилизаторов. При этом мощность СВЧ-излучения не превышала 600 Вт. В дециметровом диапазоне длин волн эти результаты позволили предположить, что доминирующим фактором в процессе стерилизации является амплитуда СВЧ-поля, разрушающая структуру бактерий.

В связи с изложенным представляется целесообразным исследовать возможности создания генераторов магнетронного типа дециметрового диапазона существенно повышенной мощности до уровня 1300-1500 Вт, что позволило бы сократить время обработки, либо при том же времени обработки расширить набор обрабатываемых инструментов.

В качестве базового экспериментального образца был взят магнетрон, разработанный в ОКБ «Тантал-наука» (главный конструктор Еремин В.П.). Математическая модель, использованная в расчётах, апробирована, в том числе, на экспериментальных данных различных типов магнетронных генераторов в различных диапазонах частот [3-6].

Примененная в данной работе численная математическая модель основана на методе крупных частиц и совместном решении системы дифференциальных уравнений: уравнений движения, уравнения Лапласа (расчёт

электростатического поля в пространстве взаимодействия и в щелях резонаторов), уравнений Пуассона (расчёт полей пространственного заряда), волнового уравнения (расчёт высокочастотного поля).

Уравнения движения решаются методом конечных разностей с применением метода крупных частиц. При этом, на каждом шаге по времени решается уравнение возбуждения с расчётом активной и реактивной составляющей наведённой ВЧ-мощности. При попадании частиц на электроды вычисляются токи на катоде и аноде, а также мощности бомбардировки анода и катода. В модели учитываются два вида эмиссии на катоде – термоэмиссия и вторичная эмиссия.

Описанная математическая модель является многопериодной, т. е. процессы электронно-волнового взаимодействия рассматриваются в неподвижной системе координат во всём пространстве взаимодействия.

В начальный момент времени крупные частицы распределены случайным образом и занимают прикатодную область (статическую втулку) с общей величиной заряда около 5 % от ожидаемого значения.

Расчёт проводится итерационно, в приближении заданного поля с некоторой затравочной амплитудой ВЧ-потенциала на несколько порядков меньше ожидаемой и «холодной» частоты. Далее проводится пошаговое решение основных уравнений модели, определяются новые итерационные значения амплитуды наведённого ВЧ-потенциала и «горячей» частоты, затем рассчитываются токи на аноде I_a и катоде I_k , а также выходная мощность

$$P_{вых} = \frac{Q_n}{Q_{вн}} \cdot P_{акт}, \quad (1)$$

где Q_n – нагрузочная добротность; $Q_{вн}$ – внесённая добротность.

Нагрузочная добротность определяется выражением

$$Q_n = \frac{Q_0 Q_{ex}}{Q_0 + Q_{ex}}, \quad (2)$$

где Q_0 – собственная добротность.

КПД при этом вычисляется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{I_a U_a}. \quad (3)$$

Итерации продолжаются до получения самосогласованного решения и прекращаются, когда конфигурация электронного облака и все указанные выше параметры, в том числе выходные, остаются (с небольшими флуктуациями) на неизменном уровне. Обычно это требует от 200 до 600 итераций.

Исходными данными для расчётов являлись: радиус анода $r_a = 5 \cdot 10^{-3}$ м, радиус катода $r_k = 2,55 \cdot 10^{-3}$ м, высота анодного блока $h = 10 \cdot 10^{-3}$ м, магнитная индукция $B_0 = 0,17$ Тл, число резонаторов – 14,

внесенная добротность $Q_{\text{вн}} = 130$, собственная добротность $Q_{\text{св}} = 800$, волновое сопротивление $Z_0 = 6,2$ Ом, отношение ширины щели к периоду замедляющей системы $\mu = 0,5$, ток термоэмиссии $j = 5 \cdot 10^{-4}$ А/м², коэффициент вторичной эмиссии 3, анодное напряжение (2,3-2,5) кВ.

На рис. 1, 2 представлены расчёт и экспериментальные зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и КПД от анодного тока I_a . Сравнение зависимостей показывает адекватность используемой математической модели и возможность её использования для прогнозирования в другом режиме, в частности, искомом режиме повышенной мощности с параметрами указанными в таблице.

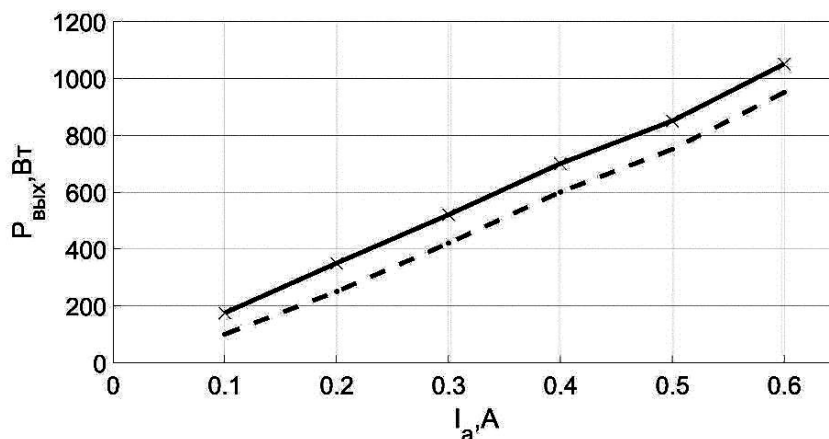


Рис. 1. Зависимость выходной мощности от анодного тока:
1 – результаты эксперимента; 2 – результаты численного моделирования

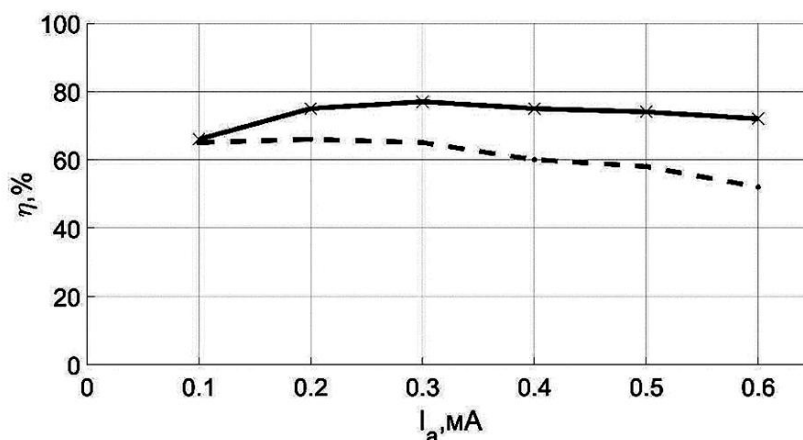


Рис. 2. Зависимость КПД от анодного тока:
1 – результаты эксперимента; 2 – результаты численного моделирования

Таблица 1. Прогнозируемый режим, обеспечивающий повышенную выходную мощность магнетрона до уровня 1500 Вт

U_a , В	I_a , А	$P_{вых}$, Вт	КПД, %
2430	1.2	1500	55

Для обеспечения устойчивой работы магнетрона в режиме повышенного уровня мощности (до 1,5 кВт) представляется необходимым проведение численных исследований в нескольких взаимосвязанных направлениях. К нему следует отнести: изменение геометрии связок (диаметр и высота, внесение разрывов), изменение отношения разности радиусов катода и анода к периоду резонаторной структуры, изменение длины волноводной насадки, что в итоге создаст дополнительную нагрузку для высоковольтных видов колебаний [7]. Таким образом, последующий этап исследования сводится к решению задачи оптимального синтеза на основе применяемой математической модели.

В настоящее время многие предприятия в России и ближнем зарубежье (ОНПП «СУПРОМЕД» (Узбекистан), «ПРОКОНТ» (Россия, Москва), «СЭПО ЗЭМ» (Россия,

Саратов), СЭЗ имени С. Орджоникидзе (Россия, Саратов)) предлагают авторам (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) участие в массовом выпуске СВЧ-стерилизаторов (около 100 тысяч в год). Увеличение мощности магнетрона, как указано выше, улучшит параметры стерилизатора. Известные зарубежные фирмы рекламируют магнетроны с мощностью 1,5 кВт, однако, либо не указывают другие важные параметры, в частности, КПД, либо сообщают о КПД ниже 74 %. Как следует из рис. 2, КПД уже имеющегося отечественного магнетрона приближается к 80 %, что выше известных аналогов. Предложенные в работе направления оптимизации позволят получать отечественные магнетроны с КПД более 85 %. Кроме того, периодически появляются сообщения о возможном санкционном отказе зарубежных фирм поставлять магнетроны в Россию, поэтому разработка магнетрона отечественного производства актуальна и с точки зрения импортозамещения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00357, <https://rscf.ru/project/22-19-00357/>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стерилизация медицинских инструментов на основе СВЧ электротехнологии / В.Б. Байбурин, В.В. Тертышник, Г.М. Шуб и др. // Вопросы электротехнологии. 2018. Т. 19. № 2. С. 5-8.

2. Быстрый метод полной деконтаминации в СВЧ электромагнитном поле / В.Б. Байбурин, М.И. Балакин и др. // Вопросы электротехнологии. 2022. Т. 35. № 2. С. 27-29.

3. Байбурин В.Б., Терентьев А.А., Пластун С.Б. Многопериодная численная модель магнетронного генератора на основе метода крупных частиц // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 2. С. 236-240.

4. Терентьев А.А., Ляшенко А.В., Ершов А.С. Расчет полей пространственного заряда при компьютерном моделировании приборов М-типа // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2009. № 6. С. 74-82.

5. Терентьев А.А., Ляшенко А.В., Гурьев И.К. Расчет ВЧ-полей в численных моделях магнетронов мм-диапазона, работающих на гармониках основного вида колебаний // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2009. № 6. С. 83-91

6. Численная модель магнетронов сантиметрового и миллиметрового диапазонов, учитывающая конкуренцию разных видов колебаний и наличие пространственных гармоник / А.С. Ершов, А.А. Терентьев, А.В. Ляшенко, В.Б. Байбурин // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2011. № 9. С. 99-107.

7. Патент № 2143767 С1 Российская Федерация, МПК H01J 25/50. Магнетрон для СВЧ-нагрева: № 98110452/09: заявл. 02.06.1998; опубл. 27.12.1999 / В.А. Адамович, В.П. Еремин, Э.В. Перовский, Я.А. Старец.

Ерёмин Валерий Павлович – главный конструктор ОКБ «Тантал-наука», Саратов

Ершов Алексей Сергеевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Балакин Максим Игоревич – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Шелудяков Дмитрий Александрович – ассистент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мещанов Валерий Петрович – доктор технических наук, директор ООО НПП «Ника-СВЧ»

Valery P. Eremin – Chief designer, EDC «Tantal-science», Saratov

Alexey S. Ershov - PhD (Technical Sciences): Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vil B. Bayburin – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Maksim I. Balakin – PhD (Physics and Mathematics), Head: Department of Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry A. Sheludyakov – Assistant Lecturer, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valery P. Meshchanov – Dr. Sc. Tech., Director of ООО Nika-SVCh LLC

Статья поступила в редакцию 08.08.22, принята к опубликованию 02.09.22

УДК 678.07, 621.37, 621.365

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ РАБОЧИХ КАМЕР ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Сивак, С.Г. Калганова, Т.П. Сивак

COMPUTATIONAL MODELING OF MICROWAVE WORKING CHAMBERS FOR PROCESSING COMPOSITE MATERIALS

A.S. Sivak, S.G. Kalganova, T.P. Sivak

В статье представлены результаты математического моделирования нагрева композиционного материала на основе полимерного связующего в СВЧ-камере сложной геометрической формы с учетом различных расположений материала внутри рабочей камеры. Решение тепловой задачи путем математического моделирования позволило определить зависимость температуры композиционного материала от величины напряжённости СВЧ электромагнитного поля для камер периодического действия. Исследование проводилось с помощью численного моделирования процесса СВЧ-обработки композиционного материала с использованием метода конечных элементов, реализованного в программной среде COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, композиционный материал, СВЧ-установка, рабочая камера, численное моделирование, напряжённость СВЧ электромагнитного поля

Введение

Актуальной проблемой является исследование возможности разработки установки СВЧ-термообработки, модификации композиционного материала (КМ), позволяющей обеспечить равномерное распределение температурного поля по объёму объекта. Использование такой установки позволит проводить исследования процессов, протекающих в КМ при СВЧ-термообработке, тепловой модификации,

The article presents the results of mathematical modeling of heating a composite material based on a polymer binder in a microwave chamber with a complex geometric shape, taking into account various locations of the material inside the working chamber. The solution to the thermal problem based on mathematical modeling made it possible to determine dependence of the composite material temperature on intensity magnitude of the microwave electromagnetic field required for microwave chambers of periodic action. The investigation was carried out using numerical simulation of the microwave processing of the composite material using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software environment.

Keywords: microwave heating, composite material, microwave installation, working chamber, numerical simulation, microwave electromagnetic field strength

нереализуемых с применением традиционных теплообменных методов нагрева.

Целью данной работы является определение оптимальной СВЧ рабочей камеры для равномерной СВЧ-обработки композиционного материала на основе полимерного связующего. В качестве инструмента моделирования такой камеры 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 описываются соответствующими дифференциальными уравнениями [1, 2].

СВЧ-камеры с бегущей волной (КБВ) представляют собой отрезок того или иного волновода, работающего в режиме, близком к режиму бегущей волны. Они выгодно отличаются от камер со стоячей волной возможностью получить лучшее согласование с СВЧ-генератором, т. е. большим КПД и при определенных условиях можно получить равномерную обработку однородного по структуре объекта. При этом научно-практическую значимость имеет возможность СВЧ-обработка неоднородных КМ на основе полимерного связующего произвольной формы с целью повышения технологических и эксплуатационных свойств.

Поскольку СВЧ-камеры с бегущей волной могут состоять из отрезков линий передач различных сечений, то в таких камерах могут существовать бесконечное множество видов волн типа E (электрические) и H (магнитные), соответствующие различным значениям m и n , т. е. E_{mn} (TM_{mn}) и H_{mn} (TE_{mn}), чтобы обеспечить согласование нагрузки с линией, передачу энергии по волноводу проводят на одном, как правило, низшем типе волны. Для этого необходимо правильно выбрать геометрические размеры сечения волновода.

В рамках расчетного моделирования в частотной области для заданного диапазона частоты 2450 МГц мы сможем на выходе определять тип волны (резонансные частоты E_{mn} и H_{mn}) возбуждаемый в рабочей СВЧ-камере, также просчитать параметры прохождения и отражения (S -параметры) в ближней и дальней зоне. По результатам математического моделирования процесса СВЧ-термообработки КМ необходимо определить оптимальное расположение материала в рабочей камере, установить величину напряженности СВЧ электромагнитного поля (ЭМП) в материале при различных уровнях входной мощности, получить распределение температурного поля в материале.

Постановка задачи расчетного моделирования в COMSOL Multiphysics

Геометрическая модель СВЧ-камеры представляет собой отрезок прямоугольного волновода длиной 1000 мм сечение 45×90 мм. Предполагаем, что объект обработки высотой 10 мм, шириной 40 мм и длиной 60 мм находится в центре рабочей камеры, где напряженность электрического поля максимальна (рис. 1).

В качестве объекта исследования выбран КМ на основе полимерного связующего ЭД-20, с электрофизическими свойствами: тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 0,037$, диэлектрическая проницаемость 32.509-1.209j, коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) $\lambda = 0,124$, удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) $c_p = 580$, плотность $\rho = 1595$.

В основу математической модели процесса СВЧ-термообработки КМ положено решение системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений, моделирующих связанные между собой физические процессы электродинамики и тепломассопереноса.

Для описания модели электромагнитного поля используется волновая форма уравнений Максвелла (уравнение Гельмгольца), которая имеет вид [3,4]:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon'_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0, \quad (1)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ω – круговая частота; ϵ_0 – электрическая постоянная; μ_0 – магнитная постоянная; ϵ'_r – относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть); $\sigma = \omega \epsilon_0 \epsilon''_r$ – электрическая проводимость; ϵ''_r – коэффициент потерь.

Решение этого уравнения ищется для вектора напряженности электрического поля, E , с рабочей частотой $\omega = 2 \pi f$. Предполагаем, что протекание токов сосредоточено исключительно на поверхности стенок волновода, что дает возможность избежать численного решения

уравнений Максвелла внутри любых металлических областей моделирования. В этой связи на поверхности волновода задаем граничное условие идеального отражения электромагнитной волны:

$$E \times n = 0. \quad (2)$$

Математическое описание тепловой части задачи представляет собой уравнение теплопроводности (3), в котором мощность тепловыделения за счет диэлектрических потерь определяется по соотношению (4):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) = q_v; \quad (3)$$

$$q_v = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \cdot |E|^2, \quad (4)$$

где $\omega = 2 \pi f$ – угловая частота; f – частота электромагнитного поля; ε_0 – электрическая постоянная; ε_r'' – коэффициент потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости); ρ – плотность; c_p – удельная теплоемкость; T – температура; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности.

