



ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

2024

№ 4 (45)



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника
 - 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
 - 2.4.4. Электротехнология и электрофизика
 - 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерения)
 - 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
-
- 2.4.1. Theoretical and Applied Electrical Engineering
 - 2.4.2. Electrical Complexes and Systems
 - 2.4.4. Electrotechnology and Electrophysics
 - 2.2.4. Measuring Instruments and Methods
 - 2.2.11. Information-Measuring and Control Systems

Издаётся с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 4 (45)
Декабрь 2024

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	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ 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

А.А. БАЗАРОВ	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
В.Г. ГОЛЬДШТЕЙН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
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
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., доцент 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

№ 4 (45)
December 2024

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

ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH

Dr. Sc., 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

Chief Executive Officer

MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA

Senior Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

A.A. BAZAROV

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

V.V. VAKHNINA

Dr. Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti

V.G. GOLDSTEIN

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

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

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., Associate 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 И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Базаров А.А., Полянский Е.А., Рогаткин Я.Е. Система плавки алюминиевого лома в индукционной тигельной печи при последовательной загрузке.....	5
Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б. Сравнение энергетических показателей излучательных электротехнологических установок при питании током сложной формы и током промышленной частоты.....	16
Дорошенко В.М., Никольская Е.В. Технологический процесс разработки газопоглотителей для генераторной лампы ГМИ-26Б	25
Коломейцев В.А., Дрогайцева О.В., Железняк А.Р., Бычков А.Ю. Достижение предельно допустимого уровня энергии электрического поля в диэлектрической пластине, расположенной на нижней стенке прямоугольного волновода	30
Зоркин А.Я., Родионов И.В., Вавилина Н.А. Нелинейная динамика лазерной наплавки титановых покрытий	40

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Дудник С.М., Звезденков К.А., Меркулова Т.А., Колыхаева М.В., Муратов И.В., Новиков Д.В., Харченко Д.А. Исследование возможно- сти замены материала оболочки кабельно- го изделия на основе полихлоропрена на современный материал с улучшенными эксплуатационными характеристиками	48
--	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Кучменко Н.А., Завалишин В.В. Анализ работы комплекса ДЭС с переменной скоростью вращения валов двигателей на общую нагрузку	55
Костюков В.Д., Крылов Г.А., Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Выбор параметров регуляторов элек- тромагнитного подшипника при сме- щении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора	62
Сошинов А.Г., Атрашенко О.С., Панасенко М.В. Техническое обслу- живание и ремонт под напряжением распределительных электрических сетей как фактор повышения надежности электроснабжения	71
Артюхов И.И., Николаев М.Д., Катунцев А.Г. Гибридная солнечно- дизельная система электропитания СВЧ-установки	84
К сведению авторов	91

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Bazarov A.A., Polyanskiy E.A., Rogatkin Ya.E. Aluminium scrap melting system in an induction crucible furnace with sequential loading	5
Ptitsyna E.V., Ptitsyn D.V., Kuvaldin A.B. Comparison of energy parameters of radiative electrotechnological devices supplied with complex waveform currents and industrial frequency currents.....	16
Doroshenko V.M., Nikolskaya E.V. Technological process of developing gas absorbers for the GMI-26B generator lamp	25
Kolomeytsev V.A., Drogaytseva O.V., Zheleznyak A.R., Bychkov A.Yu. Achievement of the maximum allowable level of electric field energy in the dielectric plate located on the bottom wall of a rectangular waveguide	30
Zorkin A.Ya., Rodionov I.V., Vavilina N.A. Nonlinear dynamics laser surfacing titanium coatings	40

THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

Dudnik S.M., Zvezdenkov K.A., Merkulova T.A., Muratov I.V., Kolykhaeva M.V., Novikov D.V., Kharchenko D.A. Modern insulation materials with improved electrical properties for polychloroprene sheathed cables	48
---	----

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Kuchmenko N.A., Zavalishin V.V. Analysis of diesel power plants with variable speed of the engine shaft rotation over the total load	55
Kostyukov V.D., Krylov G.A., Makarichev Yu.A., Starikov A.V. Selecting parameters of electromagnetic bearing regulators under displacement of the magnetic system center relative to the rotor rotation axis	62
Soshinov A.G., Atrashenko O.S., Panasenko M.V. Live-line repair and maintenance of power distribution networks as a factor for improving reliability of power supply	71
Artyukhov I.I., Nikolaev M.D., Katuntsev A.G. Hybrid solar-diesel power supply system for microwave installation.....	84
Information for Authors	91

УДК 621.365.52

СИСТЕМА ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВОГО ЛОМА В ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЗАГРУЗКЕ

А.А. Базаров, Е.А. Полянский, Я.Е. Рогаткин

ALUMINIUM SCRAP MELTING SYSTEM IN AN INDUCTION CRUCIBLE FURNACE WITH SEQUENTIAL LOADING

A.A. Bazarov, E.A. Polyanskiy, Ya.E. Rogatkin

В работе рассматривается индукционная тигельная печь для плавки лома алюминиевого сплава. Существующая установка имеет проблемы с определением и настройкой режима, обеспечивающего высокую производительность и надежность эксплуатации. Целью работы является исследование электрогидродинамических и тепловых процессов в расплаве при различных параметрах индуктора и определение лучшего соотношения расплавленного и твердого металла в загрузках, а также витковых данных индуктора при каждой операции загрузки. В качестве инструмента использованы численные модели электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов, реализованные в программной среде Comsol. Полученные диаграммы сил на боковой поверхности расплава и картины поля скоростей в расплаве показали области, где требуется скорректировать электромагнитные силы. Расчет тепловых процессов в тигле при разных соотношениях жидкого и твердого металла позволил определить время плавки и выявить граничные соотношения, при которых производительность установки значительно снижается. Проведенные исследования предназначены для совершенствования процесса плавки лома цветных металлов в металлургической промышленности. Выполненные расчеты позволяют

The paper considers an induction crucible furnace for melting aluminum alloy scrap. The existing installation has problems with determining and setting up a mode that ensures high productivity and reliability of operation. The purpose of the work is to study electrohydrodynamic and thermal processes in the melt at various inductor parameters and to determine the best ratio of molten and solid metal in the loads, as well as the inductor turn data for each loading operation. Numerical models of electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes implemented in the Comsol software environment are used as a tool. The obtained diagrams of forces on the lateral surface of the melt and the velocity field patterns in the melt showed the areas where it is necessary to adjust electromagnetic forces. Calculation of thermal processes in the crucible at different ratios of liquid and solid metal made it possible to determine the melting time and identify the boundary ratios at which the installation productivity is reduces significantly. The conducted studies are intended to improve the process of melting non-ferrous scrap metal in the metallurgical industry. The performed calculations make it possible to solve the problems of accelerating the production process and increasing reliability of equipment during operation.

решить задачи ускорения производственного процесса и повышения надежности оборудования при эксплуатации.

Ключевые слова: *тигельная печь, индуктор, расплав, электромагнитные, гидродинамические, тепловые процессы*

Введение

Индукционная тигельная печь используется для переплавки алюминиевых отходов и вторичного лома в производстве ленты, служащей сырьем для предприятий, изготавливающих банки для напитков. Рентабельность производства влияет на целесообразность такого способа производства. Важную роль играют энергозатраты и производительность установки, которые зависят от вида шихты и периодичности загрузки. Шихта представляет собой стружку, обрезки полосы прокатного производства, остатки прессового производства, бракованную продукцию, а также вторичный лом в виде спрессованных брикетов из банок. Расплавление такого сырья производится путем погружения в расплавленный алюминиевый сплав, оставшийся от предыдущей плавки. Такой подход позволяет использовать напряжение промышленной частоты, так как габариты тигля довольно велики и глубина проникновения тока гораздо меньше радиуса, что обеспечивает приемлемые энергетические показатели индуктора. Индукционная установка в составе комплекса ИАТ-6, содержит две секции, включенные встречно. Предусмотрена подстройка под изменяющиеся свойства загрузки при добавлении шихты. Необходимым условием работы установки является наличие сплошной проводящей среды во всем объеме загрузки, поэтому при многоэтапной загрузке шихты соблюдается правило расплавления добавленного твердого материала за счет теплосодержания имеющегося жидкого «болота». На стадии прогрева достигается повышение температуры до уровня, позволяющего повторить процедуру загрузки шихты. В процессе загрузки и последующего разогрева до заданной температуры порций шихты происходит изменение геометрических размеров

Keywords: *crucible furnace, inductor, melt, electromagnetic, hydrodynamic, thermal processes*

и свойств расплава. Работа источника питания должна происходить при условии регулирования напряжения и коэффициента мощности. Для этого система снабжена трансформатором с отпайками на первичной обмотке и двумя конденсаторными батареями для верхней и нижней секций индуктора. Батареи конденсаторов содержат несколько секций, подключаемых с помощью контакторов. Проблемой является коммутация больших токов, что сказывается на сроке службы отпайек трансформатора и контакторов контакторов.

Дополнительной проблемой является несимметричная загрузка секций индуктора. Нижняя секция всегда находится в более загруженном режиме, работая с более высоким электрическим коэффициентом полезного действия. Верхняя секция загружается постепенно. При первой загрузке шихты уровень расплава едва перекрывает нижний край катушки верхней секции. На этом этапе верхняя секция работает практически без загрузки. Это сказывается на коэффициенте полезного действия и непроизводительном расходе электроэнергии. Конструкция и схема подключения индуктора не предусматривают независимое регулирование напряжения и мощности секций.

Целью работы является исследование режимов работы индукционного нагревателя и повышение коэффициента загрузки для снижения непроизводительных затрат энергии.

Для расчета параметров индуктора необходимо использование численного метода. Кроме того, важно учитывать различные краевые эффекты, возникающие в отдельных областях загрузки. В качестве инструмента выбран программный комплекс Comsol, который построен на основе метода конечных элементов.

Формулировка

электромагнитной задачи

Для описания электромагнитных процессов в системе «индуктор – расплав» используется двухмерная осесимметричная модель электромагнитной задачи. Вопросы моделирования электромагнитных процессов рассмотрены в работах [1-3]. Геометрическая модель содержит загрузку, состоящую из комбинации твердых и жидких фрагментов (ограничены внутренней полостью тигля), двух катушек индуктора и окружающей среды.

Задача индукционного нагрева формулируется с использованием терминов векторного магнитного потенциала

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma\{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0. \quad (1)$$

К основному уравнению Пуассона (1) добавляются граничные условия на различных участках границы:

$$\{\bar{A}\} = 0 \text{ на } S_1; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2. \quad (3)$$

Выражение (2) задает значение магнитного потенциала на удаленной границе области. Выражение (3) описывает поведение функции на линии или поверхности, отражающей условия симметрии.

При моделировании в двухмерной области основное уравнение (1) после удаления неиспользуемых в данной задаче компонент принимает вид

$$j\omega\sigma\mathbf{A}_\varphi + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_\varphi) = \mathbf{J}_\varphi^e. \quad (4)$$

Здесь: σ – электропроводность; $\mathbf{A}_\varphi$ – векторный магнитный потенциал; $\mathbf{J}_\varphi^e$ – вектор источников (плотность тока); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

При обозначении приведенных величин плотности тока $\mathbf{J}_\varphi^e$ и векторного магнитного потенциала $\mathbf{A}_\varphi$ в выражении (4) использованы индексы, которые означают при-

надлежность осесимметричной модели (угловая координата φ), а также то, что источник тока является внешним (external).

В более полной постановке электромагнитной задачи фигурируют относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов, скорость перемещения загрузки относительно индуктора, источники магнитного поля, обусловленные наличием внешних полей. В конструкции индукционной установки ферромагнитные элементы не учтены, так как они расположены за пределами индуктора и служат для экранирования стягивающих и опорных элементов. В осесимметричной формулировке они не могут быть учтены, так как имеют малую протяженность по угловой координате. Из-за того, что данные элементы находятся в зоне полей рассеяния, их влияние на погрешность расчетов в расплаве невелико и ими можно пренебречь.

В тигле индуктора происходит перемешивание расплава за счет создания градиента электромагнитных сил по радиальной координате и по высоте. Это явление имеет положительное значение, так как способствует выравниванию распределения температуры во всем объеме. В то же время скорости движения расплава весьма невелики в сравнении с возможной (синхронной) скоростью (отличие в сотни раз). Это позволяет не учитывать влияние движения металла на ЭДС в катушке индуктора, связанную с движением загрузки.

Влияние внешних электромагнитных полей, например, возникающих при работе близкорасположенных индукционных установок, на электромагнитное поле индуктора и расплава незначительно, и им вполне обоснованно пренебрегаем. Влияние внешних полей на функционирование системы управления в данной работе не рассматривается.

При моделировании электропроводность материала загрузки принята постоянной, так как в расплавленном состоянии у алюминия, как и у других металлов, ее изменение незначительно.

Гидродинамические процессы в расплаве

Гидродинамические процессы, протекающие в расплаве тигельной печи, сложны для исследования. Это обусловлено тем, что к вычислительным проблемам добавляется воздействие электромагнитного поля, которое пронизывает толщу электропроводной жидкости. При постановке задачи гидродинамики приходится руководствоваться не только положениями теории [4, 5], но и опытом работы в данной области [6, 7]. Модель гидродинамического процесса выбирается исходя из режима движения жидкости. Для определения характера движения используется критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения сил инерции и внутреннего трения в потоке. При значении числа Рейнольдса меньше критического, равного 2300, вдоль поверхности боковой стенки слитка образуется тонкий ламинарный пограничный слой. Если же число Рейнольдса больше критического значения, то на начальном участке возле стенки, как и в первом случае, образуется ламинарный пограничный слой, но за пределами этого слоя создается турбулентный слой.

Критическому числу Рейнольдса соответствует критическая скорость течения жидкости в области с характерным размером d .

$$v_{kr} = 2300 \cdot \eta / d. \quad (5)$$

Для рассматриваемой задачи при значении динамической вязкости $\eta = 0,0014$ Па·с и диаметре тигля, равном 1,4 м, критическая скорость составляет 2,3 м/с. Это значение нежелательно ввиду отрицательного влияния движущегося металла на материал

футеровки. Но установившееся ламинарное движение расплава в областях с принудительным изменением направления движения не возникает. Поэтому в качестве модели используется один из вариантов модели турбулентного движения, $(k - \varepsilon)$ – модель, основанная на двух уравнениях, приведенных в работе [4]. В качестве упрощений приняты допущения о постоянстве температуры, что приводит к неизменности теплофизических свойств, и о постоянстве плотности расплава.