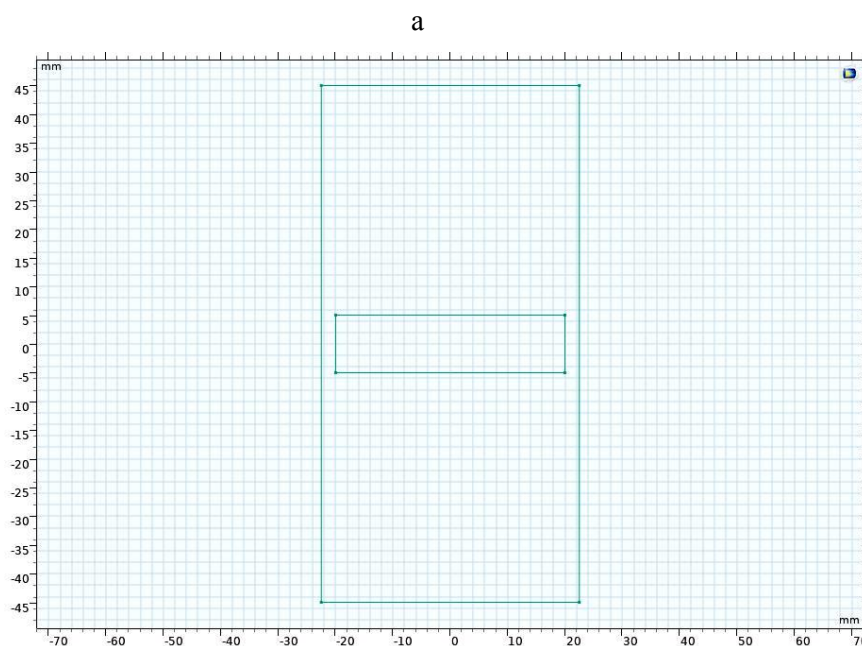
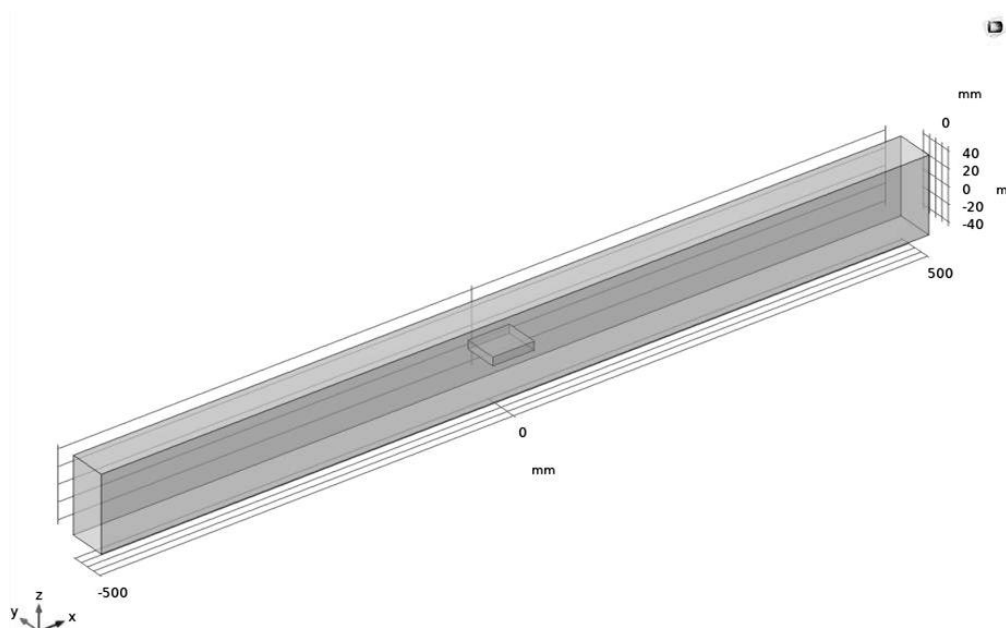


Рис 1. Геометрическая модель волновода: а – 3D модель камеры; б – сечение камеры

Решение задачи расчета на собственные частоты позволит нам для данной конфигурации волновода при стартовой частоте 2450 МГц определить тип мода, возбуждаемый в системе. В результате полученного моделирования (рис. 2)

можно сказать, что в данной системе может быть возбуждён мод типа TE_{10} , поскольку константа распространения β имеет не нулевое больше значение, что свидетельствует о том, что именно этот мод будет возбуждаться в системе.

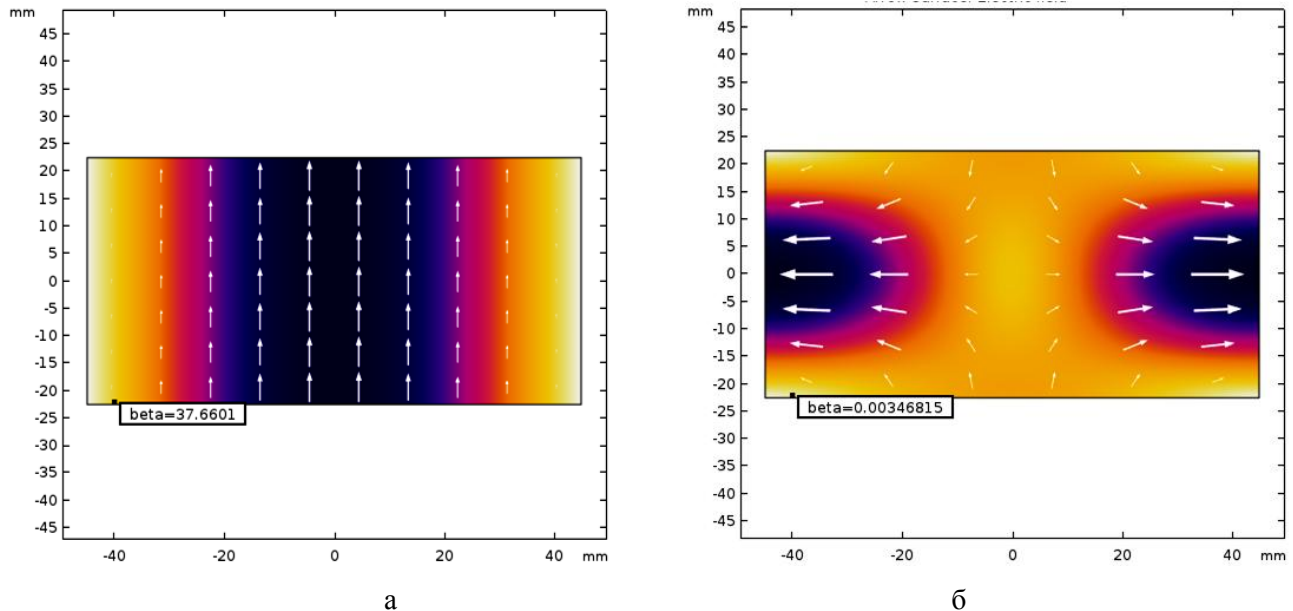


Рис. 2. Структура электромагнитного поля в волноводе:
а – мод TE_{10} ($\beta = 37,6601$); б – мод TE_{21} ($\beta = 0,0346815$)

Из графиков распределения СВЧ электромагнитного поля в волноводе при отсутствии в камере КМ установлено, что в волноводе постоянный профиль нормы поля (рис. 3 а), вектор напряжённости электрического поля лежит в плоскости, перпенди-

кулярной направлению распространения (рис. 3 б), также визуальнo не наблюдается рассогласований или отражений от выходного порта. На рис. 3 а показана плотность потока энергии электромагнитного поля (вектор Пойнтинга).

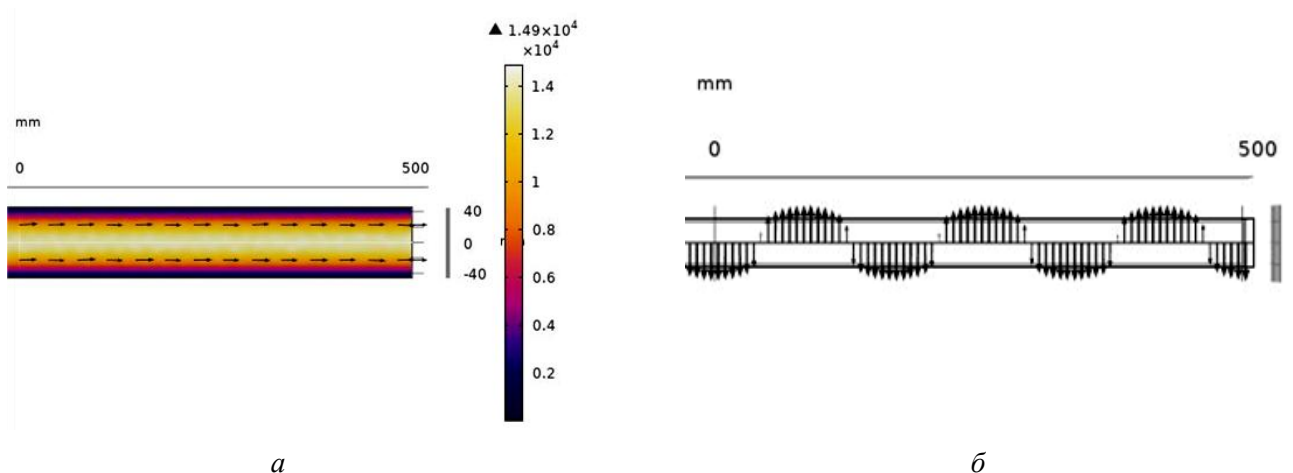


Рис. 3. Результаты математического моделирования (без объекта):
а – норма поля (амплитудное значение), вектор напряжённости СВЧ ЭМП по координате y ;
б – распределение плотности энергии электромагнитного поля

Для данной модели волновода параметр $S_{11} = -32,8$ дБ, это свидетельствует о том, что отражения в данной системе нет, и параметр $S_{21} = -0,002$ дБ, прохождение идеальное – чуть меньше 0.

По результатам математического моделирования распределения СВЧ электромагнитной волны в волноводе с КМ при уровне мощности 400 Вт (рис. 4 а) установлено, что при прохождении через диэлектрик меняется расстояние между максимумами и минимумами СВЧ электромагнитной волны. Величина напряжённости максимальной (Е) СВЧ электромагнитного поля составила 137,84 В/см, также получены данные для уровней мощности 100 Вт, 200 Вт, 300 Вт, 500 Вт, 700 Вт (табл. 1).

Просчитав S-параметр, можно утверждать, что отражение в системе определено есть, $S_{11} = -6,4$ дБ, и это связано с отражением от материала обработки.

Анализ результатов, полученных в ходе решения тепловой задачи, свидетельствует

о том, что графики температуры в КМ по координате у (рис. 5) аналогичны кривым напряжённости СВЧ электромагнитного поля в КМ. При этом максимальная температура в точке пика напряжённости СВЧ электромагнитного поля 137,84 В/см при уровне входной мощности 400 Вт составила 228° С.

На основании полученной модели, было проведено математическое моделирование нагрева композиционного материала в СВЧ-камере сложной геометрической формы (рис. 4). Рабочая камера представляет собой два отрезка волновода прямоугольной формы с сечением 45×90, соединенных сложным переходом.

По результатам математического моделирования были получены картины температурных полей КМ в СВЧ-камере сложной геометрической формы, при уровне СВЧ-мощности 400 Вт и времени обработки 20 с при различном расположении материала внутри рабочей камеры (рис. 7).

Таблица 1. Величина напряжённости поля СВЧ в объекте при различных уровнях мощности

$P_{\text{уст}}, \text{ Вт}$	100	200	300	400	500	600	700
$E, \text{ В/см}$	68,920	97,468	119,37	137,84	154,11	168,82	182,35

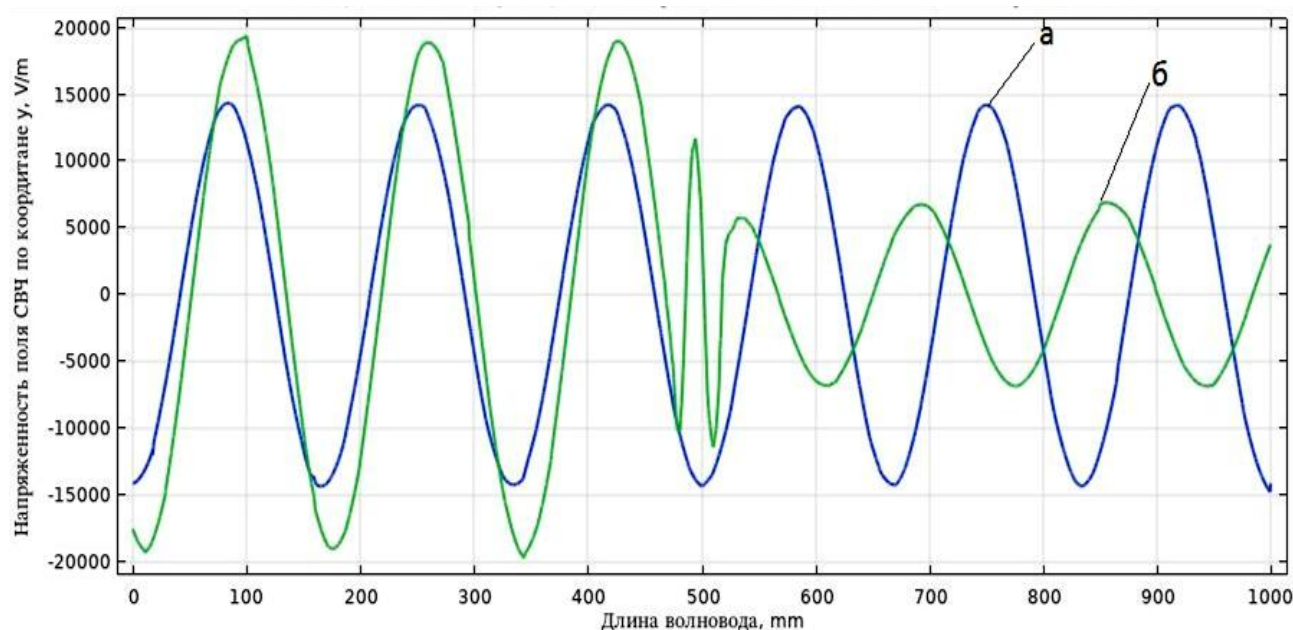


Рис. 4. Напряжённость СВЧ электромагнитного поля по координате у при мощности 400 Вт: а – в волновое без нагрузки; б – в волноводе с КМ

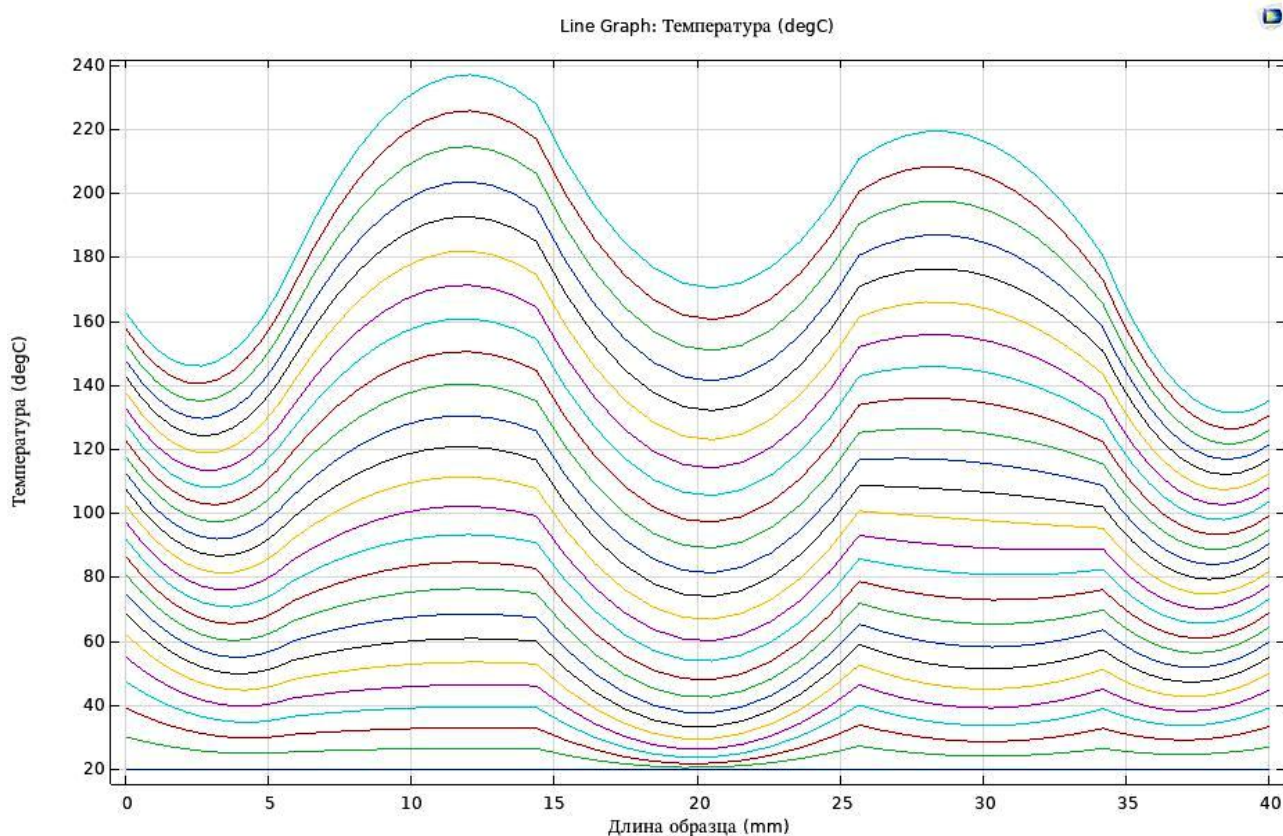


Рис. 5. Температура в КМ по координате y при мощности в 400 Вт в моменты времени от 0 до 24 с

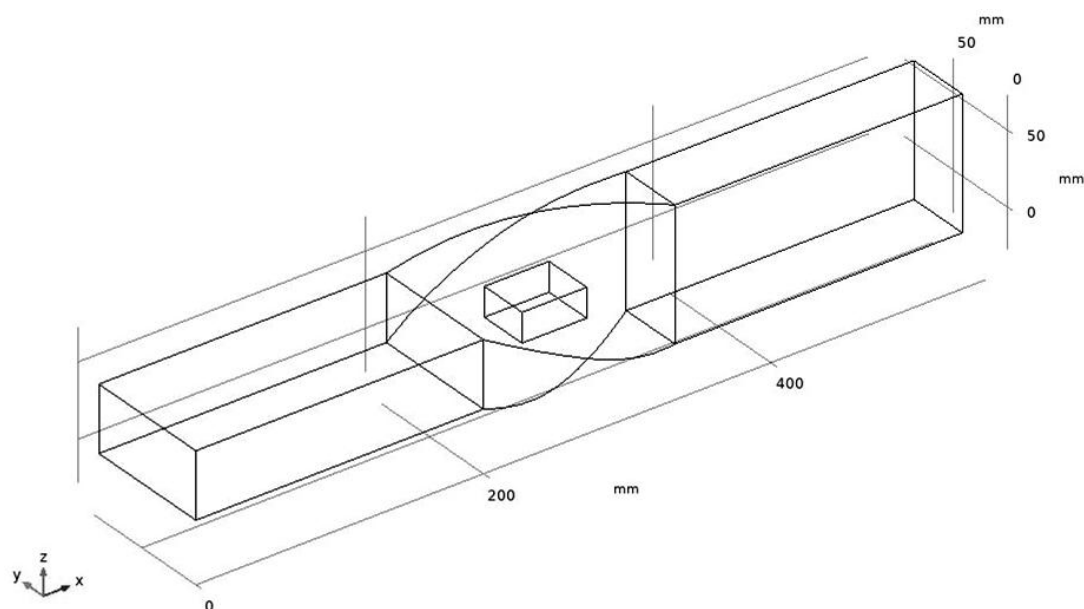


Рис. 6. Геометрическая модель волновода сложной формы с КМ в центре перехода

В первом случае, когда КМ находится в начале рабочей камеры, его максимальная температура зависит от пика напряжённости СВЧ электромагнитного поля на этом участке, о чем свидетельствуют результаты первого математического моделирования. Анало-

гично 1 участку на 3 участке максимальная температура также будет зависеть от величины напряжённости СВЧ ЭМП на этом участке. При этом $T_{\max}$ на третьем участке меньше, чем $T_{\max}$ на первом участке при одинаковом уровне подаваемой мощности СВЧ-

излучения, что связано с потерями в сложном переходе. Максимальная температура КМ при мощности 400 Вт была достигнута на участке сложного перехода (участок 2) и со-

ставляла 823° С, что в 2 раза больше $T_{\max}$ на 1-м участке. Полученные результаты представляют научный интерес для дальнейшего исследования таких типов камер.

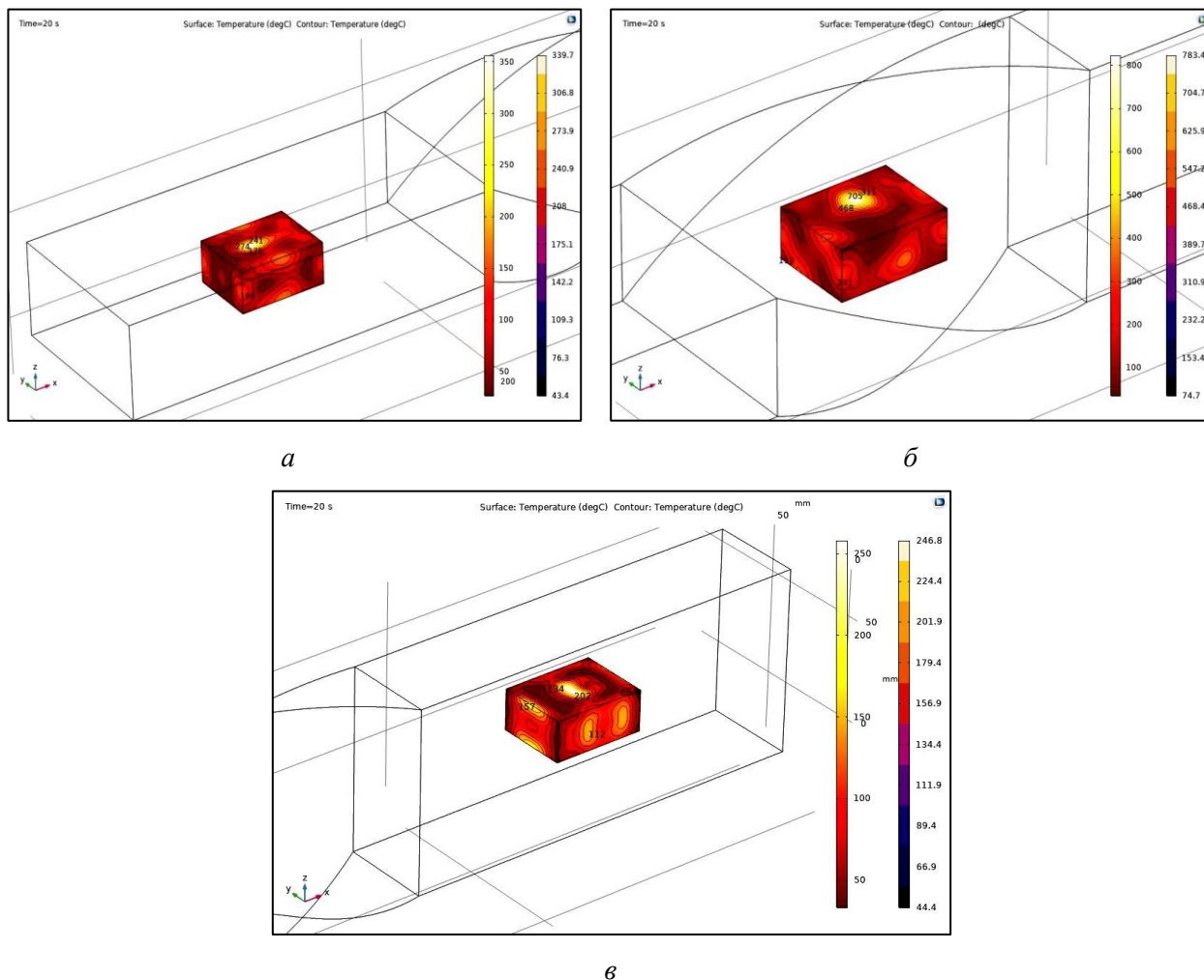


Рис. 7. Распределение температурного поля в КМ: *а* – расположение КМ по центру 1 участка рабочей камеры, $T_{\max} = 356^{\circ}\text{C}$; *б* – расположение КМ по центру сложного перехода (2 участок), $T_{\max} = 823^{\circ}\text{C}$; *в* – расположение КМ по центру 3 участка рабочей камеры, $T_{\max} = 258^{\circ}\text{C}$

Выводы

1. Математическая модель расчета на собственные частоты позволила определить для рабочей камеры сечение 45×90 мм при стартовой частоте 2450 МГц возбужденный мод типа TE_{10} , а также просчитать параметры отражения (S_{11}) и прохождения (S_{21}). Представленный способ математического моделирования позволит на стадии проектирования рабочих камер правильно выбрать геометрические размеры сечения волновода, что позволит обеспечить согласование нагрузки с линией передачи СВЧ-энергии.

2. Решение тепловой задачи позволило определить зависимость температуры в КМ от величины напряжённости СВЧ ЭМП. При разработке СВЧ-камер для установок периодического действия необходимо определять наиболее эффективное расположение материала внутри рабочей камеры для его обработки.

3. Моделирование обработки объектов в СВЧ-камере сложной геометрической формы представляет научный интерес для разработки установок СВЧ-термообработки и (или) модификации композиционных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Methlouthi A., Rouaud O., Boillereaux L.** Microwave Applicator with Conveyor Belt System // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris. URL: https://www.comsol.ru/paper/download/63600/methlouthi_paper.pdf (accessed October 24, 2021).

2. **Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н.** Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа Comsol. Москва: Спутник+, 2011. 158 с.

3. **Архангельский Ю.С., Тригор-
лый С.В.** Компьютерное моделирование

СВЧ электротермических процессов и установок. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

4. Исследование температурных полей в СВЧ камерах, заполненных диэлектрическим материалом / **Анфиногентов В.И., Тахауев А.А., Луканихин В.С., Степанов И.С.** Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007. С. 269-271.

5. **Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В.** Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.

Сивак Антон Сергеевич – ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Сивак Татьяна Павловна – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton S. Sivak – Assistant Lecturer, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Tatiana P. Sivak – Master student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.08.22, принята к опубликованию 20.09.22

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.7: 517.977.5

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ АНОДНЫХ ЦЕПЕЙ СВЧ-ПРИБОРОВ

П.А. Кошелев

POWER SOURCES FOR ANODIC CIRCUITS OF MICROWAVE DEVICES

P.A. Koshelev

В статье рассмотрены и исследованы на математических моделях два варианта высоковольтных источников питания анодных цепей различных типов СВЧ-приборов. Источники питания отличаются как силовой частью, так и принципом построения систем управления. В первом варианте применён тиристорный ключ переменного тока с фазовым регулированием, во втором варианте – транзисторный коммутатор с широтно-импульсной модуляцией и повышенной частотой преобразования. В обоих случаях в системах управления использован алгоритм ограничения или минимизации пульсаций в нагрузке и методы оптимизации, входящие в пакет Nonlinear Control Design Blockset программной среды MATLAB R2021b.

Ключевые слова: высоковольтный источник питания, фазовое регулирование, ключ переменного тока, широтно-импульсная модуляция, оптимизация

Введение

СВЧ-приборы и изделия, основанные на их свойствах, находят самое широкое применение: в радиолокационных станциях дальнего обнаружения, в медицине, связи, агротехнике, в бытовой технике [1, 2].

В устройствах для излучения и усиления электромагнитного поля при частотах от 300 МГц до 30 ГГц используются элек-

The article considers two variants of high-voltage power supplies for anode circuits of different types of microwave devices based on mathematical models. Power supplies differ both in power capacity and the principle of control systems creation. The first variant employs an alternating current thyristor switch with phase regulation, whereas the second variant employs a transistor switch with pulse-width modulation and increased conversion frequency. In both cases, the control systems use an algorithm to limit or minimize load fluctuations and optimization methods included in the Nonlinear Control Design Blockset package of the MATLAB R2021b software environment.

Keywords: high-voltage power supply, phase regulation, AC switch, pulse-width modulation, optimization

тровакуумные приборы: клистрон, магнетрон, лампы бегущей волны, лампы обратной волны. Принцип их работы и воздействия на загрузку или «садку» хорошо изучен и описан в [3, 4] и многих других работах, приборы совершенствуются и в настоящее время.

Источники питания (ИП) должны обеспечивать энергией целый ряд специфиче-

ских нагрузок, таких, как цепь катод – анод, резонатор – коллектор, цепь накала, фокусирующий соленоид, цепи смещения и др. В настоящей статье рассматриваются ИП анодных цепей СВЧ-приборов. Диапазон мощностей этих приборов достаточно широк: от сотен Вт до десятков кВт.

ИП должен обеспечивать постоянное анодное напряжение в соответствии с характеристиками СВЧ-прибора и режимный ток нагрузки. Уровень пульсаций в некоторых случаях не должен превышать 1 %. При этом для одних применений ИП должны функционировать в режиме управляемых стабилизированных источников тока, а в других – в режиме управляемых стабилизированных источников напряжения.

Выбор схемных решений ИП, способа преобразования энергии, элементной базы, как правило, производится субъективно, что приводит к избыточности аппаратного комплекса и его неудовлетворительным технико-экономическим показателям.

Разработчики оборудования зачастую вынуждены использовать зарубежные элементы, что в ряде случаев недопустимо. В данной статье рассматриваются варианты ИП, при создании которых может применена отечественная элементная база. При этом решается задача оптимизации массогабаритных показателей с применением пакета Nonlinear Control Design Blockset (NCD), входящего в состав программной среды MATLAB R2021b.

В СВЧ-устройствах на долю систем вторичного электропитания приходится до 40 % массы. Поэтому в современных ИП часто применяется промежуточное преобразование частоты и управление за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ), фазоимпульсной модуляции (ФИМ), что позволяет улучшить технические и экономические параметры этих источников.

ИП с ФИМ и тиристорным ключом переменного тока

Особенностью таких ИП является использование в силовой схеме тиристорного ключа переменного тока. Исследованию ИП

с тиристорным регулятором напряжения посвящен ряд работ. В [5] представлены результаты исследования однофазного ИП. В [6] путем имитационного моделирования получены характеристики трехфазного ИП.

За счет закона модуляции ключевого регулятора существует возможность улучшить фильтрующие свойства без увеличения массы и стоимости пассивных цепей. При этом ключевой регулятор сохраняет функцию стабилизации напряжения или тока. В настоящее время пассивные фильтры для силовых цепей преобразователей проектируются на основе линейных моделей при допущении об аддитивности составляющих фильтруемого напряжения.

Функциональная схема ИП с тиристорным ключом переменного тока и схема его модели показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

Силовой трансформатор (СТ) – наиболее трудоемкий и часто массивный и дорогой компонент ИП. При проектировании СТ следует учитывать температурный режим оборудования, возможное кратковременное насыщение материала магнитопровода в переходных режимах, не приводящее к аварийному отключению ИП; с достаточной точностью вычислять активные и реактивные потери в магнитопроводе и в обмотках, чтобы рассчитать и обеспечить параметры системы охлаждения.

Методика оптимизации массы и габаритов СТ, основные соотношения, рекомендации по проектированию, анализ процессов, учитывающих как свойства примененного материала, так и конструкцию СТ, приведены в [7]. На рис. 3 показан эскиз внешнего вида оптимизированного варианта, на рис. 4 – один из результатов оптимизации: изменение общей массы СТ по шагам вычислений.

Результат: масса изделия снизилась примерно в 2 раза по отношению к исходному значению.

В результате моделирования получены и построены регулировочная и внешняя характеристики ИП при изменении сопротивления нагрузки от 50 до 500 Ом (рис. 5 и 6).

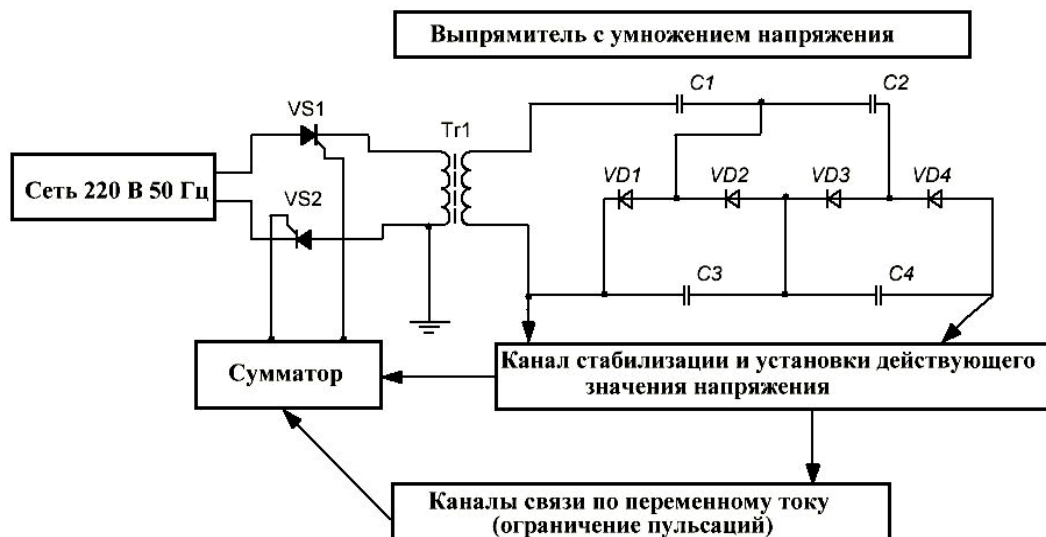


Рис. 1. Функциональная схема ИП с тиристорным ключом переменного тока

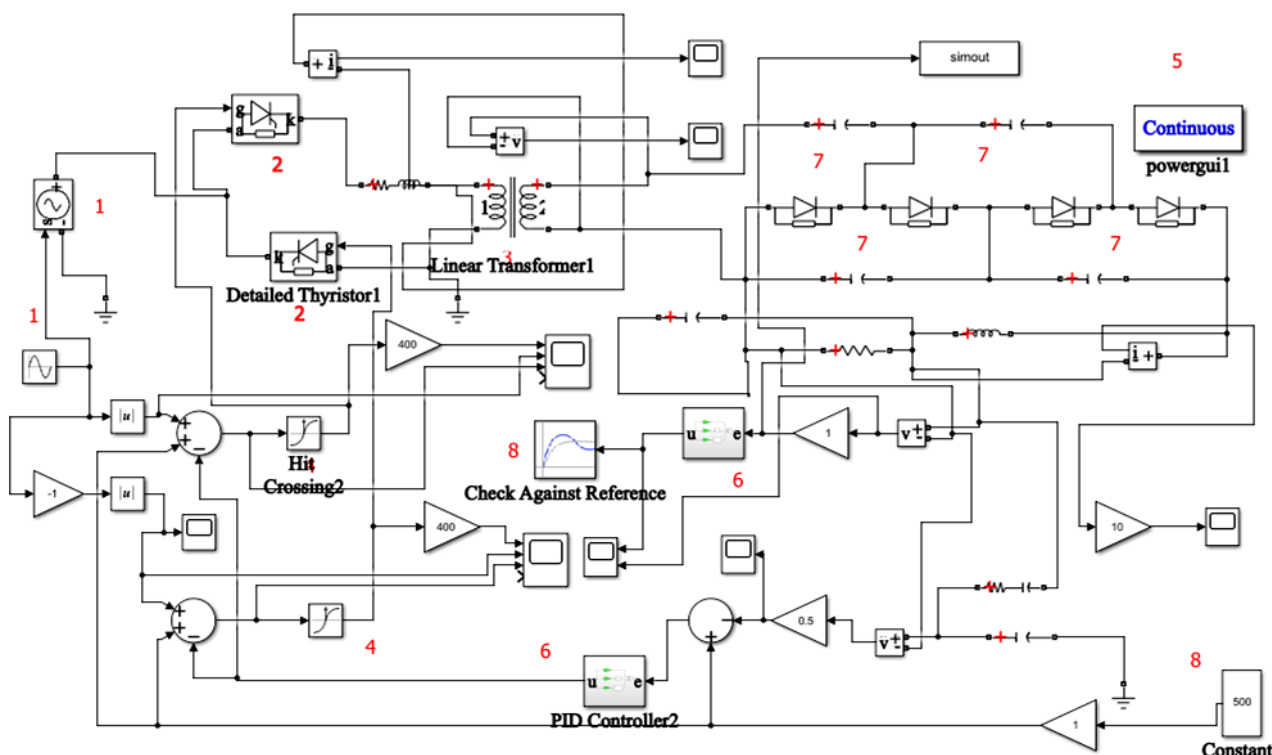


Рис. 2. Схема имитационной модели ИП с тиристорным ключом переменного тока:

- 1 – питающая сеть; 2 – тиристоры выбора полярности напряжения сети;
3 – силовой трансформатор; 4 – генератор одиночных импульсов; 5 – графический интерфейс;
6 – ПИД контроллер; 7 – высоковольтный выпрямитель; 8 – блок оптимизации NCD, установка требуемого напряжения

Работа ИП в режиме активного подавления (ограничения) пульсаций демонстрируется графиками на рис. 7. За счет ФИМ тиристорного ключа переменного тока и пассивного фильтра достигается снижение уровня пульсаций напряжения ИП. В дан-

ном примере амплитуда пульсаций снижена на 23,4 % по отношению к исходной (42 % с пассивным фильтром). ФИМ отрабатывала коррекцию угла управления тиристорами в пределах $2-5^\circ$ без ухудшения стабилизации.