С учетом сказанного система уравнений [4] преобразуется к следующему виду:

– уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \quad (6)$$

– уравнение Навье – Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v}. \quad (7)$$

Здесь: $\mathbf{v}$ – вектор скорости.

Система уравнений (6) и (7), записанная для бесконечно малого объема жидкой среды, может быть решена при использовании численного метода с обоснованными допущениями.

Рассматриваемая $(k - \varepsilon)$ – модель состоит из двух уравнений: уравнение для кинетической энергии и турбулентности k и уравнение для ее диссипации ε .

С помощью этой модели описываются процессы зарождения переноса и рассеивания (диссипации) турбулентных вихрей с использованием турбулентной вязкости η_t , которая определяется в ходе решения задачи. Дифференциальные уравнения записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho \mathbf{v} k) = \text{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right) + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho \mathbf{v} \varepsilon) = \text{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(\varepsilon) \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}), \quad (9)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности с размерностью $[m^2/c^2]$; ε – диссипация энергии турбулентности (m^2/c^3); p – давление (Па); P_k – генерация энергии турбулентности;

P_{kb} и $P_{\varepsilon b}$ – слагаемые, учитывающие эффекты гравитации. В случае несжимаемой жидкости генерация энергии турбулентности определяется следующим образом:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (10)$$

В результате решения системы уравнений (12) и (13) находится распределение величин k и ε на расчетной области. Это позволяет определить значение турбулентной вязкости для каждого конечного элемента с помощью выражения

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (11)$$

В выражениях (10) и (11) содержатся эмпирические константы:

$$C_\mu = 0,09; \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44; \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92;$$

$$\sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Их значения получаются путем калибровки модели по серии натуральных экспериментов. Использование полуэмпирических моделей турбулентности предполагает калибровку, заключающуюся в подборе констант. По информации из литературных источников известно, что $(k - \varepsilon)$ модель турбулентности может быть хорошо настроена для развитых турбулентных потоков жидкости, что обеспечивает хорошую точность при описании свободного течения жидкости на достаточном удалении от твердых стенок. Одновременно указывается, что применение $(k - \varepsilon)$ модели турбулентности в задачах расчета движения жидкости возле твердых стенок имеет проблемы.

Уравнения (8) и (9) справедливы при $\mu_t > \mu$. Вблизи твердой поверхности это положение нарушается, так как вихри в этих областях затухают. Для учета затухания турбулентности возле стенки используются специальные пристенные функции, которые задают убывание тангенциальной составляющей скорости вдоль нормали к поверхности по логарифмическому закону. При использовании специальных пристенных функций осуществляется корректное задание граничных условий для k и ε на небольшом удалении от твердой поверхности

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (12)$$

На боковой поверхности потока (нижняя и боковая стенки тигля) задаются условия с логарифмической функцией стенки. В набор функций входит также выражение вида (16).

В стандартной системе гидродинамического процесса присутствуют участки входа и выхода потока жидкости. В рассматриваемой задаче система замкнутая, движение жидкости осуществляется в замкнутом объеме по сложным траекториям. Поэтому указанные границы входа и выхода отсутствуют. На всех поверхностях, включая верхнюю, задаются условия отсутствия движения (12). Формально на открытой поверхности расплава следует задавать величину давления. Однако особенность моделирования связанной электрогидродинамической задачи приводит к ограниченному выбору возможных граничных условий.

Приведенные дифференциальные уравнения для среды и граничных условий описывают математическую модель турбулентного движения жидкости, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов.

Формулировка тепловой задачи

Расчет температурного распределения в тигле производится при решении уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, найденной в результате решения электромагнитной задачи. Геометрическая модель тепловой задачи содержит тигель из теплоизолирующего материала и комбинированную загрузку, состоящую из твердой шихты и окружающего ее расплавленного металла.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве общей исходной модели температурного поля принято двухмерное нестационарное уравнение теплопроводности в осесимметричной постановке, формулируемое в декартовой системе координат [9]

$$\gamma C_P \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \gamma C_P \mathbf{v} \cdot \nabla T + Q; \quad (16)$$

с начальными $T(x, r, 0) = T_0(x, r)$ и граничными условиями

$$\lambda \nabla T = \alpha [T - T_c] + \varepsilon \sigma [T^4 - T_c^4]. \quad (17)$$

Здесь: $T(x, r, t)$ – температурное распределение в металле заготовки; T_c – температура окружающей среды; $C_p(x, r, t)$ – теплоемкость; $\lambda(x, r, t)$ – удельная теплопроводность; $\gamma(x, r, t)$ – плотность металла; α – коэффициент конвективного теплообмена; ε – степень черноты; σ – коэффициент излучения поверхности материала; Q – удельная мощность источников внутреннего тепловыделения; $\mathbf{v}$ – вектор скорости движения расплава.

Расчет теплового процесса производится с учетом изменения агрегатного состояния шихты. Для этого в зависимость теплоемкости от температуры добавлена локальная область со значительным увеличением уровня, позволяющая адекватно отразить возрастание энергии при расплавлении материала [9].

Теплообмен в системе, состоящей из загрузки и футеровки тигля, включает несколько видов: на открытой поверхности расплава и внутренней поверхности незаполненной части тигля имеют место теплообмен излучением и свободная конвекция с окружающей средой.

На внешней поверхности футеровки теплообмен с поверхностью водоохлаждаемого индуктора задается в виде температуры на границе соприкосновения. При этом температура индуктора принимается равной 50 °С.

Влияние гидродинамических процессов на перенос тепла и вещества внутри тигля в целом очень велико. В данной работе эти вопросы не рассматриваются, что приводит к определенной погрешности, учитывая, что одной из задач является определение времени полного расплавления твердой шихты, погруженной в расплав. При наличии твердых фрагментов вещества в тигле движение затруднено. При доведении расплава до заданного значения температуры и обеспечения равномерного распределения, несомненно, гидродинамические процессы нужно учитывать. В данной задаче при рас-

чете температуры используется упрощенный подход без расчета поля скорости в расплаве.

Совместное решение электромагнитной и тепловой задач в данных условиях является сложным, так как процесс расплавления или кристаллизации сопровождается плохой сходимостью и требует мелкой сетки. Поэтому используется подход с раздельным решением задач. На стадии решения электромагнитной задачи определяются области внутри загрузки, где происходит выделение тепла. Для тепловой задачи на основании полученной информации выполняется построение подобластей с внутренними источниками тепла.

В качестве материала в расчетах принят сплав Д16. При температуре 1000 К теплофизические свойства характеризуются следующими значениями: коэффициент теплопроводности $\lambda = 100,6$ Вт/(м·К); теплоемкость $C = 1176,7$ Дж/(кг·К); плотность $\gamma = 2350$ кг/м³. Температура плавления равна 810 К; теплота плавления $L = 380000$ Дж/кг [10].

Степень черноты ε определить сложно, так как в процессе нагрева незагрязненного примесями сплава величина изменяется от 0,04 до 0,055, но при загрузке лома металла это значение становится значительно больше. На поверхности расплава скапливается значительное количество шлака, что приводит к увеличению теплового потока излучения с поверхности. В расчетах принято значение $\varepsilon = 0,3$, позволяющее с небольшим запасом учесть потери в окружающую среду.

Динамическая вязкость расплавленного сплава составляет $\mu = 1,4 \cdot 10^{-3}$ Па·с при $T = 1073$ К; удельное электрическое сопротивление $\rho = 24,77 \cdot 10^{-8}$ Ом·м при $T = 933$ К.

Результаты

Моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов

В результате расчетов определены значения сил, приложенных к секциям индуктора и к расплаву при заданных токах в секциях индуктора при разных значениях высоты расплава (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные значения токов и сил в расплаве и секциях индуктора

№	I_{C1} , кА	I_{C2} , кА	P_{Al} , кВт	F_{Al}^z , Н	F_{Al}^r , Н	F_{C1}^r , Н	F_{C2}^r , Н	F_{C1}^z , Н	F_{C2}^z , Н
1	40,5	–	21,6	–51	–1283	1737	–	59	–
2	40,5	40,5	33,6	–168	–1944	1417	1330	–290	476

В табл. 1 обозначены: I_{C1} , I_{C2} – токи верхней и нижней секций индуктора; P_{Al} – мощность тепловыделения в расплаве; F_{Al}^z , F_{Al}^r – интегральные значения вертикальной и горизонтальной составляющей сил в расплаве; F_{C1}^r , F_{C2}^r , F_{C1}^z , F_{C2}^z – горизонтальные и вертикальные составляющие ин-

тегральных сил, действующих на нижнюю и верхнюю секции катушки индуктора.

Сложный характер взаимодействия токов в секциях индуктора и в расплаве отражается на формальном несовпадении интегральных значений в расплаве и индукторе.

Диаграммы распределенных отталкивающих сил на поверхности расплава представлены на рис. 1.

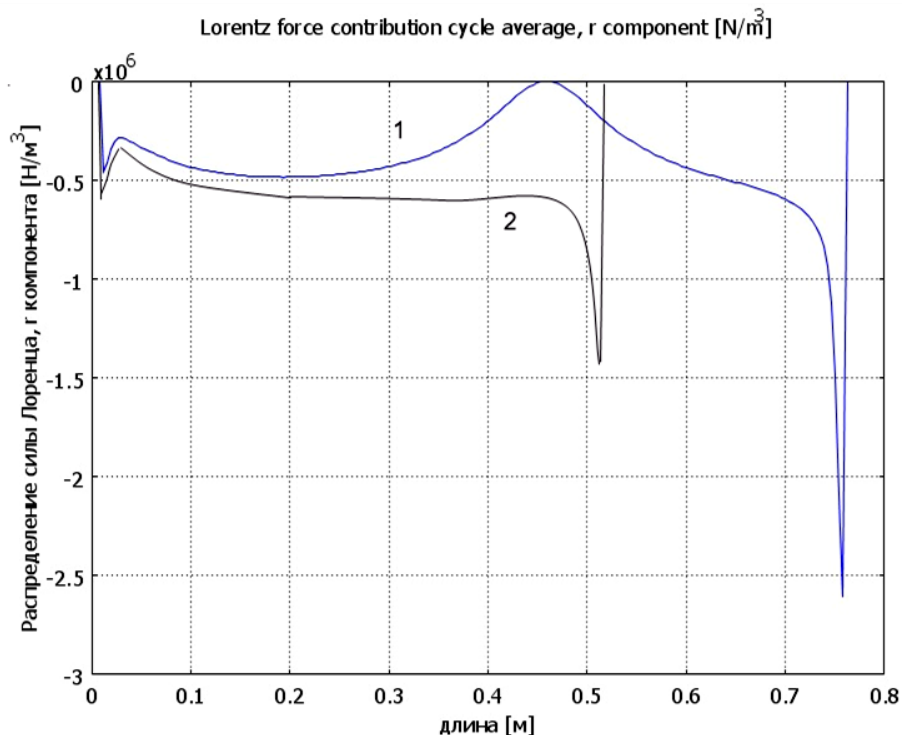


Рис. 1. Диаграмма r -компоненты силы Лоренца на боковой поверхности расплава: 1 – для полностью заполненного тигля; 2 – для заполненного наполовину тигля

Как видно из рис. 1 (кривая 1), в верхней области расплава наблюдается сильный краевой эффект, что обусловлено наличием дополнительных витков в верхней секции. В случаях как наполовину загруженного, так и полностью загруженного тигля высота индуктора превышает высоту загрузки. При включении второй секции в случае более полной загрузки на диаграмме 1 на рис.

2 наблюдается провал, обусловленный встречным включением секций. В то же время, из-за неполной загрузки верхней области тигля сила Лоренца имеет гораздо большее значение на верхнем краю.

На рис. 2, 3 показаны поля скоростей в расплаве для наполовину загруженного тигля (рис. 2) и для полностью загруженного тигля (рис. 3). Из особенностей полей

скорости можно отметить четкие области вихрей, соответствующие высоте секций индуктора. В верхнем углу расплава наблюдаются области с более интенсивным

движением расплава. Последний факт имеет отрицательное значение, так как увеличение скорости приводит к ускорению разрушения тигля.

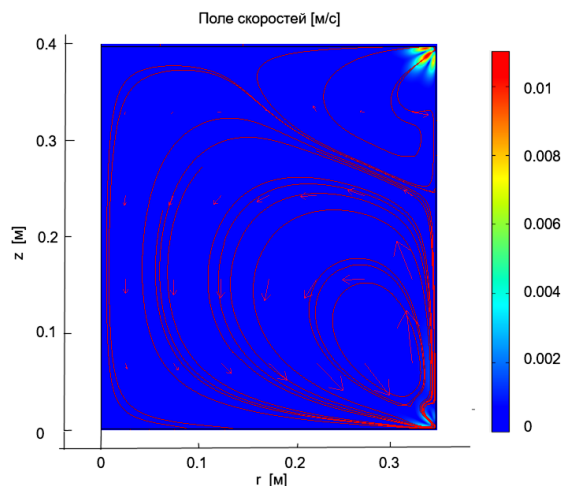


Рис. 2. Поле скоростей в расплаве заполненного наполовину тигля

Расчет тепловых процессов

Процесс загрузки шихты в тигель, содержащий расплавленный металл, протекает случайным образом. Сложно распределить куски шихты равномерно по объему. Для упрощения процесса вся загрузка представлена в виде прямоугольных блоков, являющихся холодными кусками, в общем объеме жидкого металла.