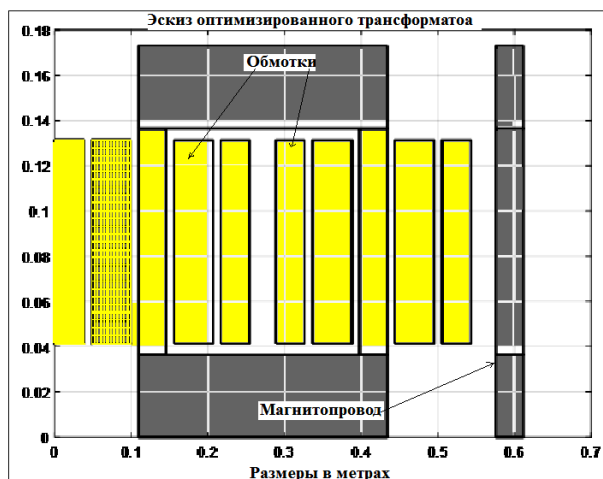


Рис. 3. Магнитопровод и обмотки СТ

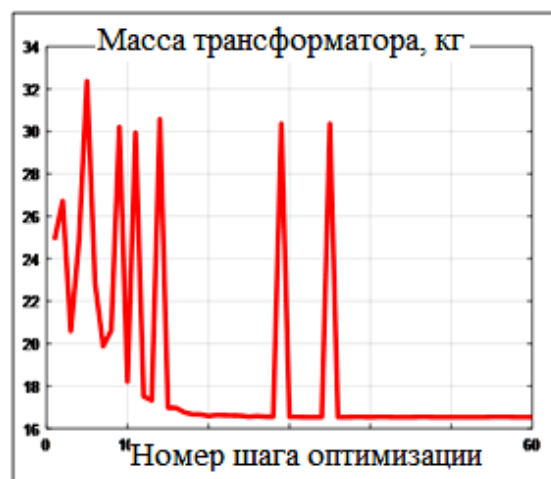


Рис. 4. Оптимизация массы СТ

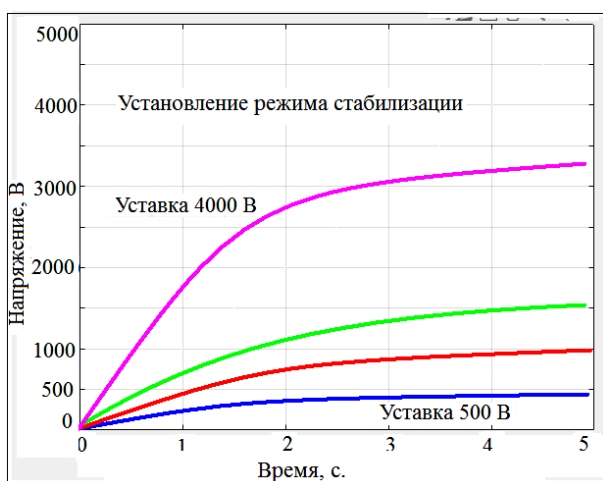


Рис. 5. Регулировочные характеристики ИП с тиристорным ключом

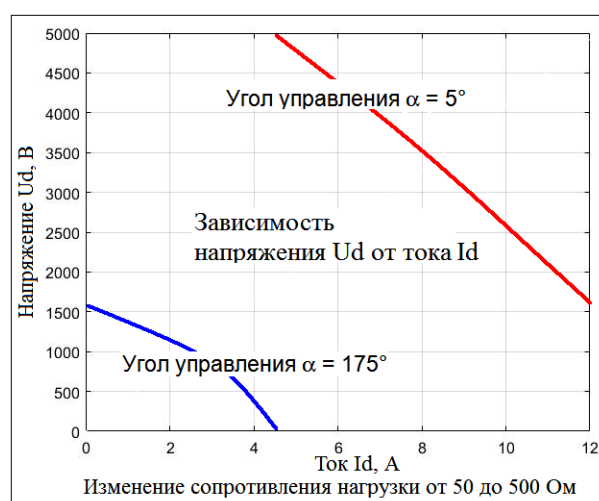


Рис. 6. Внешние характеристики ИП при различных углах управления

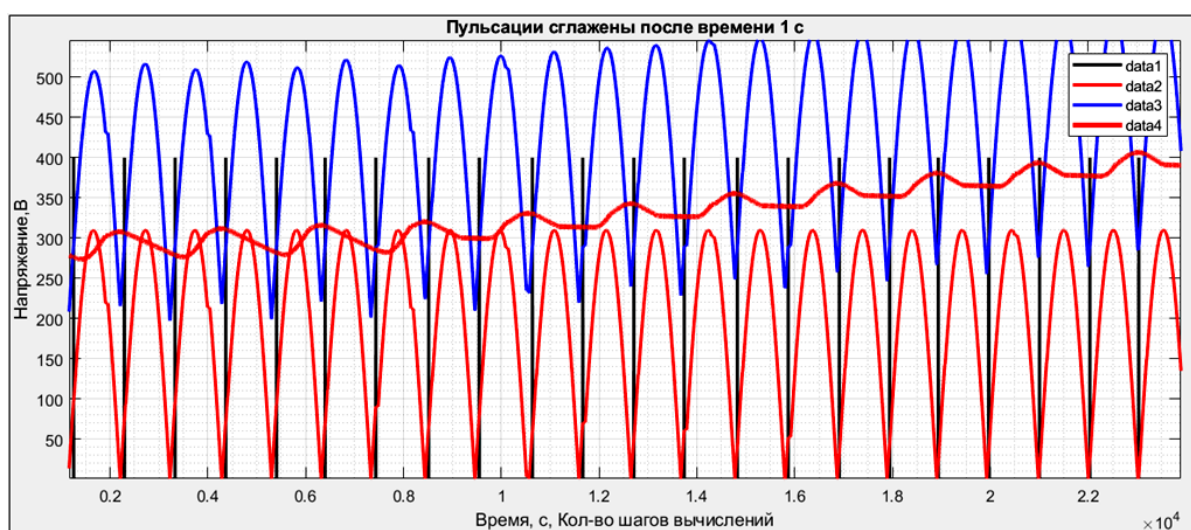


Рис. 7. Процесс минимизации пульсаций за счёт ФИМ тиристорного ключа:
 data1 – импульсы управления; data2 – напряжение сети (положительная полуволна);
 data3 – напряжение на нагрузке (установление); data4 – пульсации напряжения на нагрузке

ИП с ШИМ и транзисторным ключом переменного тока

Схема имитационной модели ИП с транзисторным ключом переменного тока показана на рис. 8. В цепи отрицательной обратной связи для управления ШИМ ис-

пользован ПИД регулятор с оптимальной настройкой (рис. 9).

С помощью модели получена регулировочная характеристика, которая представлена на рис. 10.

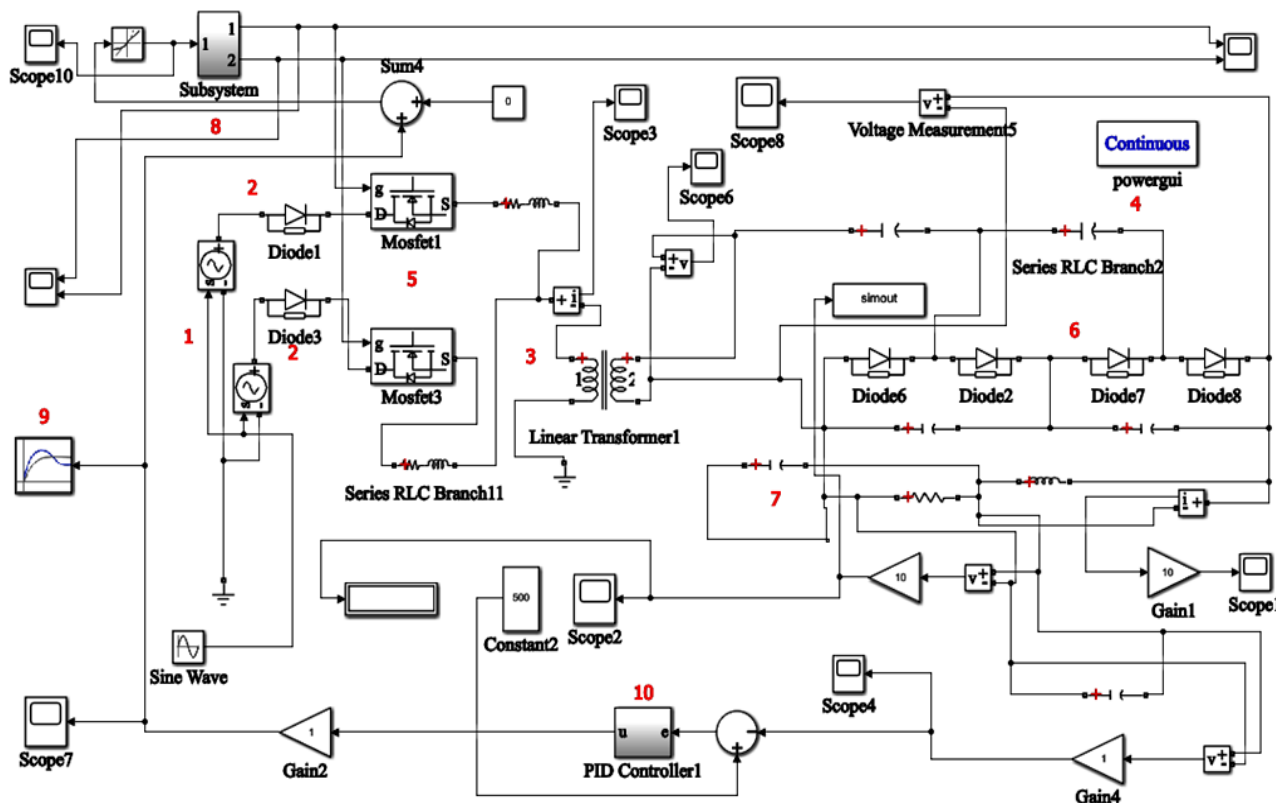


Рис. 8. Схема имитационной модели ИП с транзисторным ключом переменного тока:

1 – питающая сеть; 2 – диоды выбора полярности напряжения сети; 3 – силовой трансформатор; 4 – графический интерфейс; 5 – транзисторы инвертора; 6 – высоковольтный выпрямитель; 7 – цепи фильтра и нагрузка; 8 – подсистема (ШИМ); 9 – блок оптимизации NCD; 10 – ПИД контроллер

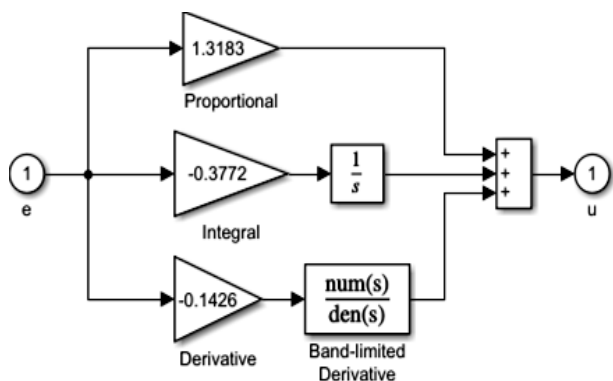


Рис. 9. ПИД регулятор с оптимальными настройками

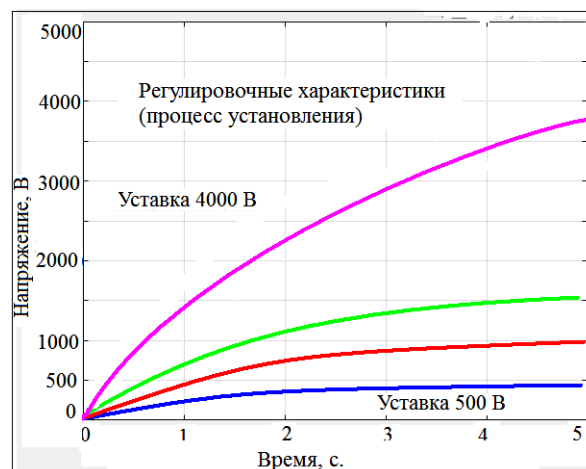


Рис. 10. Регулировочные характеристики ИП с транзисторным ключом

Заключение

В статье предложены и исследованы на математических моделях ИП с улучшенными техническими характеристиками для анодных цепей СВЧ-приборов. Такие ИП могут найти применение и в других электротехнологических установках, где требуется стабильное повышенное напряжение постоянного тока (1 кВ и более) с малыми пульсациями.

Анализ вариантов схем показал, что ИП имеют практически одинаковые статические характеристики и энергетические показатели.

За счет ШИМ транзисторного ключа переменного тока повышение частоты преобразования до 20 кГц и применение пассивного фильтра позволяет снизить пульсации напряжения ИП до требуемого уровня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

2. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко и др. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 2-6.

3. **Лебедев И.В.** Техника и приборы СВЧ: учебник для вузов под редакцией Н.Д. Девяткова. Москва: Высшая школа, 1970. 376 с.

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

5. **Heggannavar M., Kulkarni H.** Power supply design for magnetron power source from single-phase supply // International Con-

ference on Energy Systems and Applications. India, Pune, 2015. P. 546-551, DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503409.

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

7. Особенности проектирования силового трансформатора для системы электропитания подвижного объекта / П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 87-96.

Кошелев Петр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Peter A. Koshelev – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Electrotechnological and Converter Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Статья поступила в редакцию 26.08.22, принята к опубликованию 17.09.22

УДК 621.31

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Д.А. Вырыханов

FORMATION OF ENERGY BALANCE IN POWER SUPPLY SYSTEMS

D.A. Vyrykhanov

Предложено дополнить определение баланса энергии, распределяемой с помощью систем электроснабжения, значением энергии преобразуемой в механическую форму. Показана возможность определения механической составляющей энергетического баланса систем электроснабжения по результатам замеров токов и напряжений в электрических машинах.

Ключевые слова: система электроснабжения, энергетический баланс, механическая энергия

Электрическая энергия в настоящее время является основным видом энергии, используемым в промышленности и быту. От эффективности работы систем электроснабжения (СЭС) зависят экономические показатели работы промышленности, социальная обеспеченность общества и степень конкурентоспособности государства в целом. Характерной особенностью СЭС является соблюдение баланса мощности между величинами преобразованной генераторами и потребленной потребителями электрической энергии. С учетом потерь энергии в линиях электропередач (ЛЭП), данный баланс основан на фундаментальном свойстве протекания электрического тока по замкнутой электрической цепи. Мощность, передаваемая из генератора в электроприемник через некоторое сечение питающей цепи определяется величинами тока и напряжения наблюдаемыми на данном сечении. В настоящее время составляющими баланса

It is proposed to perfect the definition of the energy balance distributed by means of power supply systems by adding the meaning of energy converted into mechanical form. The author demonstrates a possibility to determine the mechanical component of the energy balance of power supply systems based on the results of measurements of currents and voltages in electric machines.

Keywords: power supply system, energy balance, mechanical energy

мощности, величины которых регистрируются и используются в управлении энергосистемой, являются величины активной и реактивной мощности, определяемые как составляющие комплексной величины полной мощности $\dot{S}$, определяемой произведением комплексов тока $\dot{I}$ и напряжения $\dot{U}$ в рассматриваемом сечении ЛЭП:

$$\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} \cdot e^{-j\varphi}, \quad (1)$$

где φ угол сдвига фаз между комплексами напряжения и тока. Под активной мощностью понимается интенсивность неконсервативного потока энергии из СЭС в тепловую или механическую формы без разделения на данные составляющие. Под реактивной мощностью понимается величина, определяемая из выражения

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (2)$$

где P – активная мощность. Поиск соответствия реактивной мощности известным, об-

щепринятым физическим характеристикам в основном представлялись оценками средних потоков энергии в электромагнитных системах между источниками энергии и нагрузкой и, к настоящему времени, не привел к какой-нибудь общепринятой интерпретации [1-3]. Также, выражения (1), (2) не отражают процессы электромеханического преобразования энергии, протекающие в электрических машинах, формирующих до 70 % потребляемой в энергосистеме энергии. Таким образом, существующая система оценки энергетического баланса не отражает физический смысл протекающих процессов. Можно предположить, что следствием этого является непрерывное усложнение программно-аппаратных комплексов релейной защиты и автоматики, управляющих системой, физические процессы которой управляются по балансу опосредованных критериев, например Q (2) или по частоте изменения напряжения. Учитывая мнение академика А.А. Макарова [4] о развитии энергетики по пути последовательного включения в круг рассматриваемых вопросов все большего количества известных факторов, вначале технического, затем экономического, и политического характера, описанные недостатки теории общей электротехники могут являться препятствием на пути решения вопросов развития общества в целом.

Таким образом, проблема определения энергетического баланса в СЭС с включением в него составляющих, обладающих ясным физическим смыслом, является актуальной проблемой современного развития теории электротехники. В настоящей статье предложен вариант определения энергетического баланса СЭС, основанный на представлении СЭС как неконсервативной системы с определением интенсивности потоков энергии через границы СЭС в электрической, тепловой и механической формах.

Энергетический баланс СЭС в наиболее целесообразной форме должен включать оценку электрической, механической и тепловой форм энергий, циркулирующих через границы СЭС. При этом данными границами рассматриваемой СЭС являются:

– сечения ЛЭП, объединяющие рассматриваемую СЭС с внешней энергосистемой. По данной границе должно производиться определение электрической энергии, циркулирующей между СЭС и внешней энергосистемой с мощностью $p_{эл}$, определяемой КАК произведение мгновенных величин тока i и напряжения u в рассматриваемых сечениях вводных ЛЭП, согласно известному выражению [5]:

$$p_{эл} = \sum_{j=1}^N i_j u_j, \quad (3)$$

где N – количество фаз рассматриваемых ЛЭП;

– активные сопротивления составляющих СЭС и присоединенных к ней электроприемников, протекание электрического тока через которые приводит к выделению тепла. По данной границе должно производиться определение интенсивности преобразования электрической энергии в тепловую форму, согласно известному выражению [5]

$$p_{теп} = \sum_{j=1}^M R_j i_j^2, \quad (4)$$

где M – количество активных сопротивлений в рассматриваемой СЭС и питаемых от нее электроприемниках;

– электрические контуры (обмотки) электрических машин, магнитосвязанные с контурами, запитанными от рассматриваемой СЭС или от внешнего источника энергии или с источниками магнитодвижущей силы в виде постоянных магнитов и обеспечивающие преобразование энергии в механическую форму, с мощностью, согласно выражения [6, 7]:

$$p_{мех} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^K i_j \left(\frac{d\psi_j}{dt} - L_j \frac{di_j}{dt} \right), \quad (5)$$

где K – количество электрических контуров, протекание электрических токов в которых приводит к преобразованию электрической энергии в механическую форму; $d\psi_j / dt$ – противо-ЭДС, наблюдаемая на электрических контурах; L_j – отношение величины суммарного потокосцепления

рассматриваемого j -го электрического контура, сформированного собственными или внешними источниками магнитодвижущей силы к величине тока i_j в данном контуре:

$$L_j = \Psi_j / i_j. \quad (6)$$

Интегрирование по времени выражений (3)-(5) позволяет определить величины энергий, которыми рассматриваемая СЭС обменивалась с внешней средой:

$$W_{эл} = \int_{t_1}^{t_2} p_{эл} dt, \quad (7)$$

$$W_{теп} = \int_{t_1}^{t_2} p_{теп} dt, \quad (8)$$

$$W_{мех} = \int_{t_1}^{t_2} p_{мех} dt. \quad (9)$$

Баланс финансовых затрат при взаиморасчетах с участниками рынка электроэнергии предлагается определять на основании величины электроэнергии $W_{эл}$ (7) передаваемой через их границы балансовой принадлежности. Технический учет должен быть дополнен энергией, накапливаемой в СЭС форме энергии магнитного и электрического полей.

В отношении практической реализации предлагаемого метода определения энергетического баланса СЭС следует отметить, что определение электрической (3) мощности с практической точки в достаточной степени проработано и не сопровождается техническими трудностями. Определение тепловой мощности (4) связано с необходимостью установки датчиков тока непосредственно в ветвях содержащих активные сопротивления, либо поиска величины входного активного сопротивления электроприемников относительно его вводных клемм с установкой датчиков тока на данных клеммах. В отношении маломощных электроприемников, содержащих сложные электрические схемы, возможно определение расчетных коэффициентов или определения эквивалентных активных сопротивлений, что требует дополнительной прора-

ботки и изменений в нормативной документации.

При определении механической мощности $p_{мех}$, развиваемой электрическими машинами согласно (5), основные трудности будут связаны с необходимостью установки датчиков тока в каждой фазной обмотке, а также датчиков фазного напряжения для определения величины потокосцепления рассматриваемой фазной обмотки:

$$\Psi_j = \int_{t_1}^{t_2} (u_j - i_j R_j) dt, \quad (10)$$

где u_j – электрическое напряжение, регистрируемое на j -й обмотке электрической машины. Вычисление выражений (1)-(10) потребует применения программно-аппаратных комплексов, построенных на современных цифровых контроллерах.

Построение энергетического баланса СЭС на основании оценки электрической мощности без учета реактивной составляющей (2) позволит повысить точность взаиморасчетов, так как потребители электроэнергии будут оплачивать непосредственно электрическую энергию потребленную ими. Электроснабжающие организации смогут обоснованно формировать тарифы, исходя из значений энергии, непосредственно потерянной в тепловой форме на эксплуатируемых ЛЭП. Системы технического учета обретут возможность контроля фактического состояния электроприемников, так как будут иметь доступ к величинам механической мощности и энергии, непосредственно определяющим параметры производственного процесса. Учитывая, что переходные электромеханические процессы в СЭС протекают за время порядка нескольких миллисекунд, требования к частоте регистрации токов и напряжений, а также к организации вычислительных операций являются технически достижимыми, что определит низкую стоимость используемых программно-аппаратных комплексов. Унификация методологии определения энергетического баланса в конструкции электроприемников, форми-

рование единого протокола передачи и обработки данных позволит значительно снизить эксплуатационные затраты на электрооборудование и находится в полном соответствии с принятыми на государственном уровне программами разви-

тия цифровой экономики, интернета энергии [8].

Вывод. Предложен практически реализуемый метод определения энергетического баланса в СЭС, обеспечивающий развитие электроэнергетического комплекса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Казаков О.А.** Мультиоператорный метод построения и анализа математических моделей сложных систем (на примере электромагнитных): дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 05.13.18: защищена 23.11.2010 / Казаков Олег Андреевич. Москва, 2010. 306 с. Библиогр.: 275-297. 05201051753.

2. **Демирчян К.С.** Реактивная или обменная мощности? // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1984. № 2. С. 66-72.

3. Баланс энергий в электрических цепях / А.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др. Киев: Наукова думка, 1992. 312 с.

4. **Макаров А.А.** Сверхзадача – «Учение об энергетике» // Известия Академии наук. 2006. № 6. С. 3-14.

5. **Нейман Л.Р., Калантаров П.Л.** Теоретические основы электротехники: Ч. 1. Москва; Ленинград: Энергия, 1959. 296 с.

6. The concept of creating an adaptive sensorless system for monitoring the load of electromechanical equipment / D.A. Varykhalov, O.N. Pimenova, G.G. Ugarov, V.I. Moshkin, F.E. Lappi // Journal of Physics: Conference Series 1661 (2020) 012148 doi:10.1088/1742-6596/1661/1/012148.

7. Пат. 2775819 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Р 21/20, G 01 L 3/00. Способ управления электродвигателем переменного тока / Вырыханов Д.А., Коробейников И.С.; заявитель и патентообладатель АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» № 2021120550; завл. 13.07.2021; опубли. 11.07.2022, Бюл. № 20. 3 с.

8. Приложение к протоколу заседания президиума Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России от 28 сентября 2016 г. № 4. План мероприятий («дорожная карта») «Энержинет» Национальной технологической инициативы.

Вырыханов Денис Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Denis A. Vyrykhanov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 16.08.22, принята к опубликованию 22.09.22

УДК 620.91: 621.314

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СВЧ-УСТАНОВОК АГРОПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е.Т. Ербаев

RENEWABLE ENERGY APPLICATION FOR POWER SUPPLY OF MICROWAVE INSTALLATIONS IN AGRO-INDUSTRIAL SECTOR

Ye.T. Yerbayev

Применение СВЧ-технологий является перспективным направлением при обработке сельскохозяйственной продукции. В условиях развития фермерских хозяйств, находящихся на значительном удалении от централизованных сетей электроснабжения, разработка и создание СВЧ-установок с автономным электроснабжением является актуальной задачей. В статье рассмотрены особенности применения ветрогенераторов и солнечных панелей для электроснабжения СВЧ-установок агропромышленного назначения.

Ключевые слова: СВЧ-установка, система электроснабжения, ветрогенератор, солнечная панель

В настоящее время в Республике Казахстан имеется большое количество территорий, не подключенных к централизованным сетям. Электроснабжение объектов на таких территориях представляет собой сложную задачу, решение которой требует значительных материальных затрат. В большинстве случаев задача обеспечения электроэнергией удаленных территорий решается применением дизель-генераторов (ДГ).

Современные ДГ имеют высокий уровень надежности и автоматизации. Однако остается самый главный недостаток – высокий расход дизельного топлива, которое необходимо доставлять в удаленные районы. При этом доставка топлива в удаленные районы зачастую зависит от погодных условий, от времени года, поэтому не все-

The use of microwave technologies is a promising direction in processing of agricultural products. In the context of development of farms located at a considerable distance from centralized power supply networks, development and creation of microwave installations with autonomous power supply is an urgent task. The article discusses the features of the use of wind turbines and solar panels for the power supply of microwave installations for agro-industrial purposes.

Keywords: microwave installation, power supply system, wind generator, solar panel

гда возможна, что является одной из главных причин снижения надежности электроснабжения [1].

Концепция развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года, принятая Постановлением Правительства № 724 от 28 июня 2014 года, среди приоритетных направлений развития энергетического сектора и решения экологических вопросов указывает на интенсификацию использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Потенциал солнечной энергии страны, по расчетам, составляет около 2,5 млрд кВт·ч в год, а количество солнечных часов в году оценивается в 2200-3000 из 8760. Ветровой потенциал достигает 1820 млрд кВт·ч в год [2].

В условиях развития фермерских хозяйств, находящихся на значительном удалении от централизованных сетей электроснабжения, применение ВИЭ является наиболее эффективным решением [3, 4]. При этом для предприятий агропромышленного сектора актуальным вопросом является разработка и создание установок различного

назначения с автономным электроснабжением от ВИЭ. Применение СВЧ-технологий является перспективным направлением при обработке сельскохозяйственной продукции. При этом широкое распространение получили установки конвейерного типа [5-8]. Вариант конструкции подобной установки представлен на рис. 1.



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

В условиях мощного потенциала ВИЭ представляется заманчивым использование этих источников для электроснабжения мобильных СВЧ-установок агропромышленного назначения, которые предназначены для сезонной эксплуатации. Однако на этом пути возникают проблемы, решение которых требует радикального изменения существующего подхода к построению источников питания СВЧ-генераторов.

Генерация СВЧ-колебаний на частоте 2450 МГц осуществляется магнетронными генераторами, которые очень критичны к величине питающего напряжения [9]. Это обусловлено тем, что магнетроны имеют ярко выраженную нелинейную вольт-амперную характеристику. При этом рабочее напряжение между анодом и катодом магнетрона составляет несколько тысяч вольт.

Если в качестве источника энергии используется генератор переменного тока, то для питания цепей магнетрона мощностью порядка 1,5 кВт может быть применена схема, которая показана на рис. 2.

Накал катода осуществляется с помощью трансформатора ТН, первичная обмотка которого соединена с питающей сетью через регулятор напряжения РН. В начальный момент работы СВЧ-установки замыкается контакт К, который подключает РН к сети. В течение определенного времени катод подогревается, затем ток накала уменьшается. Напряжение в цепи анод – катод создается выпрямите-

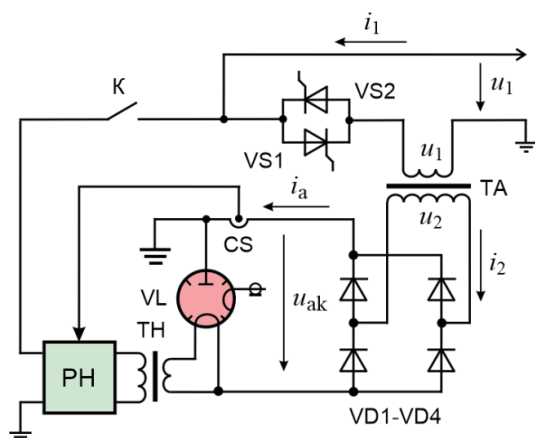


Рис. 2. Схема электропитания магнетрона с тиристорным регулятором

лем на диодах VD1 – VD4, вход которого подключен к высоковольтной обмотке повышающего трансформатора ТА. Первичная обмотка этого трансформатора соединяется с фазой сетевого напряжения через регулятор на базе встречно-параллельно соединенных тиристоров VS1, VS2.

Полученные в [10] результаты исследований показали, что схема электропитания с тиристорным регулятором не обеспечивает устойчивую работу СВЧ-установки даже в том случае, когда в качестве источника энергии используется генератор переменного тока, вал которого приводится в движение дизельным двига-

телем. В случае применения ветрогенератора частота и действующее значение напряжения питания магнетронного генератора по схеме рис. 2 будут определяться ветровой нагрузкой. Поэтому без принятия специальных мер по обеспечению заданного качества электроэнергии на выходе ветрогенератора схема будет неработоспособной.

Вариант схемного решения, позволяющего запитать цепи магнетрона от ветрогенератора, представлен на рис. 3. Это решение основано на идее применения промежуточного звена постоянного тока, в котором суммируются потоки энергии различной физической природы [11, 12].

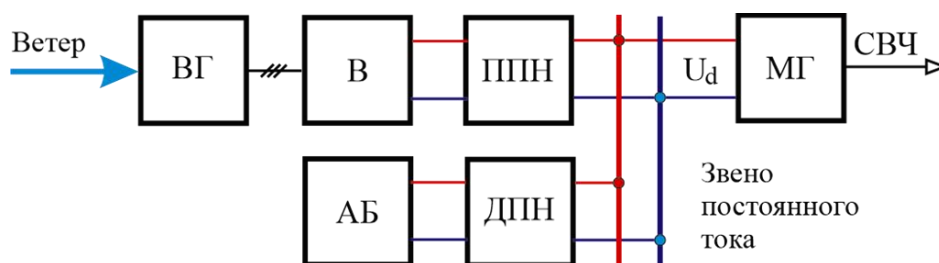


Рис. 3. Схема электропитания магнетрона с применением ветрогенератора:

ВГ – ветрогенератор; В – выпрямитель; ППН – импульсный преобразователь напряжения;

АБ – аккумуляторная батарея; ДПН – двупреобразователь;

МГ – магнетронный генератор с питанием на постоянном токе

Выходное напряжение ветрогенератора выпрямляется и после сглаживания фильтром подается в звено постоянного тока через повышающий преобразователь напряжения. К звену постоянного тока через двупреобразователь подключена аккумуляторная батарея. От звена постоянного тока получает энергию магнетронный генератор с электропитанием на постоянном токе.

Повышающий преобразователь напряжения позволяет поддерживать заданный уровень напряжения в звене постоянного тока в различных режимах работы ветрогенератора. В случае снижения ветровой нагрузки на турбину ветрогенератора энергия для питания цепей магнетрона берется от аккумуляторной батареи.

Схема магнетронного генератора с электропитанием на постоянном токе показана на рис. 4.

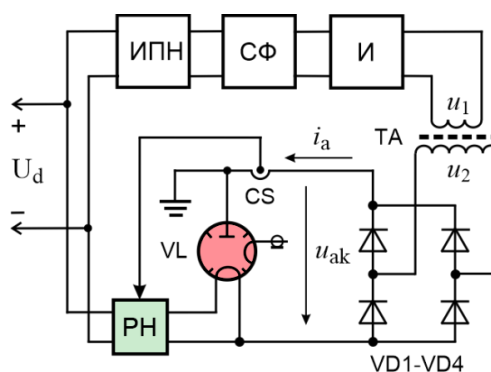


Рис. 4. Схема магнетронного генератора с электропитанием на постоянном токе

Особенностью этой схемы является работа трансформатора ТА на повышенной частоте (порядка 20 кГц), благодаря чему масса и габариты трансформатора существенно меньше, чем у трансформатора в схеме на рис. 2. Напряжение на первичной стороне трансформатора ТА формируется

инвертором, который подключен к звену постоянного тока через импульсный преобразователь напряжения и сглаживающий фильтр. Наличие импульсного преобразователя напряжения позволяет поддерживать заданный уровень мощности СВЧ-генератора при колебаниях напряжения звена постоянного тока.

Солнечные панели вырабатывают электрическую энергию постоянного тока, при

этом величина напряжения зависит от солнечной инсоляции, температуры панелей и нагрузки. Вариант схемы электропитания магнетрона с применением солнечных панелей показан на рис. 5. Повышающий преобразователь напряжения обеспечивает стабилизацию напряжения в звене постоянного тока при изменении условий работы солнечных панелей.

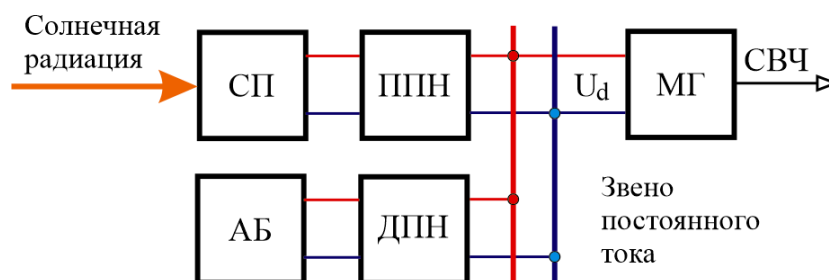


Рис. 5. Схема электропитания магнетрона с применением солнечных панелей: СП – солнечные панели; остальные обозначения, как на рис. 3

Необходимо заметить, что использование только одного вида ВИЭ может оказаться экономически невыгодным в районах с большими перепадами скоростей ветра или прихода солнечной радиации. Оборудование приходится рассчитывать на наихудшие условия работы источника энергии, что приводит, в свою очередь, к значительному удорожанию установки в целом. В этом

случае более целесообразным является комбинированное применение ВИЭ различных видов. Это объясняется тем, что во многих случаях пик прихода солнечной радиации приходится на минимум скорости ветра и наоборот, что позволяет использовать в составе гибридной энергоустановки оборудование меньшей мощности по сравнению с ВИЭ одного вида.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. Москва: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.

2. Концепция развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/documents/details/45069?lang=ru>.

3. Воронин С.М. Возобновляемые источники энергии в автономных системах энергоснабжения сельских объектов. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2005. 118 с.

4. Autonomous Power Supply System Based on a Diesel Generator and Renewable

Energy Sources for Remote Rural Areas / I.I. Artyukhov, S.F. Stepanov, S.V. Molot et al. // Proceedings of the 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (Brno, Czech Republic). 2018. DOI: 0.1109/EPE.2018.8395978.2.

5. Novel food stuff conveyor belts compound for energy saving: the effect of microwave pre-heating and mixed fillers on mechanical properties / S. Limhengha, S. Limnararat, I. Jangchud, W. Sriseubsai // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. № 4. P. 1105-1110.

6. Design of microwave heating continuous belt system for palm fruit / K. Puangsuwan, C. Tongurai, M. Chongcheawchamnan // 2015

Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). P. 1-3 DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.

7. Massalfa Microwave. URL: <http://www.massalfa.org/factory-22110-micro-wave-dryer>.

8. Ербаев Е.Т., Артюхов И.И., Николаев М.Д. СВЧ-установка для сушки сыпучих продуктов // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: сб. науч. статей II Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 9-10 июня 2022 года. Минск: БГАТУ, 2022. С. 418-422.

9. Моделирование и исследование системы электропитания мультигенераторной установки СВЧ-нагрева / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.К. Пыльская, С.В. Молот // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. Т. 28. № 4 (68). С. 106-117.

10. Артюхов И.И., Пыльская Е.К., Земцов А.И. Мультигенераторная СВЧ-установка конвейерного типа с электропитанием от автономного источника энергии // Вопросы электротехнологии. 2022. № 1 (34). С. 75-84.