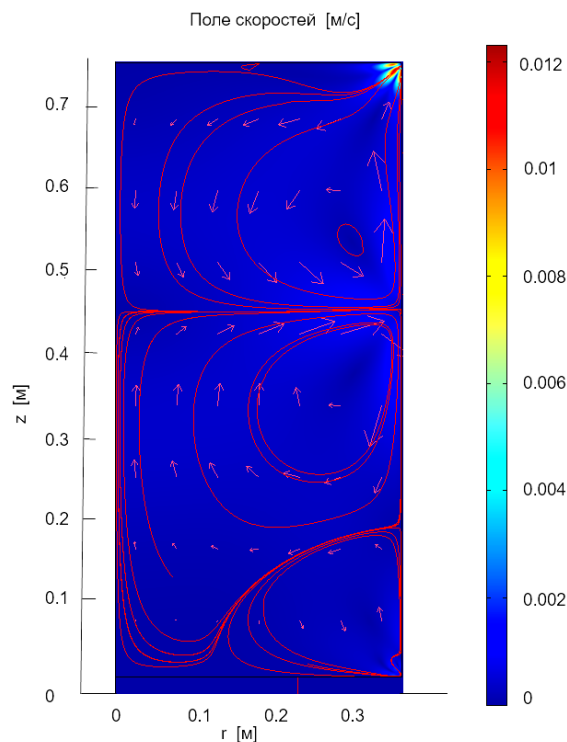


Рис. 3. Поле скоростей в расплаве заполненного тигля

Расчет проведен для загрузки, состоящей из комбинации твердой и жидкой составляющих. После погружения шихты в «болото» происходит ее разогрев и расплавление. Мощности определены заранее при решении электромагнитной задачи. Ввиду того, что процесс плавления отличается значительной нелинейностью, объединять его с электромагнитным процессом нецелесообразно. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета тепловых процессов в тигле

№	H_p , м	V_p , м ³	P_p , кВт	m , кг	V_m , м ³	$V_{жс}$, м ³	$V_{жс} / V_m$	$\int T dV$	$T_{ср}$, К	t_n , с
1	0,98	1,55	190	4188	0,553	0,998	2,633	1501	968	9500
2	0,94	1,488	182	4017	0,495	0,993	2,295	1565	1051	4500
3	0,91	1,44	176	3889	0,437	1,003	2,006	1541	1070	3000
4	0,87	1,377	168	3718	0,379	0,998	1,8	1433	1041	2500
5	0,98	1,55	190	4188	1,55	-				32000
6	1,44	2,23	443	6156	2,23	-				23000

В табл. 2 обозначены: H_p – высота расплава; V_p – объем расплава; m – масса расплава; V_m – объем твердого металла (шихта); $V_{жс}$ – объем жидкого металла.

Определение средней температуры при окончании нагрева выполнено посредством расчета интеграла температуры в объеме расплава с последующим делением на величину объема.

Расчеты выполнены при отсутствии перемешивания расплава. Это в начале расплавления шихты не так существенно, так как твердые фрагменты препятствуют циркуляции жидкой фазы. Более важным становится перемешивание при завершении этапа для получения равномерного распределения.

Для вариантов расчета 1-4 начальная температура расплава равна 1070 К, шихты – 273 К. Конечное значение увеличившегося объема расплава составляет 1070 К с некоторыми отклонениями.

Моделирование процесса плавки при загрузке одинакового количества шихты в разные объем расплава показало вполне объяснимый факт более быстрого расплавления и доведения до нужного значения конечной температуры. Конечно, соотношение объемов шихты и расплава при каждой загрузке ограничивается видом шихты.

При более рыхлой структуре шихта просто не помещается в тигель.

Для вариантов № 5 и 6 расчет выполнен для загрузки, имеющей начальную температуру, равную 273 К. Определено время нагрева с учетом расплавления: для варианта № 5 время нагрева составляет 31000 с; для варианта 6 время расплавления составляет 22500 с.

По результатам расчета температурных распределений для 5 и 6 вариантов построены временные диаграммы температуры в точках с максимальным и минимальным значениями (рис. 4, 5). На диаграммах виден четкий переход через точку плавления. Для вариантов 1-4 временные диаграммы температуры не так наглядны. При засыпке холодной шихты температура резко снижается до значения, близкого к температуре плавления, и затем медленно нарастает.

Расчеты процесса плавки показали, что плавка с многократной загрузкой шихты позволяет сократить суммарное время по сравнению с периодической загрузкой. Соотношение объемов жидкой и твердой составляющих в пользу жидкой фазы позволяет сократить общее время плавки, что улучшает эффективность использования технологического оборудования.

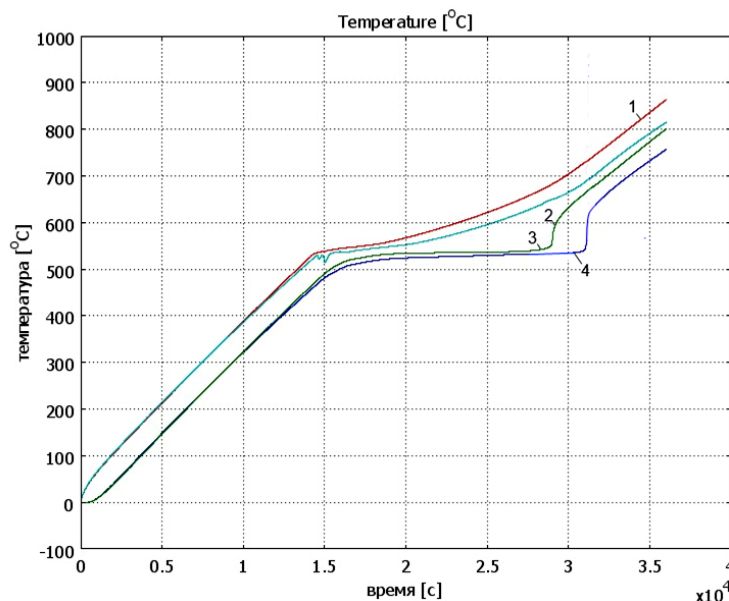


Рис. 4. Диаграммы температуры в расплаве высотой 0,98 м, разогрев из холодного состояния в точках: 1 – $r = 0,7$ м; $z = 0,235$ м; 2 – $r = 0,7$ м; $z = 1,2$ м; 3 – $r = 0$; $z = 0,235$ м; 4 – $r = 0$; $z = 1,2$ м

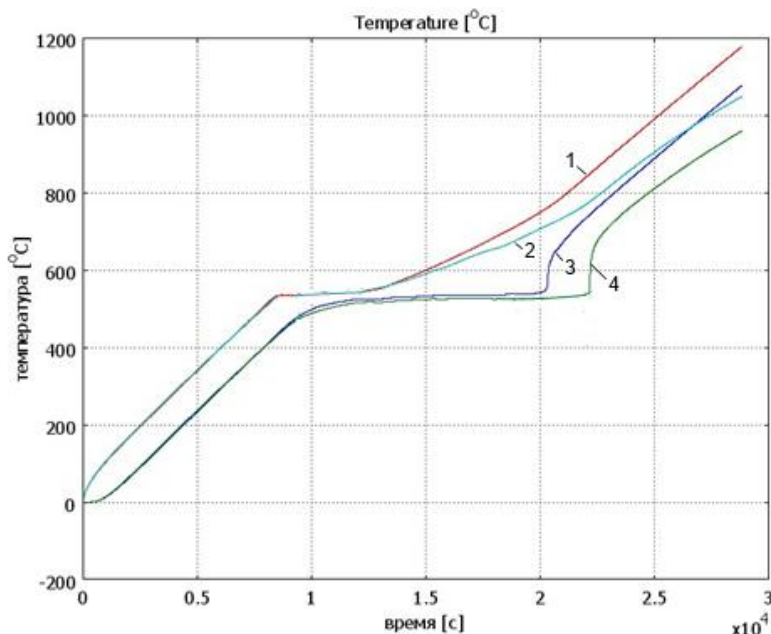


Рис. 5. Диаграммы температуры в расплаве высотой 1.44 м, разогрев из холодного состояния в точках:
 1 – $r = 0,7$ м; $z = 0,235$ м; 2 – $r = 0,7$ м; $z = 1,62$ м; 3 – $r = 0$; $z = 0,235$ м; 4 – $r = 0$; $z = 1,62$ м

Нагрев при малом соотношении жидкого и твердого металла приводит к увеличению длительности процесса плавки. В первом варианте после загрузки шихты часть жидкого металла затвердевает. Требуется гораздо больше времени на расплавление и подогрев до заданного значения.

Заключение

Рассмотрены электрогидродинамические и тепловые процессы в индукционной плавильной тигельной установке. Анализ гидродинамических процессов показал необходимость выбора высоты индуктора в соответствии с объемом рас-

плава при каждой последующей загрузке шихты. Необходимо изменять число витков верхней секции для управления краевым эффектом и для обеспечения приемлемой скорости движения расплава в верхней зоне.

Тепловые процессы при плавке шихты протекают в режиме быстрого разогрева до температуры плавления твердых элементов, их расплавления и увеличения температуры до требуемого значения. Определено граничное соотношение твердого и жидкого компонентов расплава, при которой дальнейшее увеличение твердой составляющей серьезно снижает производительность установки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э. Электромагнитная модель многофазной индукционной тигельной печи с кусковой загрузкой // Электротехника. 2013. № 3. С. 55-61.

2. Кувалдин А.Б., Федин М.А., Перов Р.И. Исследование электрических параметров индукционной тигельной печи при плавке кусковой шихты // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XIII Междунар. науч.-практ. интернет-

конф. ГУ «Орловский региональный центр Энергосбережения». Орел: ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», 2015. С. 69-72.

3. Тригорлый С.В., Яковлев А.С. Математическое моделирование электрогидродинамических и тепловых процессов в индукционной установке // Технологии и управление в промышленности: сборник трудов I Междунар. науч.-практ. конф. Са-

ратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2020. С. 241-243

4. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2. Москва: Мир, 1991.

5. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 292 с.

6. Хацаюк М.Ю., Сизганов Н.В. Численное моделирование формы мениска расплава в индукционной тигельной печи с использованием открытого программного обеспечения // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. Красноярск, 2020. Т. 13. № 4. С. 487-494.

7. Усков И.А., Фризен В.Э., Швыдкий Е.Л. Исследование характера движения металла при несимметричной компенсации реактивной мощности многосекци-

онной индукционной тигельной печи // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: сборник трудов конференции. Севастополь, 15-19 сентября 2015 года. Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2015. С. 122-125.

8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967. 599 с.

9. Базаров А.А., Навасардян А.А., Бондарева Н.В. Конструкция электромагнитного кристаллизатора алюминия периодического действия // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2021. Т. 29. № 2. С. 100-116.

10. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технологии, применение): справочник / под общ. ред. академика РАН И.Н. Фридляндера. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.

Базаров Александр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Полянский Евгений Анатольевич – аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета

Рогаткин Ярослав Евгеньевич – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Alexander A. Bazarov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Industrial Enterprise Power Supply Systems, Samara State Technical University

Eugene A. Polyansky – Postgraduate Student, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

Yaroslav E. Rogatkin – Postgraduate Student, Department of Industrial Enterprise Power Supply Systems, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 29.10.24, принята к опубликованию 26.11.24

УДК: 621.3

**СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
И ТОКОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

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

**COMPARISON OF ENERGY PARAMETERS
OF RADIATIVE ELECTROTECHNOLOGICAL DEVICES
SUPPLIED WITH COMPLEX WAVEFORM CURRENTS
AND INDUSTRIAL FREQUENCY CURRENTS**

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

В работе исследован энергетический баланс в излучательных электротехнологических установках с разными типами излучателей для питания переменным током 50 Гц и ТСФ. Показано, что применение тока сложной формы для питания излучателей позволяет снизить потери мощности в трансформаторе за счет работы на более низкой ступени РПН по сравнению с питанием синусоидальным током промышленной частоты, а применение различных значений токов подмагничивания снизить потери активной мощности в ДН, и обуславливает снижение потерь мощности в излучателе при одновременном воздействии температурной и электромагнитной составляющих.

Ключевые слова: излучательная электротехнологическая установка (ИЭТУ), светлые излучатели, трансформатор, дроссель насыщения (ДН), ток сложной формы (ТСФ), энергетический баланс

Введение

На значения показателей энергоэффективности излучательных электротехнологических установок (ИЭТУ) можно влиять путем повышения КПД [1-2], и за счет снижения удельного расхода электроэнергии,

The work deals with investigation of the energy balance in radiative electrotechnological devices with various types of emitters to provide the alternating current of 50 Hz and complex waveform currents. It is shown that the use of a complex-shaped current to feed the radiators reduces the power losses in the transformer due to operation of the load-based voltage control at a lower stage compared to power supply with a sinusoidal current of industrial frequency, whereas the use of different values of magnetization currents reduces active power losses in the saturation reactor. This determines a reduction of power losses in the emitter under simultaneous effect of the temperature and electromagnetic processes.

Keywords: radiative electrotechnological device, light emitters, transformer, saturation reactor, complex waveform currents, energy balance

как например, в газоразрядных ЭТУ [3]. Следует напомнить, что в энергетическом балансе ИЭТУ параметрами энергоэффективности являются КПД излучателей, а также КПД и коэффициент мощности установок, которые характеризуют потери мощно-

сти в инфракрасных излучателях, а также потери активной мощности в элементах оборудования источников питания (ИП): в силовом трансформаторе с устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН); в дросселях насыщения (ДН). Последние обычно используются в ИП ЭТУ для плавного регулирования напряжения в пределах ступени РПН (в газоразрядных электротехнологических ЭТУ может использоваться до 80 ступеней). Основными элементами конструкции трансформаторов и ДН являются сердечник из магнитных материалов и обмотки [1-3]. В [3, 4] показано, что в электролизных, газоразрядных и др. электротехнологических установках для получения позитивных технологических и энергетических эффектов используются разные пути совершенствования: автоматизация, механизация, применение новых конструкций установок и используемых материалов, совершенствование электрических режимов. Последнее можно реализовать за счет снижения токов утечек (потерь в элементах оборудования источников питания) [5, 6], или использования тока сложной формы. При этом род тока и полярность, применяемые в электротехнологических установках, различные: переменный ток промышленной частоты; постоянный ток; выпрямленный ток с регулированием переменной составляющей; импульсный ток (униполярные импульсы с разной длительностью и скважностью и др.), переменный ток средних, высоких и сверхвысоких частот и зависят от технологического процесса и особенностей исполнения ИП [4].

В [7] предложена методика экспериментальных исследований потерь активной мощности в излучателях разных типов ИЭТУ, разработано оборудование экспериментального стенда для исследований энергетических характеристик излучателей, выбраны приборы.