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

12. Особенности построения автономной ветро-дизельной системы электроснабжения объектов с электроприемниками разного типа / Е.Т. Ербаев, И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, С.В. Молот // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 121-128.

Ербаев Ербол Тулегенович – доктор PhD, заведующий высшей школой электротехники и автоматики Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана

Yerbol T. Yerbayev – PhD, Head: Higher School of Electrical Engineering and Automation, Zhangir Khan University

Статья поступила в редакцию 26.08.22, принята к опубликованию 13.09.22

УДК 621.3.078

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СТАНЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМИ НАСОСАМИ

А.В. Стариков, И.А. Косорлуков, А.А. Казанцев

CALCULATION OF THE OPTIMUM VOLTAGE AT A FIELD SUBSTATION WITH SPECIAL CONSIDERATIONS FOR FREQUENCY CONVERTERS AT SUBMERSIBLE PUMP CONTROL STATIONS

A.V. Starikov, I.A. Kosorlukov, A.A. Kazantsev

Рассмотрена обобщенная неразветвленная отходящая линия промышленной подстанции. Получены аналитические выражения, позволяющие определить скорость вращения вала погружного электродвигателя, питаемого частотным преобразователем, при вариации входного напряжения. Также приведены формулы для расчета потребляемой погружным асинхронным электродвигателем активной и реактивной мощности и потерь в повышающем трансформаторе с учетом особенностей частотных преобразователей. Предложено использовать полученные аналитические выражения в поисковом алгоритме определения оптимального значения напряжения промышленной подстанции, обеспечивающего минимальные удельные затраты электроэнергии при механизированной добыче нефти. Приведен пример расчета оптимального значения напряжения для гипотетической отходящей линии, питающей добывающие скважины для двух вариантов реализации электротехнических комплексов: без частотных преобразователей и с частотным преобразователем в одной из станций управления.

Ключевые слова: промышленная подстанция, погружной насос, погружной электродвигатель, частотный, преобразователь, удельное потребление электроэнергии

A generalized unbranched outgoing line of a fishing substation is considered. Analytical expressions are obtained to determine the rotational speed of the shaft of the submersible electric motor powered by a frequency converter with a change in the input voltage. Formulas are also given for calculating the active and reactive power consumed by the submersible asynchronous electric motor and losses in the step-up transformer, taking into account the characteristics of frequency converters. It is proposed to use the obtained analytical expressions in the search algorithm to determine the optimal value of the field substation voltage, which ensures minimal energy consumption during mechanized oil production. An example of calculating the optimal voltage value for a hypothetical outgoing line feeding mining wells is given for two variants of the implementation of electrical complexes: without frequency converters and with the frequency converter in one of the control stations.

Keywords: field substation, submersible pump, submersible electric motor, frequency converter, specific electricity consumption

Введение

Величина напряжения промышленной подстанции существенно влияет на потребление энергии погружными насосами, осуществляющими механизированную добычу нефти. Это объясняется особенностями механических характеристик погружных насосов, связывающих момент нагрузки со скоростью вращения. С учетом того, что в большинстве случаев в приводах насосов используются асинхронные двигатели, зависимость скорости вращения от напряжения является сложной и нелинейной. В связи с этим потребление активной и реактивной мощности электродвигателем каждого погружного насоса связано с величиной напряжения также нелинейной зависимостью. С учетом того, что к промышленной подстанции подключены отходящие линии, питающие большое количество скважин, зависимость потребления электроэнергии от уровня напряжения может иметь экстремум. Это является предпосылкой для поиска оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, обеспечивающей минимум потребления электрической энергии и снижение удельных затрат энергии при механизированной добыче нефти.

Расчету оптимальной величины напряжения промышленной подстанции по-

священ целый ряд работ [1-4]. Однако применительно к механизированной добыче они не учитывают особенности частотных преобразователей станций управления погружными насосами. К таким особенностям следует отнести собственный коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности инвертора, возможность стабилизации амплитуды выходного напряжения и компенсация реактивной мощности нагрузки [5]. Кроме того, при работе частотного преобразователя в его выходном напряжении появляются высшие гармоники, которые оказывают влияние на потери в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе, что снижает КПД этих элементов электротехнического комплекса добывающей скважины.

В связи с этим целью исследования является разработка методики расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, учитывающей свойства частотных преобразователей станций управления и их влияние на работу погружного и наземного оборудования нефтяной скважины.

Рассмотрим отходящую от промышленной ПС линию, питающую электротехнические комплексы добывающих скважин (ЭКДС) (рис. 1).

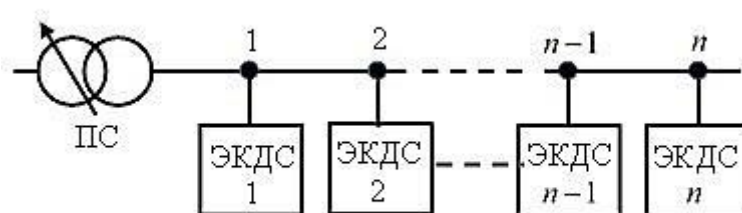


Рис. 1. Неразветвленная отходящая линия электротехнического комплекса добывающих скважин с произвольным числом узлов

ЭКДС могут оснащаться как штанговыми скважинными насосными установками, так и погружными центробежными и винтовыми насосами. При этом станции управления погружными насосами могут оснащаться частотными преобразователями, позволяющими увеличить межре-

монтный период скважины за счет обеспечения плавного пуска и поддержания требуемого режима отбора жидкости из нефтяного пласта.

Поиск оптимального напряжения промышленной подстанции, как правило, ведется путем расчета потерь мощности и напря-

жения на элементах электротехнического комплекса отходящей линии, начиная с электроприемника, самого удаленного узла n . При этом если станция управления по-

гружного центробежного насоса оснащена частотным преобразователем, то однолинейную схему ЭКДС можно представить следующим образом (рис. 2).

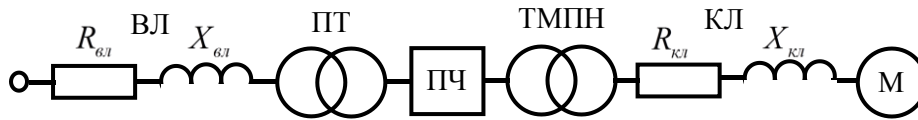


Рис. 2. Однолинейная схема типового узла ЭКДС погружного центробежного насоса с частотным преобразователем в станции управления

Она содержит воздушную линию ВЛ, соединяющую соответствующий узел отходящей линии с понижающим трансформатором ПТ, преобразователь частоты ПЧ, повышающий трансформатор ТМПН, соединительный кабель КЛ и погружной электродвигатель М. Если станция управления погружным электродвигателем (ПЭД) не оснащена частотным преобразователем, то однолинейная схема электрооборудования будет отличаться от приведенной на рис. 2 отсутствием ПЧ. Следует отметить, что в однолинейной схеме ЭКДС штанговой скважинной насосной установки будет также отсутствовать ТМПН, поскольку наземные асинхронный электродвигатели, как правило, выполняются на стандартное напряжение 0,4 кВ.

Вариация напряжения промышленной ПС влияет на величину напряжения на статорных обмотках двигателей, приводящих в действие погружные насосы. При этом происходит изменение механических характеристик и скорости двигателей. В свою очередь, момент на валу двигателя погружного центробежного насоса зависит от скорости ω , причем эта зависимость имеет квадратичный характер. В связи с этим падение скорости погружного асинхронного двигателя можно разделить на две части [6]

$$\Delta\omega_1 = \frac{(\omega_0^{50} - \omega_{nom})(k_M \omega^2 + M_0)}{M_{nom}}; \quad (1)$$

$$\Delta\omega_2 = \frac{k_{du}^{U1} \Delta U_1 M_L}{M_{nom}} = \frac{k_{du}^{U1} \Delta U_1 (k_M \omega^2 + M_0)}{M_{nom}}, \quad (2)$$

где ω_0^{50} – скорость идеального холостого хода двигателя при частоте питающего напряжения 50 Гц; ω_{nom} – номинальная скорость; k_M – коэффициент, характеризующий механическую характеристику погружного центробежного насоса; M_{nom} и M_0 – номинальный момент и момент холостого хода двигателя; k_{du}^{U1} – коэффициент передачи двигателя по отношению к изменению напряжения статора; ΔU_1 – вариация напряжения статора относительно требуемого значения; M_L – момент нагрузки.

Следовательно, в случае использования частотного преобразователя скорость ПЭД с учетом формул (1) и (2) можно приближенно рассчитать из уравнения

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0^{f1} - \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2 = \\ &= \omega_0^{f1} - \frac{(k_M \omega^2 + M_0)(\omega_0^{50} - \omega_{nom} - k_{du}^{U1} \Delta U_1)}{M_{nom}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_0^{f1} – скорость идеального холостого хода двигателя при частоте питающего напряжения f_1 , формируемой инвертором.

Величина k_{du}^{U1} зависит от частоты и действующего значения питающего фазного напряжения U_1 [7], что необходимо учитывать при расчетах оптимального значения напряжения промышленной подстанции.

Скорость идеального холостого хода асинхронного двигателя равна

$$\omega_0^{f_1} = \frac{2\pi f_1}{Z_p}, \quad (4)$$

где Z_p – число пар полюсов.

Подставляя (4) в (3), получим следующую формулу для расчета скорости ПЭД:

$$\omega = -\frac{M_{nom}}{2k_M d_1} + \sqrt{\frac{M_{nom}^2}{4k_M^2 d_1^2} + \frac{2\pi f_1 M_{nom}}{k_M d_1 Z_p} - \frac{M_0}{k_M}}, \quad (5)$$

где $d_1 = \omega_0^{50} - \omega_{nom} - k_{du}^{U1} \Delta U_1$

В большинстве случаев частотный преобразователь станции управления задает частоту напряжения на статорных обмотках ПЭД меньше номинальной. Это связано с необходимостью стабилизации динамического уровня жидкости в скважине, исходя из которого, производится выбор погружного оборудования (центробежного насоса и двигателя) с некоторым запасом. Поэтому, если в частотном преобразователе реализуется функция стабилизации амплитуды заданной частоты.

Отсюда вытекает особенность алгоритма расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, связанная с необходимостью коррекции формул для определения потребляемых активных и реактивных мощностей элементами ЭКДС, в котором используется частотный преобразователь. Активная мощность, потребляемая ПЭД, должна определяться по выражению

$$P_{SM} = \frac{k_M \omega^3 + M_0 \omega}{k_{\eta SM} \eta_{SM}}, \quad (6)$$

где $k_M = \frac{\rho g k_H k_Q}{86400 k_{\eta SP} \eta_{SP} k_{H2}}$; ρ – плотность добываемой жидкости; g – ускорение свободного падения; $k_H = \frac{H_{SP}}{\omega^2}$; $k_Q = \frac{Q_{SP}}{\omega}$; H_{SP} и Q_{SP} – напор и производительность насоса при скорости вращения ω ; η_{SP} – паспортное значение КПД насоса при работе на воде, соответствующее рабочей точке; $k_{\eta SP}$ и

k_{H2} – поправочные коэффициенты, учитывающие изменение КПД и напора насоса при откачке жидкости с определенной степенью вязкости и газосодержания; $k_{\eta SM}$ – коэффициент, учитывающий изменение КПД электродвигателя за счет действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя.

Реактивную мощность, потребляемую ПЭД при управлении частотным преобразователем, можно рассчитать по формуле

$$Q_{SM} = 3 \left[\frac{s^2 X_k \frac{f_1}{50} U_1^2}{R_{2G}^2 + s^2 \left(X_k \frac{f_1}{50} \right)^2} + \frac{U_1^2}{X_m \frac{f_1}{50}} \right], \quad (7)$$

где R_{2G} , X_k и X_m – параметры Г-образной схемы замещения погружного асинхронного двигателя; s – скольжение.

Уточненное выражение для расчета активных потерь повышающего трансформатора ТМПН будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta P_{SUT} = 10^3 (\Delta P_{nl.SUT} + \beta_{SUP}^2 \Delta P_{sc.SUT}) k_{\Delta P}, \quad (8)$$

где $\Delta P_{nl.SUP}$ и $\Delta P_{sc.SUP}$ – активные потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора, берущиеся из его паспортных данных; β_{SUP} – коэффициент загрузки; $k_{\Delta P}$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в повышающем трансформаторе за счет действия высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя.

Поскольку частотный преобразователь обладает собственными коэффициентами полезного действия η_{FC} и мощности $\cos \varphi_{FC}$, то активная и реактивная мощность на выходе понижающего трансформатора ПТ должна вычисляться по формулам

$$P_{2SDT} = \frac{P_{SUT} + \Delta P_{SUT}}{\eta_{FC}}; \quad (9)$$

$$Q_{2SDT} = \frac{P_{2SDT} \sqrt{1 - (\cos \varphi_{FC})^2}}{\cos \varphi_{FC}}. \quad (10)$$

Полученные формулы (5)-(10) позволяют адаптировать известный алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей частотных преобразователей станций управления погружными насосами. При этом если частотный преобразователь установлен в станции управления ЭКДС самого удаленного узла n отходящей линии, то необходимо варьировать выходное напряжение n -го понижающего трансформатора в пределах $(0,9 \div 1,1)U_{FCin, nom}$. Если частотные преобразователи установлены в ЭКДС, подключенных к другим узлам отходящей линии, то для выравнивания потенциалов узлов, вызванных нагрузками различных ЭКДС, целесообразно опять же варьировать выходные напряжения

соответствующих ПТ. При этом необходимо анализировать режим работы погружного насоса с позиций определения возможностей частотного преобразователя по стабилизации заданного напряжения.

В качестве примера расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции рассмотрим гипотетическую отходящую линию, содержащую 3 узла (рис. 3). Промысловая подстанция соединена с первым узлом воздушной линией, имеющей активное сопротивление $R_{nc-1} = 1,02$ Ом и индуктивное сопротивление $X_{nc-1} = 0,85$ Ом. Воздушные линии между другими узлами характеризуются параметрами $R_{1-2} = 1,224$ Ом, $X_{1-2} = 1,202$ Ом, $R_{2-3} = 0,612$ Ом и $X_{2-3} = 0,51$.

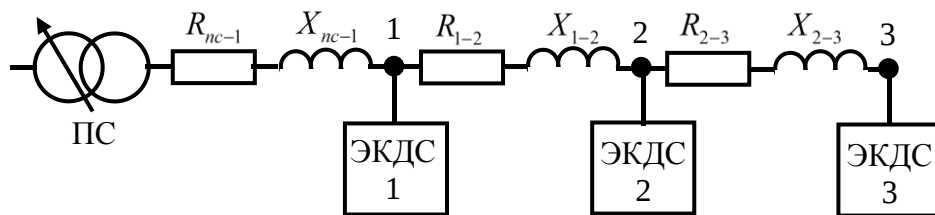


Рис. 3. Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ПЭД

Каждая ЭКДС оснащена погружным центробежным насосом 0215ЭЦНАКИ5-125И с номинальным напором 1450 м при работе на воде и номинальной производительностью $125 \text{ м}^3/\text{сут}$. Рабочая точка насоса определяется напором 1565 м, расходом $95 \text{ м}^3/\text{сутки}$ и коэффициентом полезного действия $\eta_{SP} = 0,49$, что достигается дроселированием штуцера на устье скважины. Плотность добываемой жидкости $\rho = 1041 \text{ кг/м}^3$, а характеристики насоса при ее откачке определяются коэффициентами $k_H = 0,0169 \text{ мс/рад}$, $k_Q = 0,3117 \text{ м}^3/\text{рад} \cdot \text{сут.}$, $k_{H2} = 0,96$ и $k_{\eta SP} = 0,93$.

Насосы приводятся в действие погружными электродвигателями ЭДТ45-103М1 со следующими характеристиками: мощность $P_{nom} = 45 \text{ кВт}$; линейное напряжение $U_{1l, nom} = 1400 \text{ В}$; ток $I_{1, nom} = 28 \text{ А}$; коэффициент полезного действия $\eta_{SM} = 81 \%$;

$\cos \varphi_{SM} = 0,83$; скольжение $s_{nom} = 0,055$; число пар полюсов $Zp = 1$; скорость идеального холостого хода $\omega_0 = 314 \text{ рад/с}$; номинальная скорость $\omega_{nom} = 296,9 \text{ рад/с}$; номинальный момент $M_{nom} = 151,6 \text{ Нм}$; $R_{2G} = 1,868 \text{ Ом}$; $X_k = 6,884 \text{ Ом}$; $X_m = 68,414 \text{ Ом}$; $k_{\partial y}^{U_1} = 0,0511 \text{ рад/Вс}$; $M_0 = 8,2 \text{ Нм}$; $k_{\eta SM} = 0,94$.

Для согласования напряжения ПЭД с напряжением станций управления в каждой ЭКДС установлены повышающие трансформаторы ТМПНГ100/3 номинальной мощностью 100 кВА с потерями холостого хода $\Delta P_{nl, SUT} = 0,31 \text{ кВт}$, короткого замыкания $\Delta P_{sc, SUT} = 2,4 \text{ кВт}$ и $k_{\Delta P} = 1,05$.

Повышающие трансформаторы соединены с ПЭД кабелями, имеющими активное и индуктивное сопротивления $R_{cl} = 1,191 \text{ Ом}$ и $X_{cl} = 0,199 \text{ Ом}$.

В каждой ЭКДС также установлены понижающие трансформаторы ТМГФ100/10 номинальной мощностью 100 кВА, которые согласуют напряжение отходящей линии с входным напряжением станций управления погружными насосами и имеют потери холостого хода $\Delta P_{nl.SDT} = 0,29$ кВт и короткого замыкания $\Delta P_{sc.SDT} = 1,98$ кВт.

Понижающие трансформаторы соединены с узлами отходящей линии воздушными линиями с активным сопротивлением $R_{al} = 0,27$ Ом и индуктивным сопротивлением $X_{al} = 0,172$ Ом.

Произведем расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции для двух вариантов реализации ЭКДС: без частотных преобразователей в станциях управления погружными насосами и с частотным преобразователем, установленным в станции управления ЭКДС2.