Экспериментально установлено, что при потреблении излучателем одинаковой активной мощности, режим с питанием ТСФ обеспечивает большую мощность потока излучения $P_{изл}$, на облучаемой поверхности на 12 %. Это свидетельствует о повышении

коэффициента полезного действия (КПД) излучателей в ИЭТУ [7].

В [4] исследована возможность снижения потерь в элементах оборудования ИП ЭТУ. Например, известны результаты исследований потерь активной мощности в обмотках мощных дросселей насыщения (ДН) типа ДН-6300/26 преобразовательных агрегатов типов ВАКВ (ВАКД) электролизных и газоразрядных ЭТУ. Модернизация ДН позволила снизить сопротивление рабочей обмотки (падение напряжения в три раза при максимальном токе подмагничивания), расширить диапазон регулирования тока в обмотке подмагничивания, уменьшить потери активной мощности в рабочей обмотке. В [8] установлено изменение потерь в магнитопроводе ДН от используемых материалов и частоты.

В настоящей работе уделено внимание исследованию следующих важных моментов:

- определению и сравнению потерь энергии в излучательной электротехнологической установке в режимах при питании переменным током 50 Гц и током сложной формы при условии одинаковой активной мощности, потребляемой из сети;

- оценке плотности потока излучения, то есть его части, попадающей на облучаемую поверхность, что позволяет сравнивать разные режимы: режим с питанием переменным током 50 Гц и током сложной формы. Исследования выполнены для тока сложной формы (ТСФ1, ТСФ2 и др.).

Исследование плотности потока излучения выполнено в функции расстояния между излучателем и облучаемой поверхностью: при их размещении на удалении 240 и 480 мм от горизонтальной поверхности. Указанные выше расстояния обусловлены габаритными размерами боковых поверхностей стандартных коробок из гофрированного картона для структурирования площади обогрева. Выполнен расчет мощности потока излучения на горизонтальной облучаемой поверхности (или для вертикального расположения излучателей исследована мощность потока излучения на животноводческих фермах).

Для исследования потерь активной мощности в элементах ИЭТУ: в силовом трансформаторе, ДН, излучателе от электрических режимов необходимо было разработать методику исследований энергетических характеристик, разработать стенд, выбрать измерительные приборы.

Цель работы: повышение КПД излучательных электротехнологических установок с разными типами излучателей на основе исследования электрических режимов при питании переменным током 50 Гц и током сложной формы.

Оборудование и методика исследования

Исследования выполнялись на модельных устройствах. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования энергетических характеристик излучательной электротехнологической установки для режимов с питанием током 50 Гц

и током сложной формы приведена на рис. 1. Обозначения, принятые на рис. 1: Тр – однофазный трансформатор типа ОСМ1 1,6 кВА; ДН – дроссель насыщения; Изл – пять светлых излучателей типа ИКЗ мощностью по 250 Вт; АК – анализатор качества электрической энергии ANALYST 2060; С – спектрометр AvaSpec-US.

Настоящая работа является продолжением ранее выполненных исследований в [7]. В представленной работе питание ИЭТУ реализовано от сети 220 В через однофазный трансформатор типа ОСМ1 мощностью 1,6 кВА 220/220 В с переключением ступеней напряжения и ДН с регулированием тока подмагничивания. Коэффициент загрузки трансформатора при этом составил 0,8. В работе выполнены исследования параметров ИЭТУ для режимов работы: 50 Гц и ТСФ с диапазоном регулирования значений тока подмагничивания от 0,1 до 0,4 А дросселя насыщения.

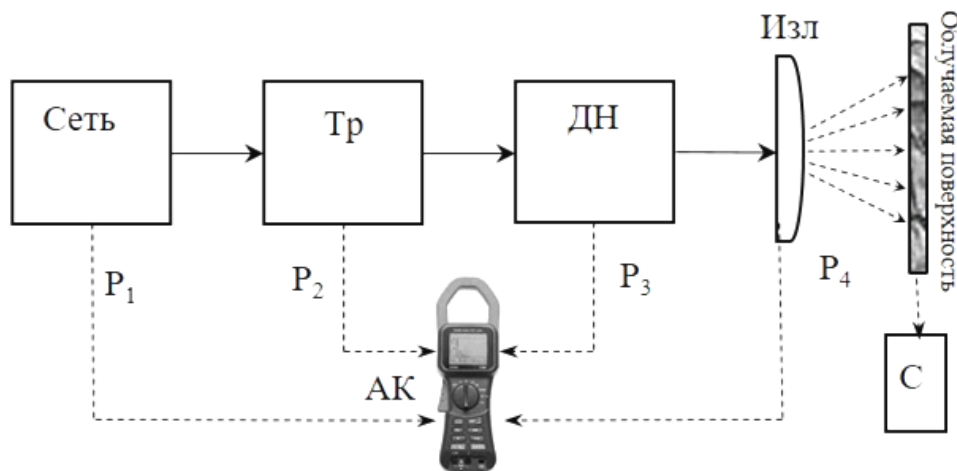


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования энергетических характеристик

В схеме предусматривалось регулирование напряжения устройством РПН трансформатора и гармонического состава ТСФ путем изменения тока подмагничивания ДН. В качестве излучателя была выбрана инфракрасная зеркальная лампа ИКЗ мощностью 250 Вт, которая применяется для обогрева и освещения в животноводстве, птицеводстве и растениеводстве.

Для измерений значений мощности в различных точках схемы использовался

анализатор качества электрической энергии ANALYST 2060.

Плотность мощности потока излучения измерялась с помощью спектрометра AvaSpec-USL.

Напряжение на излучателях в исследуемых режимах было 220 В. В экспериментах поддерживали одинаковое значение активной мощности, потребляемой из сети.

Как показано в [7], проводилось измерение активной мощности, потребляемой

из сети, мощности на выходе питающего трансформатора (P_1 и P_2) и мощности на выходе дросселя насыщения (P_3), мощности потока излучения на облучаемой поверхности (P_4) и мощности потока излучения вне облучаемой поверхности (P_5) в исследуемых режимах при ТСФ с разным подмагничиванием и токе 50 Гц. Затем определили составляющие потерь в ИЭТУ с последующим их сравнением для исследуемых электрических режимов по выражениям вида:

– потери в трансформаторе

$$P_{mp} = P_1 - P_2;$$

– потери в дросселе насыщения

$$P_{дн} = P_2 - P_3;$$

– потери мощности в излучателях

$$P_{изл} = P_3 - P_4.$$

Экспериментальные исследования.

Выбор ТСФ

Исследования потерь в трансформаторе, ДН, излучателе проводили для электриче-

ских режимов при питании ИЭТУ переменным током 50 Гц и током сложной формы с разными значениями тока подмагничивания. На рис. 2 и 3 представлены, соответственно, осциллограммы формы питающего напряжения (тока) при токе подмагничивания ДН 0,1 А ($0,2 I_{н.макс}$) – ТСФ1 и 0,2 А ($0,4 I_{н.макс}$) – ТСФ2, а также спектры и параметры исследуемых токов. Например, состав и амплитуды гармоник для ТСФ2 равны: 50 Гц – 100 %; 100 Гц – 0 %; 150 Гц – 35 %; 250 Гц – 85 %; 350 Гц – 15 %; 450 – 10 %; 550 – 5 %; 650 – 5 %; 750 – 5 %. На рис. 4 и 5, соответственно, показаны осциллограммы форм питающего напряжения при токе подмагничивания ДН 0,3 А ($0,6 I_{н.макс}$) – ТСФ3 и 0,4 А ($0,8 I_{н.макс}$) – ТСФ4, а также их спектры.

Энергетические показатели ИЭТУ со светлыми излучателями (СИ) типа ИКЗ суммарной мощностью 1250 Вт в исследуемых режимах даны в табл. 1.

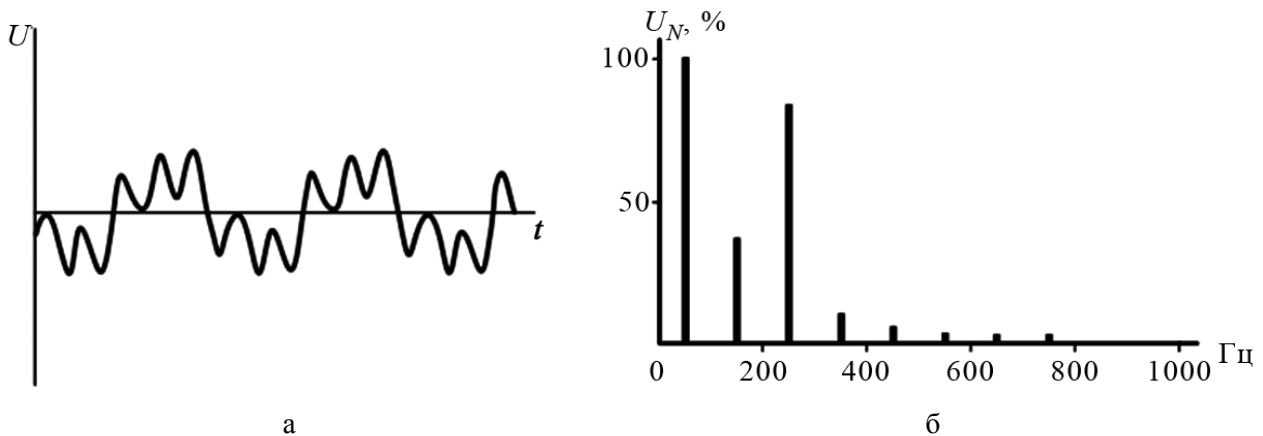


Рис. 2. Осциллограмма ТСФ1 (а) и спектр напряжения ДН (б) при токе подмагничивания $0,2 I_{н.макс}$

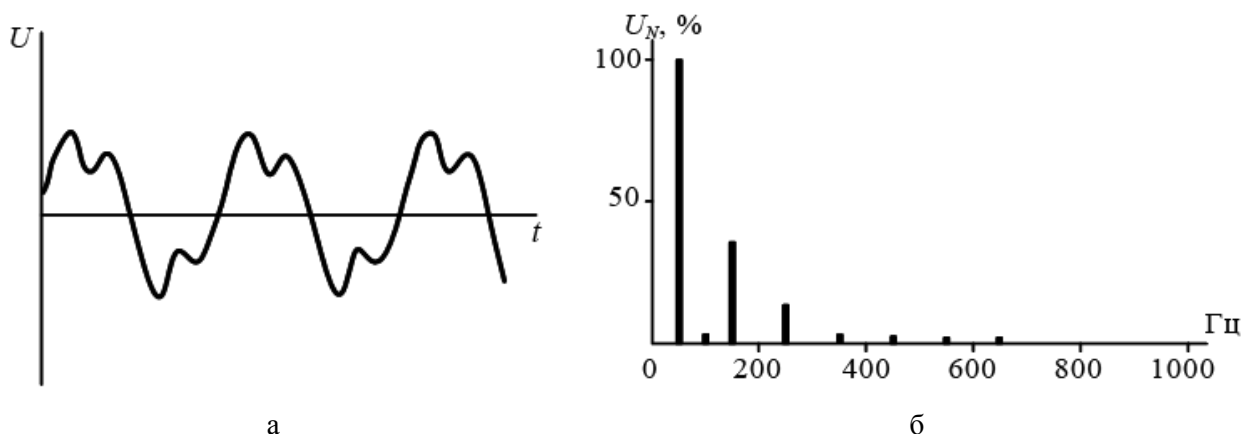


Рис. 3. Осциллограмма ТСФ 2 (а) и спектр напряжения ДН (б) при токе подмагничивания $0,4 I_{н.макс}$

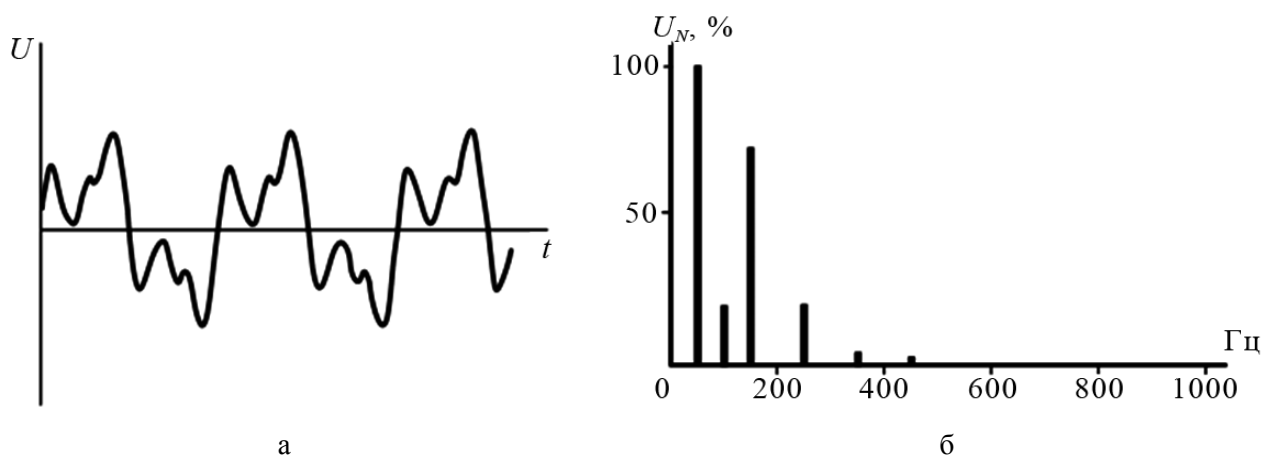


Рис. 4. Осциллограмма ТСФ (а) и (б) спектр напряжения при токе подмагничивания $0,6 I_{n,max}$

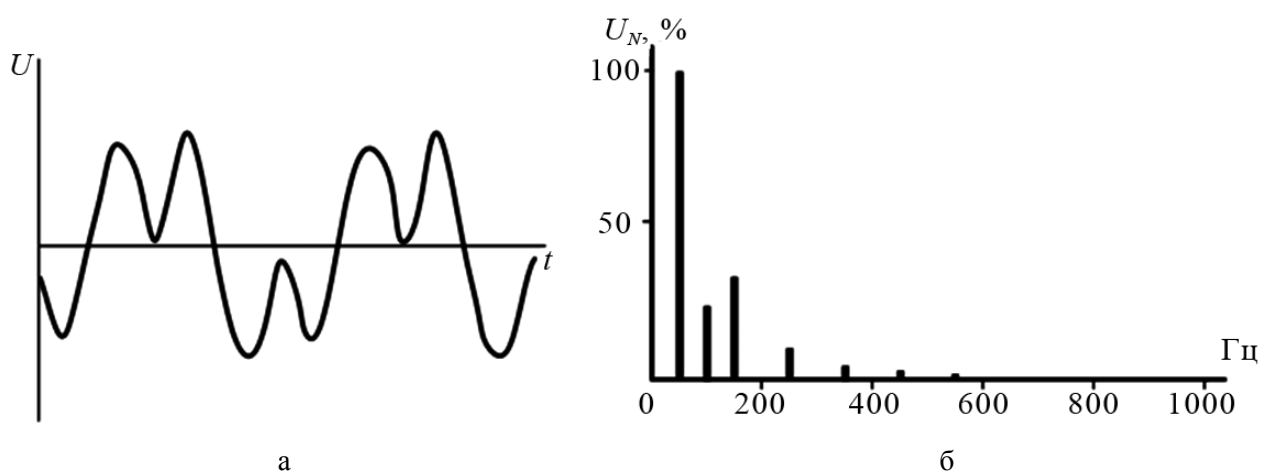


Рис. 5. Осциллограмма ТСФ (а) и (б) спектр напряжения при токе подмагничивания $0,8 I_{n,max}$

Таблица 1 – Энергетический баланс ИЭТУ с пятью СИ
общей мощностью 1250 Вт при $h = 240$ мм

Электрический режим	$P_{тр}$, Вт	$P_{дн}$, Вт	$P_{н.изл}$, Вт	I_n , о.е.	$P_{изл}$, Вт
Ток 50 Гц	21	-	1154	-	22,99
ТСФ1	11	10	1154	$0,2 I_{n,max}$	24,2
ТСФ2	11	9,0	1154	$0,4 I_{n,max}$	26,1

Для исследования плотности потока излучения в ИЭТУ со светлым излучателем в указанных выше режимах, использована методика, разработанная и изложенная в [7]. Радиометрический датчик спектрометра устанавливался также на расстоянии 240 мм и 480 мм от центра излучателя. В проведенных экспериментах датчик перемещался по горизонтальной оси. На облучаемой поверхности зрительно выделяли кольца одинаковой освещенности и отме-

чали точки внутреннего и внешнего радиуса: точки радиуса r колец на расстоянии 5, 83, 123, 182 и 240 мм от центра. Эскиз облучаемой поверхности и направление перемещения датчика показаны на рис. 4 [7], там же дано расположение точек на облучаемой поверхности.

Результаты экспериментов

Исследованиями установлено влияние электрических режимов ИЭТУ на величину

потерь мощности в трансформаторах, ДН, излучателях. Снижение потерь мощности в указанных элементах оборудования ИП позволяет говорить о повышении КПД ИЭТУ.

Мощность из сети поддерживали постоянной. В режиме с переменным током частотой 50 Гц активная мощность, потребляемая из сети, составила 1175 Вт. Она покрывает потери в трансформаторе 21 Вт и потери в излучателях. В трансформаторе $P_{тр}$, Вт потери мощности составляют не более 1 % (см. рис. 3). Излучатели потребляют 1154 Вт ($P_{н-изл}$). На выходе излучателей ($I_{эл}$) формируется поток излучения, направляемый к нагреваемому изделию (или облучаемой поверхности (ОП)). На мощность потока излучения в режиме при токе 50 Гц $P_{изл}$ приходится порядка 23 Вт. В [6] показана целесообразность применения гармонических составляющих тока для воздействия на энергетические характеристики излучателей. Оценка составляющих энергетического баланса на примере ИЭТУ со СИ 1250 Вт при питании ТСФ1 дана на рис. 6. Активная мощность из сети 1175 Вт, а потери, соответственно, 11 Вт, 9 Вт и 1154 Вт. При ТСФ2 мощность потока излучения составила 26,1 Вт, то есть 2,3 %.

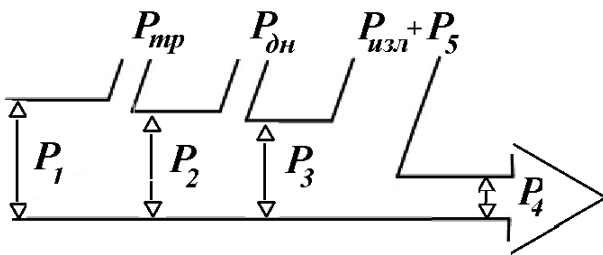


Рис. 6. Энергетический баланс ИЭТУ со СИ

Подтверждены результаты, изложенные в [4, 7, 8]: потери мощности в трансформаторе $P_{тр}$ в режиме с ТСФ снижаются за счет работы трансформатора на более низкой ступени РПН, меньшего потребления тока из сети, снижения суммарной индуктивности обмоток трансформатора при уменьшении полей рассеяния и составляют порядка 1 %.

В работе исследована плотность потока излучения в ИЭТУ для различных электрических режимов. При помощи программного продукта Microsoft Excel выполнена статистическая обработка результатов экспериментов. Границы доверительного интервала (величину абсолютной ошибки) определяли с учетом коэффициента Стьюдента, который соответствует максимальному отклонению среднего арифметического от истинного значения, для доверительной вероятности 0,95 и с учетом числа выполненных повторений экспериментов. Плотность потока излучения дана в табл. 2 и на рис. 7 а и б при высоте подвеса излучателя $h = 480$ мм и $h = 240$ мм. Доверительный интервал плотности потока излучения, мкВт/см², например, для тока 50 Гц при $r = 0$ см [7880; 7725], для ТСФ1 при $r = 0$ см [7797; 7953], для ТСФ2 при $r = 0$ см [8029; 7871]. Значения мощности излучения для разных режимов работы ИЭТУ представлены в табл. 3. Доказано экспериментально, что, изменяя высоту подвеса светильников и электрический режим, можно менять мощность излучения.

Таблица 2 – Результаты измерений плотности потока излучения (p , мкВт/см²) светлого излучателя на облучаемой поверхности в исследуемых режимах работы излучателя

$h = 480$ мм			
r , см	50 Гц	ТСФ1	ТСФ2
	p , мкВт/см ²		
0	7803	7875	7950
5	7100	7400	7600
8,3	6600	6900	7200
12,3	6200	6500	6800
18,7	5800	6100	6350
24	5000	5300	5500

Таблица 3 – Результаты исследования мощности излучения светлого излучателя на облучаемой поверхности в исследуемых режимах работы

Режимы	r , см					P , Вт
	0-5	5-8,3	8,3-12,3	12,3-18,7	18,7-24	
	P_i , Вт					
50 Гц	0,58	0,92	1,60	3,68	3,84	10,61
ТСФ 1	0,62	1,05	1,88	4,24	4,19	11,97
ТСФ 2	0,62	1,06	1,90	4,30	4,30	12,17

Основные результаты работы

Создан стенд для проведения экспериментальных исследований и разработана методика проведения экспериментов для оценки энергетической эффективности применения питания ТСФ в ИЭТУ по сравнению с синусоидальным током 50 Гц.

Определение и сравнение потерь энергии в излучательной ЭТУ в исследуемых режимах при условии одинаковой активной мощности, потребляемой из сети, изменяются. Исследования показали, что, изменяя режим питания излучателей в ИЭТУ, можно снижать потери активной мощности при ра-

боте трансформатора на более низкой ступени РПН, в ДН – при регулировании тока подмагничивания, в излучателях, при воздействии на протекающие процессы электромагнитной составляющей наряду с температурной, что обуславливает повышение КПД ИЭТУ. Наиболее эффективным является режим с питанием ТСФ2 позволяя при изменении подмагничивания ДН и высоты подвеса излучателей в ИЭТУ получать более равномерный обогрев при снижении потерь в элементах оборудования, то есть дает наиболее существенные изменения по эффективности работы ИЭТУ [4, 7, 8].

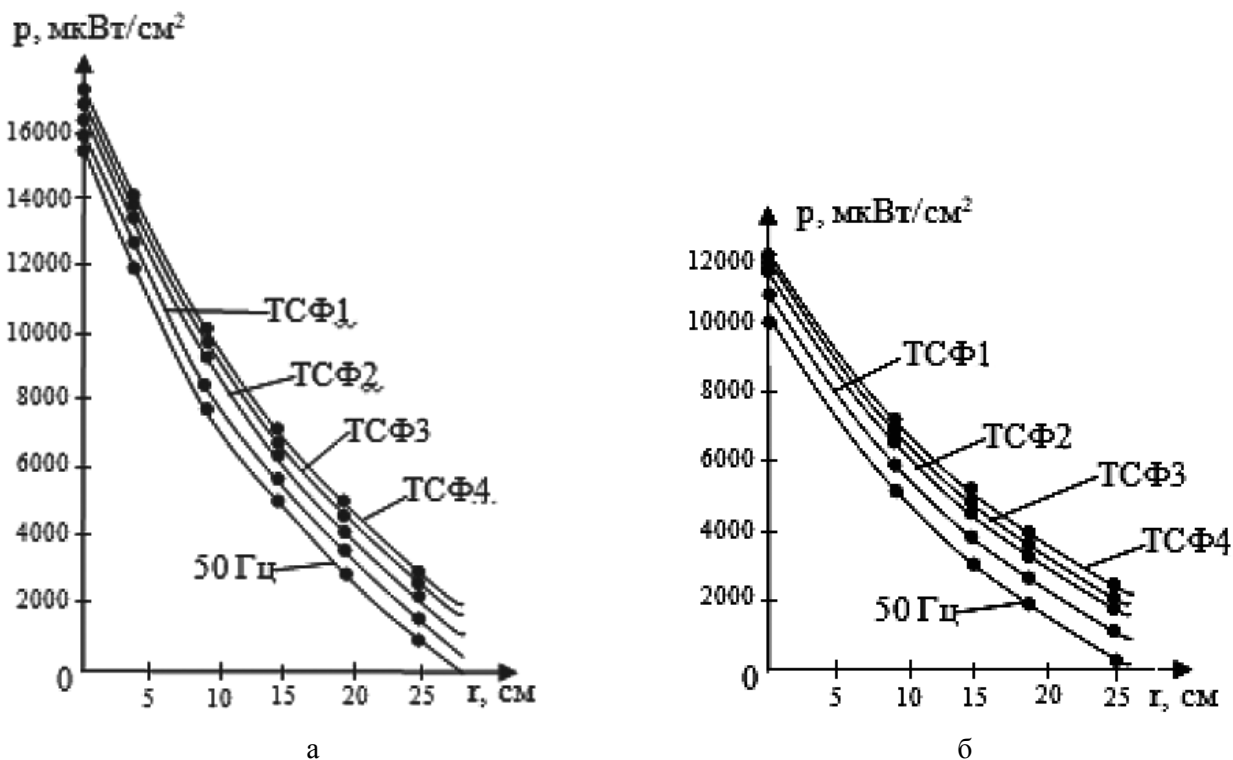


Рис. 7. Плотность потока излучения на облучаемой поверхности при высоте подвеса: а – 240 мм, б – 480 мм для исследуемых режимов 50 Гц, ТСФ1, ТСФ2, ТСФ3, ТСФ4

На основе экспериментальных исследований и последующих расчетов выполнена оценка плотности потока излучения (попадающей на облучаемую поверхность). Сравнительный анализ разных режимов (питание ИЭТУ током 50 Гц, ТСФ1 и ТСФ2 и др. показал, что появляется возможность регулировать

плотность потока излучения излучателя на облучаемой поверхности, например, при ТСФ1 на 4 % и ТСФ2 порядка 10 % по сравнению с током 50 Гц. Для повышения энергоэффективности ИЭТУ со светлыми инфракрасными излучателями целесообразным является режим с питанием ТСФ2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург А.С., Ляховицкий Б.М. Генераторы. Инфракрасного излучения для пищевой промышленности. Москва: ЦНИИТЭИ Легпищемаш, 1971. 71 с.

2. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике: в 4 т. Москва: Мир, 1995-1999. Т. 1. С. 15-17.

3. Электротехнологические установки и системы: учебник / А.Б. Кувалдин, М.Я. Погребиский, М.А. Федин и др. Москва: Изд-во МЭИ, 2023. С. 47-113.

4. Птицына Е.В. Разработка основ теории и электрических режимов электролизных и газоразрядных установок при питании током сложной формы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва: МЭИ, 2007. 20 с.

5. Бутырин П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabView. Москва: ДМК Пресс, 2005. 264 с.

6. Исследование магнитных и электрических характеристик электротехнических устройств с применением программного обеспечения LabView / А.С. Татевосян и др.; Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 88 с.: ил.

7. Методика экспериментального определения энергетических характеристик из-

лучателей при питании током сложной формы / Е.В. Птицына, Д.В. Птицын, А.Б. Кувалдин и др. // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 16-20.

8. Птицын Д.В., Птицына Е.В. Исследование энергетических характеристик дросселей насыщения, используемых в излучательных электротехнологических установках с темными и светлыми инфракрасными излучателями для питания током сложной формы // Наука России: цели и задачи: материалы XLII Междунар. науч.-практ. конф. 5 февраля 2024 г. Екатеринбург, 2024. 8 с.

9. Расчет потерь в стали при несинусоидальной форме кривой напряжения питания / Л.С. Васильев и др. // Электротехника. 1970. № 11. С. 46-49.

10. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 1. Общие вопросы: Электротехнические материалы / под ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. 9-е изд., стер. Москва: Изд-во МЭИ, 2003. 440 с.

11. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия: в 4 кн. Кн. 4: Промышленная теплоэнергетика и теплотехника / под общ. ред. член-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. 5-е изд., стер. Москва: Изд. дом МЭИ, 2022. 631 с.