Для обоих вариантов поиск оптимального значения напряжения промышленной подстанции начнем исходя из обеспечения на статоре самого удаленного ПЭДЗ напряжения на 10 % меньше номинального ($\Delta U_{ISM3} = -0,1U_{1f.nom}$), то есть потребуем, чтобы фазное напряжение на статоре этого двигателя было равно $U_{1f.SM3} = 727,2$ В. Расчет напряжения промышленной подстанции U_{FSub} , обеспечивающей соответствующее напряжение на статоре ПЭДЗ, и потребляемой при этом активной P_{FSub} , реактивной Q_{FSub} и полной S_{FSub} мощности и потерь $\Sigma \Delta P$ в элементах ЭКДС произведем в соответствии с алгоритмом, разработанным в [1]. При этом для второго варианта реализации отходящей линии расчет осуществляется с учетом формул (5)-(10). Определение напряжения промышленной подстанции произведем также и для обеспечения следующего ряда отклонений напряжения статора самого удаленного ПЭДЗ от номинального значения: $\Delta U_{ISM3} = -0,05U_{1f.nom}$, $\Delta U_{ISM3} = -0,025U_{1f.nom}$,

$$\Delta U_{ISM3} = 0, \quad \Delta U_{ISM3} = 0,025U_{1f.nom}, \\ \Delta U_{ISM3} = 0,05U_{1f.nom} \quad \text{и} \quad \Delta U_{ISM3} = 0,1U_{1f.nom}.$$

В итоге получим следующие результаты, приведенные в табл. 1 и 2.

Для расчета коэффициента эффективности k_{eff} объем добываемой жидкости определяется по формуле

$$Q = \frac{Q_{SP3.nom} \omega_3}{\omega_{nom3}} + \frac{Q_{SP2.nom} \omega_2}{\omega_{nom2}} + \frac{Q_{SP1.nom} \omega_1}{\omega_{nom1}}, \quad (11)$$

где $Q_{SP1.nom}$, $Q_{SP2.nom}$ и $Q_{SP3.nom}$ производительности первого, второго и третьего насосов при номинальных скоростях соответствующих погружных электродвигателей ω_{1nom} , ω_{2nom} и ω_{3nom} , причем

$$k_{eff} = \frac{Q}{P_{FSub}}.$$

Удельные затраты электроэнергии на добычу одного кубометра жидкости из скважины рассчитывались следующим образом

$$E = \frac{24P_{FSub}}{Q}.$$

В таблицах жирным шрифтом выделены минимальные значения потребляемой с выхода промышленной подстанции активной и полной мощности, потерь в элементах ЭКДС и удельных затрат электроэнергии, а также максимум коэффициента эффективности. Они показывают, что для обеспечения минимума потребления электрической энергии необходимо обеспечивать на статоре самого удаленного погружного электродвигателя напряжение на 10 % ниже номинального значения. Это обеспечивается напряжением промышленной подстанции $U_{FSub1} = 5497$ В для первого варианта реализации электротехнических комплексов добывающих скважин и $U_{FSub2} = 5485$ В для второго. Минимуму потерь в элементах ЭКДС соответствуют $U_{FSub1} = 5917$ В и $U_{FSub1} = 5902$ В.

Таблица 1. Зависимость напряжения промышленной подстанции, мощности, потерь в элементах ЭКДС, объема добываемой жидкости, коэффициента эффективности и удельных затрат электроэнергии от отклонения напряжения питания ПЭДЗ при отсутствии частотных преобразователей в станциях управления погружными насосами

$\Delta U_{1f,SM3}, \%$	–10%	–5%	–2,5%	0%	2,5%	5%	10%
$U_{FSub}, В$	5497	5776	5915	6057	6203	6343	6624
$P_{FSub}, кВт$	161,9	164	165,1	167,1	168,8	170,1	172,8
$Q_{FSub}, кВАр$	130,7	137,1	140,2	152,5	161	164,9	172,7
$S_{FSub}, кВА$	208,1	213,8	216,6	226,3	233,3	236,9	244,3
$\Sigma \Delta P, кВт$	17,2	17,01	16,94	17,74	18,22	18,27	18,41
$Q, м^3/сут$	276,5	278	278,8	279,5	280,3	281,1	282,8
$k_{eff}, м^3/сут \cdot кВт$	1,707	1,695	1,688	1,673	1,66	1,653	1,636
$E, кВт \cdot ч/м^3$	14,06	14,16	14,22	14,35	14,45	14,52	14,67

Таблица 2. Зависимость напряжения промышленной подстанции, мощности, потерь в элементах ЭКДС, объема добываемой жидкости, коэффициента эффективности и удельных затрат электроэнергии от отклонения напряжения питания ПЭДЗ при наличии частотного преобразователя в станции управления погружным насосом ЭКДС2

$\Delta U_{1SM3}, \%$	–10%	–5%	–2,5%	0%	2,5%	5%	10%
$U_{FSub}, В$	5485	5763	5902	6042	6187	6327	6608
$P_{FSub}, кВт$	154,7	156,1	156,8	158	159,2	160	161,8
$Q_{FSub}, кВАр$	104,2	108,4	110,5	117,1	124,3	126,8	132
$S_{FSub}, кВА$	186,6	190,1	191,8	196,6	202	204,2	208,8
$\Sigma \Delta P, кВт$	17,39	17,22	17,15	17,5	17,93	17,94	18
$Q, м^3/сут$	280,1	281,1	281,6	282,1	282,7	283,2	284,3
$k_{eff}, м^3/сут \cdot кВт$	1,81	1,801	1,796	1,786	1,775	1,769	1,757
$E, кВт \cdot ч/м^3$	13,26	13,33	13,36	13,44	13,52	13,56	13,66

Следует обратить внимание на тот факт, что в случае применения частотного преобразователя в станции управления ЭКДС2 снижается потребление активной и полной мощности, что приводит к увеличению коэффициента эффективности k_{eff} и снижению удельных затрат электроэнергии. Это объясняется тем, что во второй скважине исключается падение давления на штуцере, что приводит к снижению требуемой мощности, подводимой к входному валу погружного насоса. Кроме того, рабочая точка напорной характеристики насоса достигается снижением частоты питающего напряжения до 45 Гц. В

результате коэффициент полезного действия насоса повышается до значения $\eta_{SP2} = 0,51$. Это может являться обоснованием применения частотных преобразователей в станциях управления погружными насосами.

Выводы

1. Разработанная методика позволяет производить расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом свойств частотных преобразователей станций управления и их влияния на работу погружного и наземного оборудования нефтяной скважины.

2. Разработанная методика расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции может быть применена и для разветвленной отходящей линии.

3. Проведенное исследование показывает, что применение частотных преоб-

разователей в станциях управления погружными насосами позволяет повысить энергетическую эффективность механизированной добычи нефти за счет исключения гидравлических потерь на штуцере скважины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оптимизация режимов работы промышленных линий электропередачи / Б.Н. Абрамович, О.В. Иванов, Д.Н. Нурбосынов, Л.В. Макурова, В.А. Лейман // Промышленная энергетика. 1984. № 12. С. 21-24.

2. **Стариков А.В., Табачникова Т.В., Казанцев А.А.** Обоснование необходимости регулирования напряжения промышленной подстанции // Актуальные вопросы и инновационные решения в нефтегазовой отрасли: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (весенняя сессия). Москва: Перо, 2021. С. 271-278.

3. Алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции / А.В. Стариков, Т.В. Табачникова, А.А. Казанцев, И.А. Косорлуков // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2021. Т. 29. № 4. С. 116-131.

4. **Табачникова Т.В., Нурбосынов Д.Н.** Многоуровневая иерархическая оптимизация режима напряжения системы электроснаб-

жения нефтегазодобывающего предприятия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2017. № 1 (53). С. 85-95.

5. **Paul Avery.** The truth about five common VFD myths // Control Engineering. 2015. URL: <https://www.controleng.com>.

6. **Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.** Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE Xplore. 2020. P. 1-5.

7. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, Т.В. Табачникова, И.А. Косорлуков, О.С. Беляева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. № 4 (64). С. 155-167.

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

Косорлуков Игорь Андреевич – кандидат технических наук, докторант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Казанцев Александр Андреевич – старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета

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

Igor A. Kosorlukov – PhD, doctoral student of the department Electric drive and industrial automation, Samara State Technical University

Alexander A. Kazantsev – Senior Lecturer of the Department of Automated Electric Power Systems, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 19.08.22, принята к опубликованию 03.09.22

УДК 621.3.078

ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В.И. Доманов, Д.Г. Мурзаков, Н.Е. Комаров

LINEARIZED MATHEMATICAL MODEL TO A WOUND-ROTOR INDUCTION MOTOR AS A CONTROL OBJECT

V.I. Domanov, D.G. Murzakov, N.E. Komarov

Рассмотрена математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Проведена линеаризация в районе некоторой рабочей точки. Разработана структурная схема АДФР. Приведены графики переходных процессов электропривода. Проведен анализ работы двигателя при изменении напряжения ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, фазный ротор, двойное питание, передаточная функция, линеаризация

The article considers a mathematical model to wound-rotor induction motor (WRIM). Linearization was performed in the area of a working point. A block diagram of the WRIM has been developed, and graphs of transient processes of the electric drive are provided. Analysis of the engine operation under the changes in the rotor voltage was performed.

Keywords: induction motor, wound rotor, dual power supply, transfer function, linearization

Математические модели электрических машин характеризуются весьма полным описанием физических процессов, протекающих в них в установившихся и переходных режимах работы. Общая теория процессов в электрических машинах переменного тока и, в частности, асинхронных машин хорошо изучена [1-3].

Работу АДФР как объекта управления можно описать, используя дифференциальные уравнения, которые характеризуются большим разнообразием, и могут быть описаны в различных системах координат [1, 7].

Асинхронные машины нашли широкое применение в системах подчиненного регулирования. Все системы подчиненного регулирования базируются на математических моделях асинхронного электродвигателя различной степени сложности. При этом актуальной задачей является получения линеаризованной математической модели АДФР, позволяющей синтезировать двухканальные системы регулирования.

В работе [4] получена система дифференциальных уравнений АДФР с учетом режима удержания и его структурная схема. Аналогично получим уравнения в системе $x - y$, связанной с полем статора [7],

позволяющей строить системы подчиненного регулирования аналогично электроприводам постоянного тока.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{Sx}}{dt} = U_{Sx} - I_{Sx}R_S + \omega_S \psi_{Sy} \\ \frac{d\psi_{Sy}}{dt} = U_{Sy} - I_{Sy}R_S - \omega_S \psi_{Sx} \\ \frac{d\psi_{Rx}}{dt} = U_{Rx} - I_{Rx}R_R + \omega_R \psi_{Ry} \\ \frac{d\psi_{Ry}}{dt} = U_{Ry} - I_{Ry}R_R - \omega_R \psi_{Rx} \\ I_{Sx} = \frac{1}{L_S} \psi_{Sx} - \frac{L_m}{L_S} I_{Rx} \\ I_{Sy} = \frac{1}{L_S} \psi_{Sy} - \frac{L_m}{L_S} I_{Ry} \\ I_{Rx} = \frac{1}{L_R} \psi_{Rx} - \frac{L_m}{L_R} I_{Sx} \\ I_{Ry} = \frac{1}{L_R} \psi_{Ry} - \frac{L_m}{L_R} I_{Sy} \\ M_{эм} = \frac{3}{2} Z_p (I_{Sy} \psi_{Sx} - I_{Sx} \psi_{Sy}) \\ M_{синх.д} = M_{синх} \cos \frac{\omega}{4f} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{эм} + M_{синх.д} - M_{см}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где $U_{Sx}, U_{Sy}, U_{Rx}, U_{Ry}$ – проекции векторов напряжения статора и ротора на оси системы координат $x - y$; аналогично $I_{Sx}, I_{Sy}, I_{Rx}, I_{Ry}$ – проекции векторов тока статора и ротора; $\psi_{Sx}, \psi_{Sy}, \psi_{Rx}, \psi_{Ry}$ – проекции векторов потокосцепления статора и ротора; R_S – сопротивление статора характеризует активные потери в статорных обмотках и равно сопротивлению фазной обмотки статора; R_R – сопротивление ротора в режиме короткого замыкания; L_m – главная индуктивность характеризует ту часть потока, которая сцеплена со статором и с ротором и участвует в создании момента. На линейном участке кривой намагни-

чивания двигателя главная индуктивность является величиной постоянной; $L_S = L_m + L_{\sigma S}$ – индуктивность статора; $L_R = L_m + L_{\sigma R}$ – индуктивность ротора; $L_{\sigma S}$ – индуктивность рассеяния статора характеризует ту часть потока статора, которая не сцеплена с ротором и не принимает участие в создании момента; $L_{\sigma R}$ – индуктивность рассеяния ротора характеризует ту часть потока ротора, которая не сцеплена со статором и не принимает участие в создании момента; ω_S – частота поля статора; ω_R – частота поля ротора; $M_{эм}$ – электромагнитный момент развиваемый двигателем; $M_{синх.д}$ – динамический момент синхронизации [5] действующий в динамическом режиме в случае $\omega = \text{const}$ или $\omega = \text{var}$; $M_{см}$ – момент сопротивления на валу двигателя.

Структурная схема АДФР в соответствии с системой (1) принимает вид показанном на рис. 1.

Применим метод приближенной линеаризации для рабочей точки, близкой к номинальному режиму, и выполним следующие замены в системе (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{Sx} \cdot i_{Ry} = i_{Sx0} \cdot i_{Ry} \\ i_{Sy} \cdot i_{Rx} = i_{Sy0} \cdot i_{Rx} \\ \omega_R \cdot \psi_{Rx} = \omega_R \cdot \psi_{Rx0} \\ \omega_R \cdot \psi_{Ry} = \omega_R \cdot \psi_{Ry0} \end{array} \right. \quad (2)$$

В случае регулирования только по каналу ротора принимаем, что напряжение статора U_S и частота ω_S являются постоянными величинами, поэтому

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{Sx} = U_{Sx0} = \text{const} \\ U_{Sy} = U_{Sy0} = \text{const} \\ \omega_S = \omega_{S0} = \text{const} \end{array} \right. \quad (3)$$

Подставляя формулы (2) и (3) в систему (1), получим следующую систему уравне-

ний, описывающую АДФР:

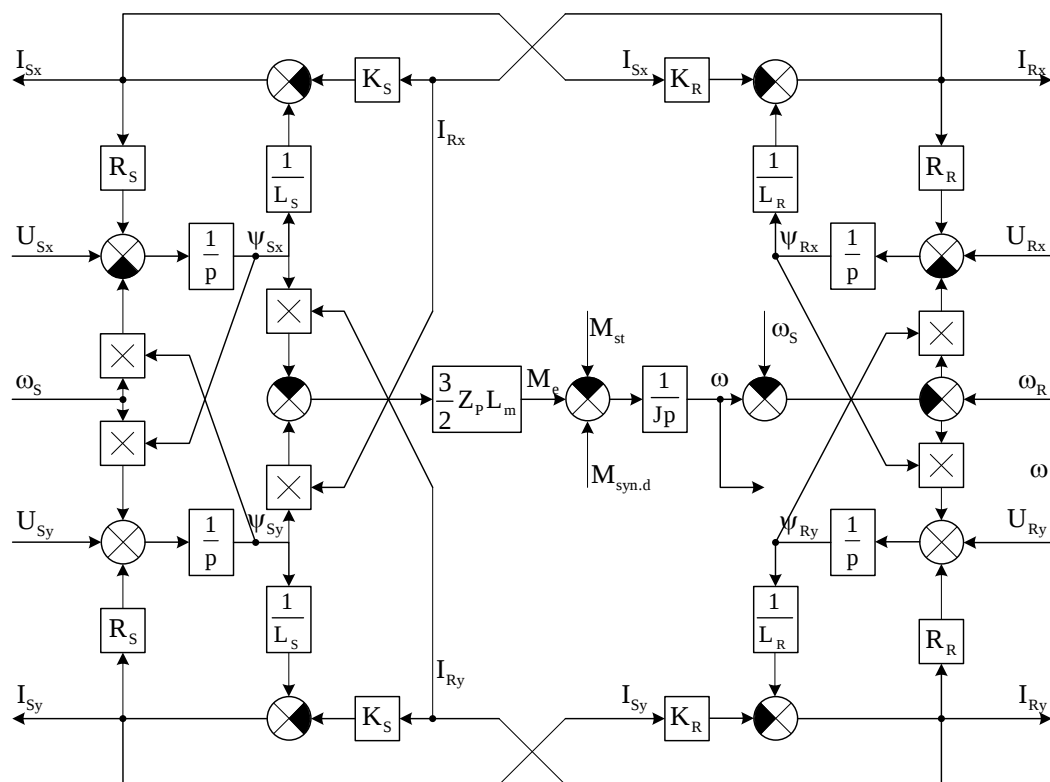


Рис. 1. Структурная схема АДФР

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{Sx} = \frac{1}{p} [U_{Sx0} + \psi_{Sy} \omega_{S0} - i_{Sx} R_S] \\ \psi_{Sy} = \frac{1}{p} [U_{Sy0} - \psi_{Sx} \omega_{S0} - i_{Sy} R_S] \\ i_{Sx} = \frac{\psi_{Sx}}{L_S} - K_S i_{Rx} \\ i_{Sy} = \frac{\psi_{Sy}}{L_S} - K_S i_{Ry} \\ \psi_{Rx} = \frac{1}{p} [U_{Rx} + \psi_{Ry} \omega_R - i_{Rx} R_R] \\ \psi_{Ry} = \frac{1}{p} [U_{Ry} - \psi_{Rx} \omega_R - i_{Ry} R_R] \\ i_{Rx} = \frac{\psi_{Rx}}{L_R} - K_R i_{Sx} \\ i_{Ry} = \frac{\psi_{Ry}}{L_R} - K_R i_{Sy} \\ M_{em} = \frac{3}{2} Z_P L_m (i_{Rx} i_{Sy0} - i_{Ry} i_{Sx0}) \\ \omega_R = \omega_{S0} - \frac{1}{Jp} (M_{em} - M_{st}) \end{array} \right. \quad (4)$$

В третьем уравнении системы (4) потокосцепление ψ_{Sx} заменим на первое уравнение системы (4)

$$i_{Sx} = \frac{1}{L_S p} [U_{Sx0} + \psi_{Sy} \omega_{S0} - i_{Sx} R_S] - K_S i_{Rx},$$

$$i_{Sx} \left[1 + \frac{R_S}{L_S p} \right] = \frac{1}{L_S p} [U_{Sx0} + \psi_{Sy} \omega_{S0}] - K_S i_{Rx}.$$