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

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

Птицын Дмитрий Вячеславович – старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета

Кувалдин Александр Борисович – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»

Dmitry V. Ptitsyn – Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Omsk State Technical University

Alexander B. Kuvaldin – Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering, National Research University Moscow Power Engineering Institute

Статья поступила в редакцию 06.11.24, принята к опубликованию 26.11.24

УДК 621.373

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРНОЙ ЛАМПЫ ГМИ-26Б

В.М. Дорошенко, Е.В. Никольская

TECHNOLOGICAL PROCESS OF DEVELOPING GAS ABSORBERS FOR THE GMI-26B GENERATOR LAMP

V.M. Doroshenko, E.V. Nikolskaya

В статье приводятся результаты разработки технологического процесса изготовления нераспыляемых газопоглотителей, изготовленных на основе активных тугоплавких металлов или их смесей, предназначенных для применения в электровакуумных приборах. Генераторные лампы используются для генерирования и усиления электрических колебаний высоких частот. Они находят применение в радиосвязи, промышленной электронике, радионавигации и многих других областях техники. Распределение генераторных ламп по группам зависит от максимальной мощности, рассеиваемой анодом, и от предельной рабочей частоты. Почти во все генераторные лампы входят газопоглотители для поглощения газа внутри вакуума. После размещения и закрепления газопоглотителя прибор тщательно вакуумируется. В процессе эксплуатации генераторных ламп при высоких температурах выделяются газы, которые негативно влияют на катод или на работу самой лампы. Газопоглотитель обычно содержит специальные адсорбенты, которые захватывают и удерживают молекулы газа на своей поверхности. Это препятствует их возвращению в активную часть лампы. Когда газовые молекулы приближаются к поверхности адсорбента, они удерживаются на молекулярном уровне благодаря силам взаимодействия, таким как ионные связи. Это позволяет газопоглотителю эффективно очищать рабочее пространство лампы.

The article presents the results of development of a technological process in manufacturing non-evaporable gas absorbers based on active refractory metals or their mixtures designed to be used in vacuum tube devices. Generator tubes are used to generate and amplify high-frequency electrical oscillations. They are used in radio communications, industrial electronics, radio navigation and many other areas of technology. The generator tubes are classified into groups depending on the maximum power dissipated by the anode and maximum operating frequency. Almost all generator tubes include gas absorbers for absorbing gas inside a vacuum. After placing and fixing the gas absorber, the device is carefully evacuated. During the operation of a tube at high temperatures, the gases are released which negatively affects the cathode or the operation of the tube itself. The gas absorber usually contains special adsorbents that capture and hold gas molecules on their surface. This prevents them from returning to the active part of the lamp. When gas molecules approach the surface of the adsorbent, they are held at the molecular level due to interaction forces such as ionic bonds. This allows the gas absorber to effectively clean the working space of the lamp.

Ключевые слова: *матрица для распределения порошка, газопоглотитель, генераторные лампы, СВЧ приборы*

Введения

Газопоглотители, установленные в генераторных лампах, способствуют поглощению негативных газов в вакууме, что не только поддерживает вакуум в лампе, но и увеличивает срок службы устройства, стабилизируя рабочие условия. В результате лампа остается более стабильной и улучшает общую эффективность генерации СВЧ приборов.

Газопоглотители (геттеры) – вещества, способные адсорбировать и химически связывать газы, кроме инертных. Активированные геттеры (очищенные с поверхности от адсорбированных газов, путем нагрева в вакууме) способны сорбировать водород, кислород, азот, оксиды углерода, углеводороды [1, 2].

Порошки также могут применяться для изготовления геттеров сложной формы, например, в виде спеченных пористых брикетов на никелевой ленте, или наносятся напылением на подложки в виде пористого слоя необходимой толщины.

Изготовление газопоглотителя на СВЧ приборы является трудозатратной операцией. Газопоглотитель весом 0,80 г надо взвешивать на весах с гирьками.

Для уменьшения времени и улучшения технологического процесса необходима разработка матрицы для распределения порошка. Эта конструкция сэкономит время и повысит производительность газопоглотителей в месяц.

Матрица для распределения – это конструкция, используемая в процессе, когда порошок нужно равномерно распределить по поверхности перед прессованием или другими процессами. Она состоит из нескольких ячеек для равномерного распределения. Состав распределяют по поверхности механическим путем с помощью шпателя. Такие конструкции позволяют заполнять ячейки контролируемым количеством порошка, чтобы избежать избытка или недостатка состава для пресс-формы [3].

Keywords: *powder distribution matrix, gas absorber, generator lamps, microwave devices*

Изготавливаемые газопоглотители идут на генераторную лампу ГМИ-26Б (рис. 1). Они устанавливаются внизу на ножки, вставляемые в колпачок, и привариваются точечной сваркой к металлу. На рис. 2 изображен чертеж общего вида лампы ГМИ-26Б [4].



Рис. 1. Фотография собранной лампы ГМИ-26Б

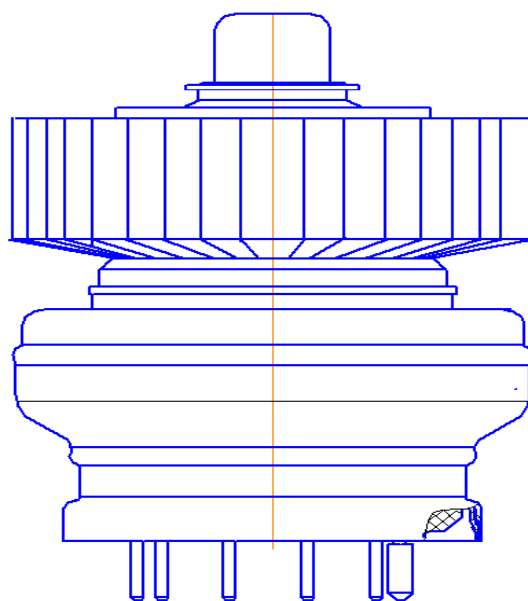


Рис. 2. Чертеж общего вида лампы ГМИ-26Б

На рис. 3 изображен чертеж, полученный в результате численного моделирования лампы ГМИ-26Б, вид газопоглотителей

в трёхмерном пространстве. На рис. 4 изображен чертеж лампы ГМИ-26Б, вид газопоглотителей в двухмерном пространстве.

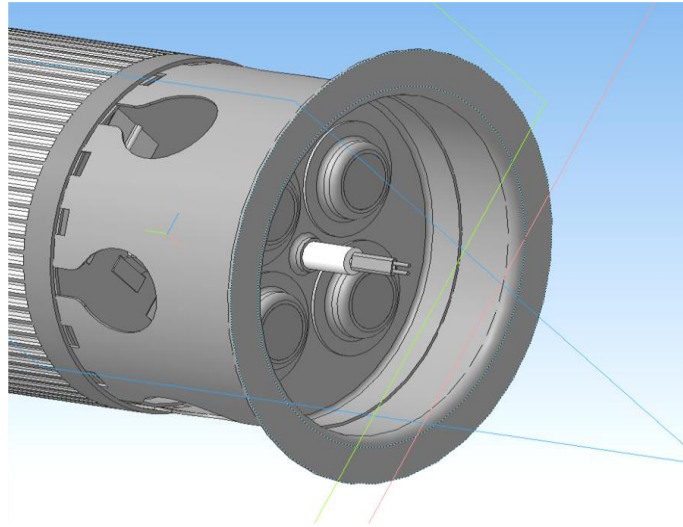


Рис. 3. Чертеж лампы ГМИ-26Б, вид газопоглотителей в трёхмерном пространстве

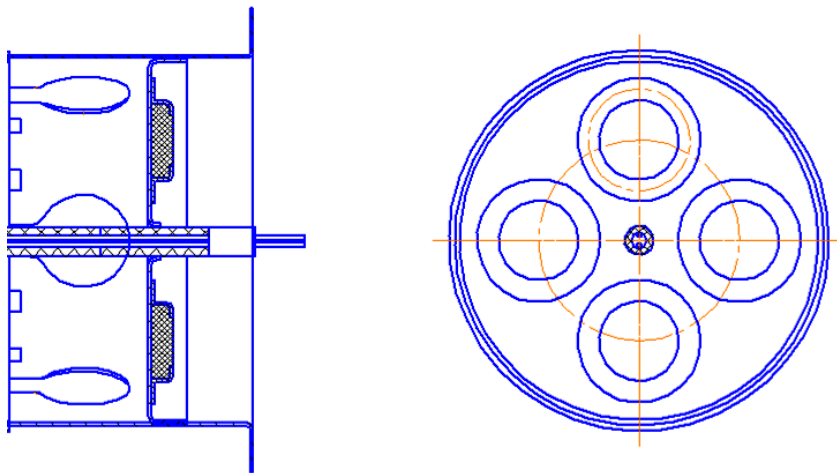


Рис. 4. Чертеж лампы ГМИ-26Б, вид газопоглотителей в двухмерном пространстве

Газопоглотители изготавливаются из порошков, содержащих в составе титан (Ti) 80 %, гидрид титана (TiH₂) 10 % и молибден (Mo) 10 %. Все порошки хорошо перемешивают и просушивают в сушильной камере до полного исчезновения влаги в составе.

Плотность титана составляет $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$, объем титана при весе $m_m = 0,064 \text{ г}$:

$$V_m = \frac{p}{m} = \frac{0,064 \text{ г}}{4,99 \text{ г/см}^3} = 0,01282 \text{ см}^3. \quad (1)$$

Плотность гидрида титана составляет $\rho = 3,76 \text{ г/см}^3$, объем гидрида титана при весе $m_{20} = 0,008 \text{ г}$:

$$V_{20} = \frac{p}{m} = \frac{0,008 \text{ г}}{3,76 \text{ г/см}^3} = 0,002127 \text{ см}^3. \quad (2)$$

Плотность молибдена составляет $\rho = 10,2 \text{ г/см}^3$, объем молибдена при весе $m_m = 0,008 \text{ г}$:

$$V_m = \frac{p}{m} = \frac{0,008 \text{ г}}{10,2 \text{ г/см}^3} = 0,00007 \text{ см}^3. \quad (3)$$

Из формул выше можно высчитать общую плотность порошка:

$$\rho_{общ} = \frac{m_m + m_{zm} + m_M}{v_m + v_{zm} + v_M} = \frac{0,064 + 0,008 + 0,008}{0,01282 + 0,002127 + 0,0007} = \frac{0,08}{0,01565} = 5,11 \text{ г/см}^3; \quad (4)$$

$$\rho = \frac{V_{общ}}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,01565 \text{ см}^3}{3,14 \cdot 0,025^2} = 0,076 \text{ см}. \quad (5)$$

Далее делают навески. Для расчета объема порошка до прессования узнаем общую плотность состава. Общая плотность (4)

5,11 г/см³. Диаметр газопоглотителей 5 мм, следовательно, диаметр матрицы составляет 5 мм.

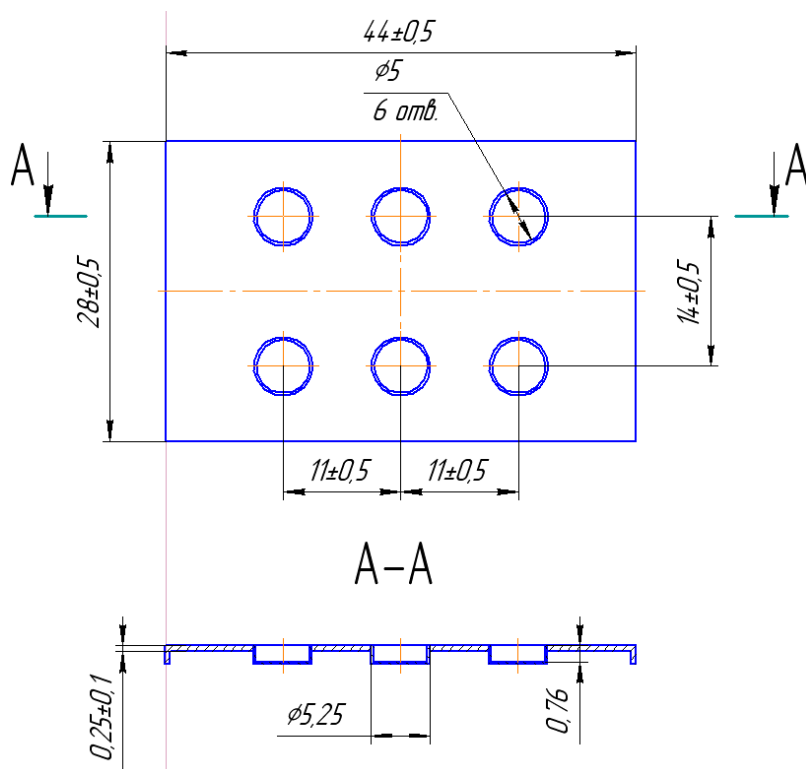


Рис. 5. Чертеж разработанной матрицы для распределения порошка

Из этих значений можем разработать матрицу с шестью ячейками (рис. 5) и рассмотрим их.

После прессования порошка готовая таблетка (рис. 6) проверяется на пористость, после положительного результата спекается в печи и уже после всех операций готова к сборке.

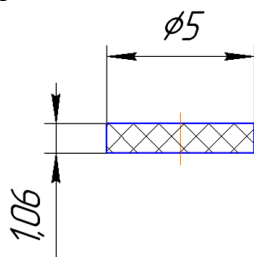


Рис. 6. Чертеж готовой таблетки

После разработки матрицы для распределения порошка можно высчитать трудоемкость работы, где N – количество таблеток для изготовления, t – время изготовления одной таблетки:

$$T = N \cdot t = 2000 \cdot 60 \text{ секунд} = 120000 \text{ с} = 33,3 \text{ часа}. \quad (6)$$

Для нахождения трудоемкости с использованием матрицы приведены в формулах ниже:

$$T = N \cdot t_m = 2000 \cdot 5 \text{ секунд} = 10000 \text{ с} = 2,78 \text{ часа}. \quad (7)$$

Для расчета трудоемкости с использованием матрицы надо найти время изготов-

ления одной таблетки, t_6 – распределение порошка в матрицу, t_m – время заполнения одной ячейки.

$$t_m = \frac{t_6}{N} = \frac{30 \text{ секунд}}{6} = 5 \text{ секунд.} \quad (8)$$

Заключение

Изготовление матрицы для распределения порошка представляет собой важный этап для изготовления газопоглотителей.

Матрицы оптимизируют производственные процессы, снижая трудоемкость операций, и минимизируют отходы материала, что позволяет сократить общие затраты, а также ускоряет процесс, что ведет к увеличению объема производства за единицу времени. Использование матрицы позволяет вести более точный контроль над распределением порошка, что, в свою очередь, способствует стабилизации процессов и повышению качества производимых изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН / Ю.И. Бельченко и др. // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. №. 6. С. 595-650.

2. **Прохоров А.М.** Геттеры // Большая советская энциклопедия. 6-е изд. Москва: Советская энциклопедия, 1971. 445-446 с.

3. Alarm Signals Identification Based on the Data of Cars Warranty Exploitation / D.V. Aydarov, V.N. Kozlovsky, V.V. Vakhni-

na et al. // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019. P. 416-419, doi:10.1109/EIConRus.2019.865 6815.

4. Генераторные лампы: общие сведения, классификация и применение // Саратовская электронная техника. URL: <http://elecsar.ru/content/generatornye-lampy-obshchie-svedeniya-klassifikaciya-i-primenenie> (дата обращения: 20.11.2024).

Дорошенко Валентина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Никольская Екатерина Вячеславовна – магистрант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valentina M. Doroshenko – Ph.D (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ekaterina V. Nikolskaya – Master's Student, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.11.24, принята к опубликованию 12.12.24

УДК 621.372.8

ДОСТИЖЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА НИЖНЕЙ СТЕНКЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

В.А. Коломейцев, О.В. Дрогайцева, А.Р. Железняк, А.Ю. Бычков

ACHIEVEMENT OF THE MAXIMUM ALLOWABLE LEVEL OF ELECTRIC FIELD ENERGY IN THE DIELECTRIC PLATE LOCATED ON THE BOTTOM WALL OF A RECTANGULAR WAVEGUIDE

V.A. Kolomeytsev, O.V. Drogaytseva, A.R. Zheleznyak, A.Yu. Bychkov

На основе аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики (ВКЗЭ), полученного при использовании продольной Y-поляризации электромагнитного (ЭМ) поля и принципа поляризационной двойственности, проведено исследование дисперсионных свойств собственных электродинамических параметров и энергии электрического поля $W_e(\lambda)$ прямоугольного волновода (ПрВ) с диэлектрической пластиной, расположенной на нижней широкой стенке волновода в доминантном диапазоне длин волн с целью определения длины волны, на которой достигается предельно-допустимый уровень W_e в пластине, что позволит интенсифицировать процесс СВЧ нагрева листовых диэлектрических материалов при использовании данной волноводной структуры в качестве рабочей камеры СВЧ нагревательной установки волноводного типа.

Ключевые слова: прямоугольный волновод; основная волна H_{01} , прямоугольная диэлектрическая пластина, электромагнитное поле; собственные электродинамические параметры; критические длины волн; доминантный диапазон длин волн; длина волны трансформации ЭМ поля; быстрая и медленная волна; коэффициент замедления волны; продольная Y-поляризация ЭМ поля; волновые уравнения Гельмгольца; дисперсионные уравнения

Based on the analytical solution of the internal boundary value problem of electrodynamics (IBEP), obtained using the longitudinal Y-polarization of the electromagnetic (EM) field and the principle of polarization duality, a study of the dispersion properties of the intrinsic electrodynamic properties parameters and the electric field energy was carried out $W_e(\lambda)$ of a rectangular waveguide (WW) with a dielectric plate located on the lower wide wall of the waveguide in the dominant wavelength range in order to determine the wavelength at which the maximum permissible level W_e is achieved in the plate, which will allow intensifying the process of microwave heating of sheet dielectric materials when using this waveguide structure as the working chamber of a waveguide-type microwave heating installation.

Keywords: rectangular waveguide; fundamental wave H_{01} , rectangular dielectric plate, electromagnetic field; own electrodynamic parameters; critical wavelengths; dominant wavelength range; wavelength EM field transformations; fast and slow wave; wave deceleration coefficient; longitudinal Y-polarization of the EM field; Helmholtz wave equations; dispersion equations

Проведем исследование дисперсионных свойств ПрВ с диэлектрической пластиной, расположенной на нижней широкой стенке волновода. На рис. 1 представлено поперечное сечение ПрВ с двухслойным пластинчатым заполнением ($q = 1$ – воздушная среда, $q = 2$ – диэлектрическая пластина). Данная волноводная структура допускает аналитическое решение ВКЗЭ методом частичных областей и методом разделения переменных [1] для каждой из областей. Решение может быть представлено в виде суперпозиции E и H -типов волн.

Как показано в работе [2], для предотвращения появления гибридных волн необходимо использовать продольную поляризацию ЭМ поля, которая позволяет перейти от решения векторных волновых уравнений Гельмгольца к системе скалярных уравнений для составляющих ЭМ поля E_{yq}, H_{yq} :

$$\begin{aligned} \nabla^2 E_{yq}(\vec{r}, \tau) - \omega^2 \varepsilon_q \mu E_{yq}(\vec{r}, \tau) &= 0; \\ \nabla^2 H_{yq}(\vec{r}, \tau) - \omega^2 \varepsilon_q \mu H_{yq}(\vec{r}, \tau) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{yq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{yqmn}(x, y) e^{j(\omega\tau - \beta_{mn}z)}; \\ H_{yq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} H_{yqmn}(x, y) e^{j(\omega\tau - \beta_{mn}z)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} E_{yqmn}(x, y) &= \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(a_{1qn} \cos(k_{1qn}y) + b_{1qn} \sin(k_{1qn}y)\right); \\ H_{yqmn}(x, y) &= \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(b_{1qn} \cos(k_{1qn}y) + b_{2qn} \sin(k_{1qn}y)\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Остальные компоненты ЭМ поля определяются на основе принципа поляризационной двойственности посредством следующих соотношений:

$$\begin{aligned} E_{qx} &= \frac{1}{K_1^2} \left(\frac{\partial^2 E_{qy}}{\partial x \cdot \partial y} + j\omega\mu \cdot \frac{\partial H_{qy}}{\partial z} \right); & H_{qy} &= \frac{1}{K_1^2} \left(\frac{\partial^2 H_{qy}}{\partial x \cdot \partial y} - j\omega\varepsilon_q \cdot \frac{\partial E_{qy}}{\partial z} \right); \\ E_{qz} &= \frac{1}{K_1^2} \left(\frac{\partial^2 E_{xq}}{\partial x \cdot \partial z} + j\omega\mu \cdot \frac{\partial H_{xq}}{\partial y} \right); & H_{qz} &= \frac{1}{K_1^2} \left(\frac{\partial^2 H_{qy}}{\partial x \cdot \partial y} + j\omega\varepsilon_q \cdot \frac{\partial E_{qy}}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_1^2 = K_{ym}^2 + \beta^2$; K_1 – поперечное волновое число; β_{mn} – постоянная распростра-

где E_{yq}, H_{yq} – Y -составляющие векторов напряженности электрического и магнитного поля; ω – круговая частота; ε_q, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; $\vec{r}$ – радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в пространстве; τ – время.

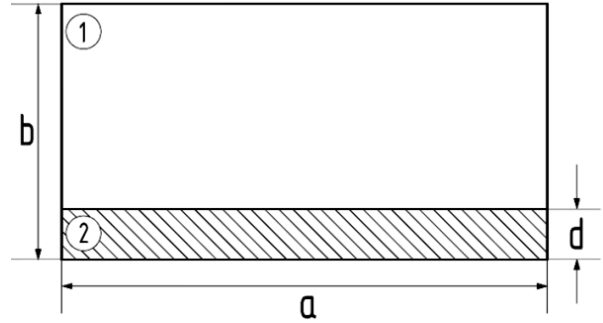


Рис. 1. Поперечное сечение ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением

Как было показано выше, решение уравнений (1) может быть представлено в виде суперпозиции E и H -типов волн:

нения волны; K_y – волновое число в координатном направлении оси X . Подставляя в соотношения (4) значения E_{yq}, H_{yq} из (2),

(3) и удовлетворяя полученные соотношения стандартным граничным условиям на металлической внутренней поверхности волновода, определим полную структуру ЭМ поля. Отметим, что данный подход решения ВКЗЭ значительно упрощает определение поля ЭМ волны волноводной структуры, приведенной на рис. 1.

Для достижения поставленной цели необходимо исследовать дисперсионные свойства энергии электрического поля основной волны ПрВ с диэлектрической пластиной на нижней стенке волновода в доминантном диапазоне длин волн. Это свя-

зано с тем, что СВЧ нагревательные устройства волноводного типа в основном эксплуатируются в одномодовом режиме, в котором нагрев пластинчатого материала осуществляется посредством энергии доминантной волны. В работах [3, 4] показано, что основной волной рабочей камеры на основе ПрВ при расположении нагреваемой пластины параллельно узкой или широкой стенке волновода является волна H -типа. В связи с этим основной интерес представляет структура ЭМ поля H -типов волн, которая определяется согласно соотношениям (2)-(4) следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{x2mn}(x, y) &= b_{2mn} \frac{\omega \mu}{K_{1mn}^2} \cdot \beta_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin(K_{y2mn}y); \\ E_{z2mn}(x, y) &= j b_{2mn} \frac{\omega \mu}{K_{1mn}^2} \cdot \left(\frac{m\pi}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin(K_{y2mn}y); \\ H_{x2mn}(x, y) &= -b_{2mn} \cdot \frac{K_{y2mn}}{K_{1mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos(K_{y2mn}y); \\ H_{y2mn}(x, y) &= b_{2mn} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin(K_{y2mn}y); \\ -H_{z2mn}(x, y) &= b_{2mn} \cdot \frac{K_{y2mn}}{K_{1mn}^2} \beta_{mn} \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos(K_{y2mn}y). \end{aligned}$$

Соотношения (5) позволяют определить структуру ЭМ поля H -типов волн, распространяющихся в ПрВ (рис. 1). При этом первые два соотношения позволяют определить энергию электрического поля, переносимую H_{mn} волной, а соотношения (3)-(5) в системе (5) определяют

систему возбуждения требуемой волны H_{mn} , на которой осуществляется термобработка. В нашем случае – это основная продольная волна H_{01} . Как следует из соотношений (5), электрическое поле основной волны H_{01} определяется составляющей E_{y2} :

$$E_{y201}(y) = b_{2y} \cdot \frac{\omega \mu}{\beta_{01}} \sin(K_{y2}y), \text{ для } q = 2, \quad (6)$$

$$\begin{cases} E_{y101}(y) = b_{1y} \cdot \frac{\omega \mu}{\beta_{01}} \sin(K_{y1}y); & \text{для } q = 1, \text{ при } K_{y1}^2 > 0, \\ E_{y101}(y) = j b_{1y} \cdot \frac{\omega \mu}{\beta_{01}} \operatorname{sh}\left(\left|K_{y1}\right| \cdot y\right); & \text{для } q = 1, \text{ при } K_{y1}^2 < 0, \end{cases}$$

где b_{2y} , b_{1y} – амплитуда электрического поля в диэлектрической пластине и воздушной среде. Для определения длины, на которой достигается $W_{\Sigma 2 \max}$ в пластине, до-

статочно первого уравнения системы (6). Остальные уравнения (7) позволяют не только исследовать дисперсные свойства энергии электрического поля в воздушной

прослойке ПрВ, но и установить энергообмен между диэлектрическими слоями в зоне распространения медленной волны при $K_{y1}^2 < 0$. Необходимо отметить, что в воздушной прослойке в доминантном диапазоне длин волн может распространяться как быстрая волна – $K_{y1}^2 > 0$, ($\lambda_{mp.1} \leq \lambda < \lambda_{kp.1}$), так и медленная волна – $K_{y1}^2 < 0$, ($\lambda_{kp.2} \leq \lambda < \lambda_{mp.1}$). В диэлектрической пластине распространяется быстрая волна, фазовая скорость которой – $v_\phi = \omega / \beta$ меньше скорости света в вакууме и больше скорости света в диэлектрической пластине $c_D = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon'_2 \mu \varepsilon_0}}$.

Для определения длины волны, на которой достигается $W_{y2 \max}$, воспользуемся методикой, используемой в работе [6]. Для этого определим среднюю в поперечном сечении диэлектрической пластины энергию электрического поля основной волны H_{10} посредством соотношения

$$\bar{W}_{y2} = \frac{1}{d} \int_{x_{q-1}}^{x_q} W_{y2}(y) dy.$$

Подставляя в соотношение (6) соотношение (5) и проведя интегрирование, получим

$$\bar{W}_{y2} = b_2 \cdot \frac{\varepsilon'_2}{K_{3AM}^2} \left(1 - \frac{\sin(2K_{y2} d)}{2K_{y2} d} \right), \quad (7)$$

где $K_{3AM} = \frac{\beta_{01} c}{\omega}$, d – толщина пластины; $K_1 = \beta_{10}$ при $m = 0$ для волны H_{01} . Из соотношения (7) следует, что дисперсионные свойства $\bar{W}_{y2}(\lambda)$ зависят от дисперсионных свойств коэффициента замедления $K_{3AM}(\lambda)$ волнового числа $K_{y2}(\lambda)$, определяющего ЭМ поле в пластине. При этом в диапазоне длин волн распространения медленных волн $K_{3AM} > 1$, а для быстрых волн – $K_{3AM} < 1$.

Проведём исследование дисперсионных свойств электродинамических параметров входящих в соотношение (7). Для решения данной задачи воспользуемся дисперсионным уравнением для H -типов волн, приведенный в работе [5] для ПрВ, приведенном на рис. 1:

$$\begin{aligned} \frac{\operatorname{tg} \eta}{\eta} &= -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \xi}{\xi} & \text{для } K_{y1}^2 > 1; \\ \frac{\operatorname{tg} \eta}{\eta} &= -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{th} |\xi|}{\xi} & \text{для } K_{y1}^2 < 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Первое уравнение (8) справедливо в области распространения быстрой волны K_{01} , а второе уравнение в области распространения медленной волны. В данной работе используются дополнительно дисперсионные уравнения, справедливые для воздушной прослойки диэлектрической пластины ПрВ при распространении в нём основной волны H_{01}

$$\begin{aligned} \omega^2 \varepsilon_0 \mu &= K_{y1}^2 + \beta^2; & \text{для } q = 1; \\ \omega^2 \varepsilon_0 \mu &= K_{y2}^2 + \beta^2; & \text{для } q = 2. \end{aligned} \quad (9)$$

Дисперсионные уравнения являются следствием аналитического решения ВКЗЭ методом разделения переменных и метода частичных областей. Уравнения (8) позволяют выразить волновые числа η и ξ через исследуемый параметр.