Принимаем, что $T_S = L_S / R_S$ и, поделив обе части уравнения на $1 + \frac{R_S}{L_S p}$, получим выражение

$$i_{Sx} = \frac{\frac{1}{L_S p} [U_{Sx0} + \psi_{Sy} \omega_{S0}] - K_S i_{Rx}}{\left[1 + \frac{T_S}{p} \right]} = \frac{[U_{Sx0} + \psi_{Sy0} \omega_R] - K_S i_{Rx} \cdot L_S p}{L_S p + R_S} = \frac{1}{R_S} \frac{[U_{Sx0} + \psi_{Sy0} \omega_R]}{T_S p + 1} - \frac{K_S i_{Rx} T_S p}{T_S p + 1}$$

Проведя аналогичные преобразования для остальных выражений, получим

$$i_{Rx} = \frac{1}{R_R} \frac{[U_{Rx0} + \psi_{Ry0} \omega_R]}{T_R p + 1} - \frac{K_R i_{Sx} T_R p}{T_R p + 1}, \quad (5)$$

$$i_{Ry} = \frac{1}{R_R} \frac{[U_{Ry} - \psi_{Rx0} \omega_R]}{T_R p + 1} - \frac{K_R i_{Sy} T_R p}{T_R p + 1}, \quad (6)$$

$$i_{Sx} = \frac{1}{R_S} \frac{[U_{Sx0} + \psi_{Sy0} \omega_{S0}]}{T_S p + 1} - \frac{K_S i_{Rx} T_S p}{T_S p + 1}, \quad (7)$$

$$i_{Sy} = \frac{1}{R_S} \frac{[U_{Sy0} - \psi_{Sx0} \omega_{S0}]}{T_S p + 1} - \frac{K_S i_{Ry} T_S p}{T_S p + 1}. \quad (8)$$

Учитывая (3), можно принять постоянными:

$$\frac{1}{R_S} \frac{[U_{Sx0} + \psi_{Sy0} \omega_{S0}]}{T_S p + 1} = \alpha,$$

$$\frac{1}{R_S} \frac{[U_{Sy0} - \psi_{Sx0} \omega_{S0}]}{T_S p + 1} = \beta,$$

тогда выражения статорных токов примут вид

$$i_{Sx} = \alpha - \frac{K_S T_S p}{T_S p + 1} i_{Rx}, \quad (9)$$

$$i_{Sy} = \beta - \frac{K_S T_S p}{T_S p + 1} i_{Ry}. \quad (10)$$

Произведя подстановку уравнения (9) в (5), получим

$$i_{Rx} = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{U_{Rx} + \psi_{Ry0} \omega_R}{T_R p + 1} - \frac{K_R T_R p}{T_R p + 1} \left[\alpha - \frac{K_S T_S p}{T_S p + 1} i_{Rx} \right]$$

$$i_{Rx} \left[1 - \frac{K_S T_S p}{T_S p + 1} \right] = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{U_{Rx} + \psi_{Ry0} \omega_R}{T_R p + 1} - \frac{K_R T_R p}{T_R p + 1} \alpha$$

$$i_{Rx} \left[\frac{T_S p + 1 - K_S T_S p}{T_S p + 1} \right] = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{U_{Rx} + \psi_{Ry0} \omega_R}{T_R p + 1}$$

$$i_{Rx} = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{(T_S p + 1)(U_{Rx} + \psi_{Ry0} \omega_R)}{T_R p + 1}, \quad (11)$$

$$i_{Ry} = \frac{1}{R_R} \cdot \frac{(T_S p + 1)(U_{Ry} - \psi_{Rx0} \omega_R)}{T_R p + 1}. \quad (12)$$

Произведя подстановку уравнений (11) и (12) в уравнение момента системы (4), получим

$$\begin{aligned} M_{em} &= \frac{3}{2} Z_P L_m (i_{Rx} i_{Sy0} - i_{Ry} i_{Sx0}) = \\ &= \frac{1}{R_R} \cdot \frac{T_S p + 1}{(T_R p + 1) [(1 - K_S) T_S p + 1]} \cdot \\ &\cdot [(U_{Rx} + \psi_{Ry0} \omega_R) i_{Sy0} - (U_{Ry} - \psi_{Rx0} \omega_R) i_{Sx0}] = \\ &= \frac{1}{R_R} \cdot \frac{T_S p + 1}{(T_R p + 1)} \left[\omega_R (\psi_{Rx0} i_{Sx0} + \psi_{Ry0} i_{Sy0}) + \right. \\ &\left. (U_{Rx0} i_{Sy0} - U_{Ry} i_{Sx0}) \right] \cdot (13) \\ M_{em} &= \frac{1}{R_R} \cdot \frac{T_S p + 1}{(T_R p + 1)} \left[\omega_R (\psi_{Rx0} i_{Sx0} + \psi_{Ry0} i_{Sy0}) + \right. \end{aligned}$$

Выполнив подстановку (13) в последнее уравнение системы (4), получим

$$\begin{aligned} \omega_R &= \omega_{S0} - \frac{1}{Jp} (K_M M_{em} - M_{st}) \\ \omega_R &= \omega_{S0} - \frac{1}{Jp} \left[-W_1 U_R K_R K_M + \right. \\ &\left. + \omega_R K_\omega K_M W_1 - M_{st} + K_{снх} \right] \\ \omega_R \left[1 + \frac{1}{Jp} W_1 K_\omega K_M \right] &= \\ &= \omega_{S0} + \frac{1}{Jp} \left[\frac{W_1 U_R K_R K_M + M_{st}}{p} - \right. \\ &\left. - \frac{1}{p} \omega_R K_{снх} - K_{TP} \omega \right] \\ \omega_R \left[1 + \frac{1}{Jp} \frac{K_\omega K_M}{R_R} \frac{T_S p + 1}{T_R p + 1} \right] &= \\ &= \omega_{S0} + \frac{1}{Jp} [U_R K_R W_1 K_M + M_{st}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_R &= \frac{\frac{1}{Jp} [U_R K_R W_1 K_M + M_{st}]}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)} = \\ &= \frac{\frac{1}{Jp} \cdot \frac{1}{R_R} \cdot \frac{T_S p + 1}{T_R p + 1} K_R U_R K_M}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)} = \\ &= \frac{K_R (T_S p + 1) U_R K_M}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)} + \\ &+ \frac{R_R (T_R p + 1) \cdot M_{st}}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)} \\ \omega_R &= W_1 U_R + W_2 M_{st}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{K_R (T_S p + 1) K_M}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)}, \\ W_2 &= \frac{R_R (T_R p + 1)}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)}, \\ W_1' &= \frac{W_1}{W_2} = \frac{\frac{K_R (T_S p + 1) K_M}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)}}{\frac{R_R (T_R p + 1)}{JR_R p (T_R p + 1) + K_\omega K_M (T_S p + 1)}} = \\ &= \frac{K_R K_M (T_S p + 1)}{R_R (T_R p + 1)} \end{aligned}$$

Выполнив действия по упрощению выражения, получаем

$$W_\Theta = \frac{K_R K_M (T_S p + 1)}{R_R (T_R p + 1)}. \quad (14)$$

На основании полученных выражений составлена линеаризованная структурная схема (рис. 2).

На основании исходной структурной схемы рис. 1 и линеаризованной структурной схемы рис. 2 были созданы компьютерные модели в среде динамического моделирования технических систем SimInTech [6]. Получены графики угловой частоты при изменении напряжения в момент времени $t = 0,5$ с и изменении момента сопротивления при $t = 1$ с.

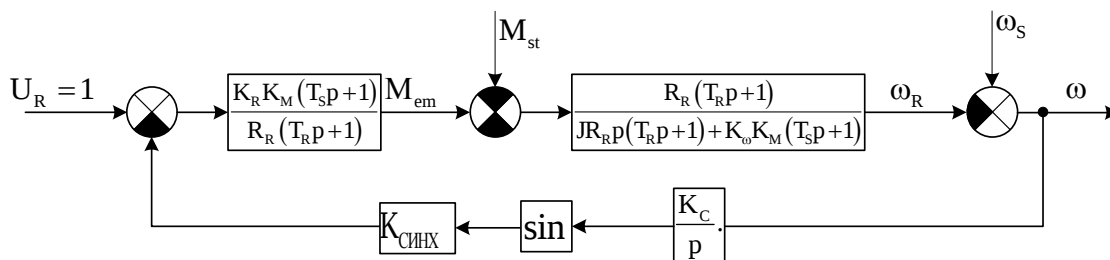


Рис. 2. Линеаризованная структурная схема

Анализ графиков рис. 3 показывает, что расхождения результатов моделирования переходных процессов в рабочей точке линеаризованной модели и исходной модели не превышают 2,6 %. Следовательно, линеаризованная модель достаточно точно отображает процесс изменения частоты вращения при изменении напряжения ротора.

Создана компьютерная модель системы с обратной связью по частоте вращения на основе линеаризованной структурной схемы (рис. 2). Преимущество системы с обратной связью состоит в способности снижать чувствительность к изменению параметров объекта управления

[8]. Получен графики угловой частоты при линейно нарастающем сигнале задания за $t = 1$ с до номинального значения (рис. 4). Для сравнения приведен график переходного процесса угловой частоты АДФР (рис. 5) в системе с обратной связью по частоте вращения при линейно нарастающем сигнале задания за $t = 1$ с.

Из графиков видно, что при частоте вращения, близкой к номинальной, наклон графиков совпадает, однако при пуске имеются различия в переходном процессе. Применение обратной связи позволяет уменьшить влияние изменений параметров асинхронной машины и скорректировать угловую частоту.

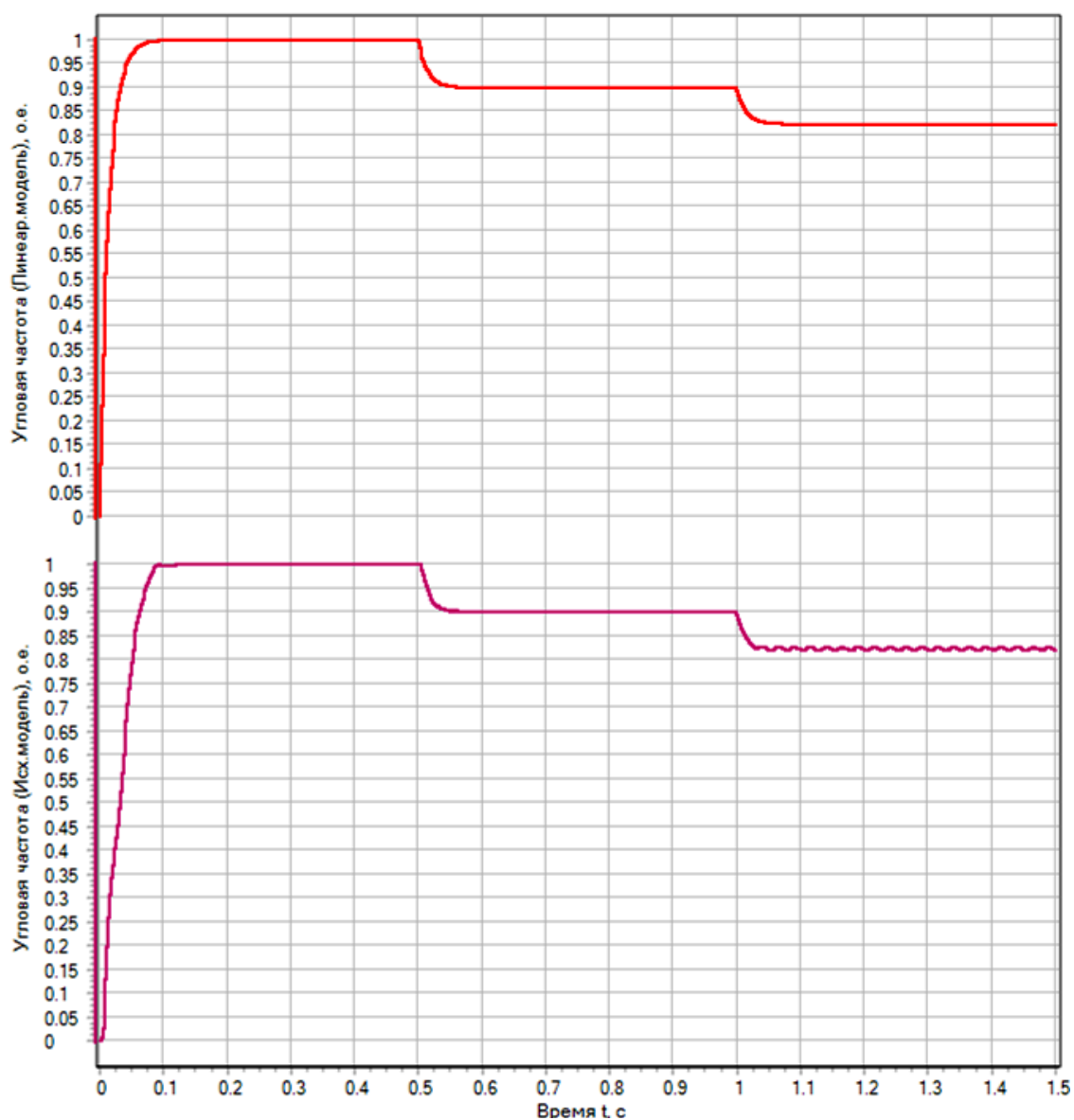


Рис. 3. Переходные процессы угловой частоты линейризованной и исходных моделей АДФР

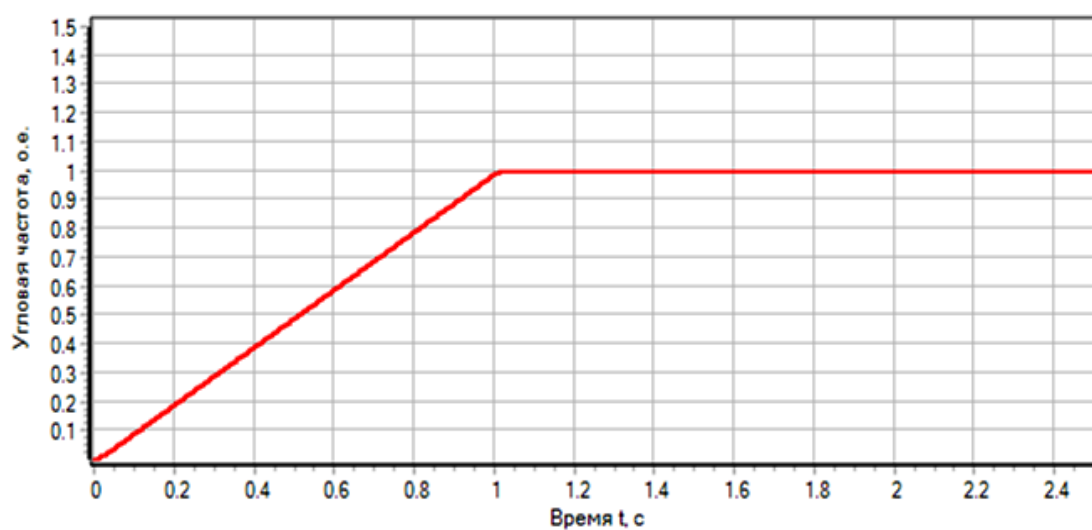


Рис. 4. Переходный процесс угловой частоты линейризованной модели АДФР

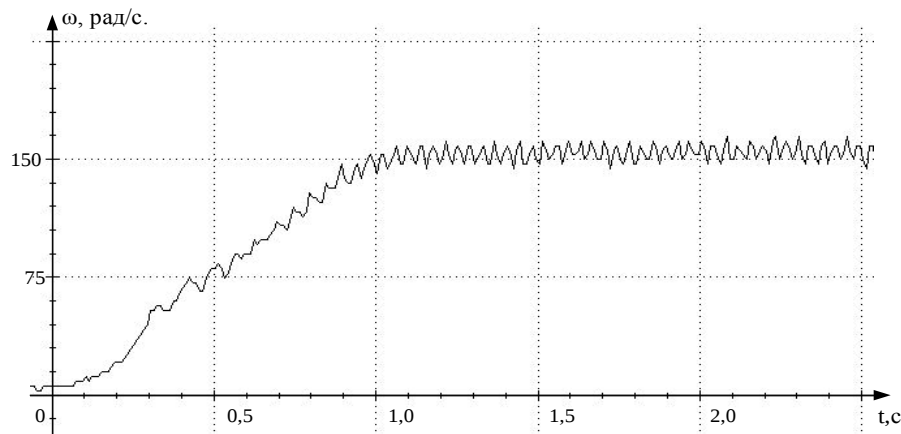


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса угловой частоты АДФР

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Москва: Высш. шк., 2001. 327 с.

2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

3. Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.

4. Доманов В.И., Мурзаков Д.Г., Халиуллов Д.С. Математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором в системе координат d-q // Вопросы электротехнологии. 2021. № 3.

5. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики: учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». Москва: Высш. шк., 1978. 336 с.

6. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 120 с.

7. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В.М. Терехова; 2-е изд. Москва: Изд. центр «Академия», 2006. 304 с.

8. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б.И. Копылова. Москва: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

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

Мурзаков Дмитрий Геннадьевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

Комаров Никита Евгеньевич – студент Ульяновского государственного технического университета

Viktor I. Domanov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Head: Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

Dmitrij G. Murzakov – Postgraduate, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

Nikita E. Komarov – Undergraduate, Ulyanovsk State Technical University

Статья поступила в редакцию 19.08.22, принята к опубликованию 03.09.22

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. 1/1246, главному 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 сокращенные слова, 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 к.филол.н. А.Х. Аскаровой

Адрес редакции (издателя, типографии):
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-88-72
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 23.09.2022 Дата выхода в свет 30.09.2022

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 10,25 Уч. изд. л. 4,3

Тираж 500 экз. Заказ 53 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ.

Адрес издателя: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2023 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ: *ПИ № ФС77-54621*
выдано Роскомнадзором от 01.07.2013

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Rendering: PhD (Philology) A.H. Askarova

Address of the editorial office (publisher, printing house):
77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-88-72
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 23.09.2022 Date of publication: 30.09.2022

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 10,25 Publication base sheet 4,3

Circulation: 500 printed copies. Order 53 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*

Issued by Roscomnadzor 01.07.2013