Исследование дисперсионных свойств собственных электродинамических параметров начнём с определения доминантного диапазона длин волн, то есть значений критических длин волн основного λ_{01} и первого высшего $\lambda_{kp.2}$ типов волн. Условием их определения является $\beta_{01} = \beta_{02}$. Учитывая данное условие, из соотношений (9), определим η и ξ , позволяющие определить $\lambda_{kp.2}$:

$$\eta = \frac{2\pi}{\lambda_{kp.1}} \cdot \sqrt{\varepsilon'_0} \cdot d; \quad \xi = \frac{2\pi}{\lambda_{kp.1}} \cdot (b - d). \quad (10)$$

Подставляя параметры η и ξ в первое уравнение (9), получим

$$\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр.1}}\right)\sqrt{\varepsilon_2'}\cdot d}{\frac{2\pi}{\lambda_{кр.1}}\cdot\sqrt{\varepsilon_2'}\cdot d} = -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр.1}}\cdot(b-d)\right)}{\frac{2\pi}{\lambda_{кр.1}}\cdot(b-d)}, \quad (11)$$

где $\vartheta_1 = (b - d) / d$. Решение дисперсионного уравнения (11) проведём для ПрВ сечением 45×90 мм для диэлектрической пластины с $\varepsilon_2' = 9, 16, 25$. Решение проведём методом последовательных приближений. При этом необходимо учитывать, что первый корень дисперсионного уравнения (11) определяет $\lambda_{кр.1}$, а второй корень $\lambda_{кр.2}$. В табл. 1 приведены значения критических длин волн основного и первого высшего типов волн — $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$ ПрВ сечением 45×90 мм для различных ε_2' и d / b диэлектрической пластины, полученных из решения уравнения (11). Заметим, что диапазон изменения ε_2' в таблице 1 охватывает практически весь спектр диэлектрических материалов, термообработка которых

осуществляется посредством энергии ЭМ поля. При определении $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$ необходимо учитывать, что нулевым приближением является $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$ полого ПрВ с пластиной на нижней стенке. При этом значения $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$ определяется равенством левой и правой части уравнения (11) при последовательном увеличении $\lambda_{кр.}$ в уравнении (11) при определении $\lambda_{кр.2}$ и уменьшении $\lambda_{кр.1}$ при определении $\lambda_{кр.1}$. Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что с увеличением параметров ε_2' и d / b пластины увеличиваются $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$, при этом величина $\lambda_{кр.1}$ возрастает сильнее, чем $\lambda_{кр.2}$. Это связано с тем, что диэлектрическая пластина расположена в минимуме электрического поля основной волны.

Таблица 1

ε_2'	4	9	16	25	36	49	64	81	
$d / b = 0,2$	9,9	11,8	14,6	17,4	20,4	23,6	27	30,2	$\lambda_{кр.1}$
	5,7	6,7	7,1	7,55	8,0	8,8	9,39	9,83	$\lambda_{кр.2}$
$d / b = 0,4$	13,2	18,7	24,2	30,2	31,1	42	48	54	$\lambda_{кр.1}$
	6,0	7,65	9,75	11,9	14,1	16,5	18,8	21,1	$\lambda_{кр.2}$
$d / b = 0,6$	16,4	24	31,5	39,1	47	55	63	70	$\lambda_{кр.1}$
	7,9	9,0	13,7	17,1	20,5	23,8	27,2	30,6	$\lambda_{кр.2}$

Определим длину волны $\lambda_{мп1}$, на которой электрическое поле основной волны H_{01} сосредоточено в диэлектрической пластине. Условием определения $\lambda_{мп1}$ согласно соотношению (5) является $K_{y1} = \xi = 0$. Подставляя условие $\xi = 0$ во второе дисперсионное уравнение (9), получим

$$\operatorname{tg} \eta(\lambda) = -\vartheta_1 \cdot \eta(\lambda). \quad (12)$$

Уравнение (12) позволяет определить волновое число $\eta(\lambda_{мп1})$, для различных d / b . В табл. 2 приведены значения $\eta(\lambda_{мп1})$ ПрВ сечением 45×90 мм для $d / b = 0,2; 0,4; 0,6$, для которых определены $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$ в табл. 1:

Таблица 2

d / b	0.2	0.4	0.6
d , мм	0.9	1.8	2.7
ϑ_1	4	1.5	0.67
$\eta(\lambda_{мп1})$	1.72	1.9	2.19

Приведённые в таблице данные позволяют определить длину волны — $\lambda_{мп1}$. Для этого используем уравнения (9). Подставляя в уравнение для воздушной среды ($q = 1$) условие $K_{y1} = 0$, получим $\beta^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$. Подставляя данное соотношение во второе

уравнение и, учитывая, что

$$\omega_{mp1}^2 \varepsilon_0 \mu_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_{mp1}} \right)^2, \text{ получим}$$

$$\lambda_{mp1} = \frac{2\pi}{\mu_{mp1}} \cdot d \cdot \sqrt{\varepsilon'_2 - 1}. \quad (13)$$

В табл. 3 приведены значения длины волны трансформации ЭМ поля ПрВ сечением 45×90 мм для различных ε'_2 и d/b пластины. Как следует из отношения (13) и данных табл. 3, величина λ_{mp1}

возрастает при увеличении ε'_2 и толщины диэлектрической пластины. Это принципиально важно для определения длины волны, на которой осуществляется её термообработка и достигается предельно допустимый уровень энергии электрического поля, то есть удельная плотность тепловых источников в ней. При этом λ_{mp1} определяет основополагающие условия оптимизации рабочей камеры СВЧ нагревательных устройств волноводного типа, направленной на интенсификацию СВЧ нагрева листовых диэлектрических материалов.

Таблица 3

λ_{mp1} , см									
$d/b \setminus \varepsilon'_2$	4	9	16	25	36	49	64	81	100
0,1	2,83	4,66	6,37	8,06	9,73	11,4	13,1	14,7	16,4
0,2	5,66	9,32	12,74	16,12	19,5	22,8	26,2	29,4	32,8
0,4	11,32	18,64	25,5	32,2	38,9	45,6	52,4	58,8	65,6
0,6	17	28	38,2	48,4	58,4	68,4	78,9	88,2	98,4

Рассмотрим дисперсионные свойства, необходимые для определения длины волны, на которой достигается предельно допустимый уровень энергии электрического поля в диэлектрической пластине – коэффициент замедления основной волны H_{01} , который определяется следующим образом – $K_{зам} = \frac{c}{v_{\phi}} = \frac{\beta_c}{\omega}$. Учитывая данное

соотношение системы уравнений (9), определим приведённые волновые числа η и ξ для воздушной среды и диэлектрической пластины:

$$\eta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2}, \text{ для } q = 2,$$

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (b-d) \cdot \sqrt{1 - K_{зам}^2},$$

для $q = 1, K_{зам} < 1$,

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (b-d) \cdot \sqrt{K_{зам}^2 - 1},$$

для $q = 1, K_{зам} > 1$.

Подставляя соотношения (13) в уравнение для Н-типов волн (8), получим дисперсионное уравнение для определения дисперсионных характеристик ПрВ с диэлектрической пластиной на нижней широкой стенке:

$$\frac{\operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2}}{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2}} = -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (b-d) \sqrt{1 - K_{зам}^2}}{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (b-d) \sqrt{1 - K_{зам}^2}}; \text{ для } K_{зам} < 1;$$

$$\frac{\operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2}}{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2}} = -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (b-d) \sqrt{K_{зам}^2 - 1}}{\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (b-d) \sqrt{K_{зам}^2 - 1}}; \text{ для } K_{зам} > 1. \quad (15)$$

Дисперсионные уравнения позволяют определить коэффициент $K_{зам}$ при различных

λ в зонах распространения медленной волны H_{01} (первое уравнение) и быстрой волны

(второе уравнение) доминантного диапазона длин волн. Решение проводится методом последовательных приближений. Для заданного значения λ определяется $K_{зам}$. Заметим, что на длине волны λ_{mp1} коэффициент $K_{зам} = 1$. Расчёт дисперсионных характеристик $K_{зам}(\lambda)$ проведём для наиболее распространённого на частоте 2450 МГц волновода

сечением 45×90 мм для диэлектрической пластины толщиной $d = 1,8$ мм; 2,7 мм; 3,6 мм и $\varepsilon'_2 = 9$; 4; 16. В табл. 4 приведены значения $K_{зам}(\lambda)$ для $\varepsilon'_2 = 9$ и различных $d / b = 0,2$; 0,4; 0,6 в доминантном диапазоне длин волн, а также волновые числа η и ξ , которые определяют коэффициент замедления волны.

Таблица 4
 $\varepsilon'_2 = 9$

$d / b = 0,2$	λ , см	10,0	9,32	8,0	7,0	5,6
	η	1,63	1,72	1,91	2,06	2,25
	ξ	1,26	0	1,52	4,14	6,95
	$K_{зам}$	0,84	1,0	1,36	1,62	1,98
$d / b = 0,4$	λ , см	18,64	16	14	12	7,62
	η	1,72	1,97	2,07	2,18	2,49
	ξ	0	0,92	1,49	2,41	5,16
	$K_{зам}$	1,0	1,3	1,57	1,95	2,5
$d / b = 0,6$	λ , см	20	18	16	14	9,0
	η	2,14	2,33	2,33	2,43	2,66
	ξ	0,53	0,9	1,34	1,52	3,12
	$K_{зам}$	1,95	1,72	2,1	2,25	2,66

В табл. 5 приведены значения коэффициента $K_{зам}$ для фиксированной толщины пластины $d / b = 0,2$ и различных $\varepsilon'_2 = 9$; 16; 25 в доминантном диапазоне длин волн ПрВ сечением 45×90 мм. Совместное использование данных табл. 4, 5 позволяют исследовать дисперсионные свойства основных электродинамических параметров, определяющих энергию электрического поля практически всего спектра диэлектрических материалов,

термообработка которых может осуществляться в СВЧ устройствах волноводного типа. Анализ приведённых в табл. 4, 5 данных показывает, что увеличение толщины и ε'_2 пластины приводит к повышению величины $K_{зам}$. При этом указанные значения $K_{зам}$, η и ξ однозначно определяют величину энергии электрического поля и позволяют определить длину волны, на которой достигается $W_{э2max}$ в диэлектрической пластине.

Таблица 5
 $d / b = 0,2$

$\varepsilon'_2 = 9$	λ , см	10,0	9,32	8,0	7,0	5,6
	η	1,63	1,72	1,91	2,06	2,25
	ξ	1,26	0	1,52	4,14	6,95
	$K_{зам}$	0,84	1,0	1,36	1,62	1,98
$\varepsilon'_2 = 16$	λ , см	14,6	12,74	11	9	7,1
	η		1,72	1,89	2,1	2,32
	ξ		0	2,52	5,04	8,32
	$K_{зам}$		1,0	1,58	2,24	2,77
$\varepsilon'_2 = 25$	λ , см	17,4	16,12	13	10	7,6
	η		1,72	1,99	2,21	2,43
	ξ		0	3,42	6,44	11
	$K_{зам}$		1,0	2,2	3,13	3,8

Необходимо заметить, что в табл. 4 лишь одно значение $K_{зам} < 1$. Это означает, что в данном случае в ПрВ распространяется быстрая волна H_{01} . При остальных ε'_2 и d/b пластины в ПрВ распространяется медленная волна H_{10} , фазовая скорость которой меньше скорости света в воздушной среде. В диэлектрической пластине в диапазоне длин волн $-\lambda_{кр2} \leq \lambda \leq \lambda_{мп1}$ распространяется медленная волна H_{01} , v_ϕ которой меньше скорости света в воздушной среде, но больше скорости света в пластине $-c_{пл.} = \frac{c}{\varepsilon'_2}$, $v_{\phi пл.} = \frac{1}{\varepsilon_2 \cdot \mu}$. Таким об-

разом, в указанном диапазоне длин волн выполняются условия эффекта Вавилова – Черенкова, что оказывает влияние на процесс перераспределения энергии электрического поля между диэлектрическими слоями. Однако данная задача носит самостоятельный интерес и в данной работе не рассматривается.

Определим длину волн, на которой достигается предельно допустимый уровень энергии электрического поля в диэлектрической пластине. Для этого воспользуемся соотношением (7), которое приведем к безразмерному виду:

$$F_2(\lambda) = \frac{W_{э2}(\lambda)}{W_{э2}^2(\lambda_{мп1})} = \frac{1}{K_{зам}^2(\lambda)} \cdot \frac{1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda)}{2\eta(\lambda)}}{1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda_{мп1})}{2\eta(\lambda_{мп1})}}. \quad (16)$$

В соотношении (15) учтено, что $K_{зам}(\lambda_{мп1}) = 1$. Расчет дисперсионной функции $F_2(\lambda)$ проведем для ПрВ сечением 45×90 мм для $\varepsilon'_2 = 9; 16; 25$ и $d/b = 0,2; 0,4; 0,6$ диэлектрической пластины использованием данных табл. 4, 5. Заметим, что величина волнового числа η не зависит ни от ε'_2 , ни от d/b пластины, а зависит только от типа волны. Для основного типа волны H_{01} величина $\eta = 1,72$ и соответственно:

$$\varphi(\lambda_{мп1}) = 1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda_{мп1})}{\sin \eta(\lambda_{мп1})} = 1,09. \quad (17)$$

С учетом соотношения (17) выражение (16) для $F_2(\lambda)$ представим в виде:

$$F_2(\lambda) = \frac{0,92}{K_{зам}^2(\lambda)} \cdot \frac{1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda)}{2\eta(\lambda)}}{1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda_{мп1})}{2\eta(\lambda_{мп1})}}. \quad (18)$$

В табл. 6 приведены значения $F_2(\lambda)$ в доминантном диапазоне длин волн с учетом устойчивости одномодового СВЧ нагрева в устройствах волноводного типа. То есть, при определении рабочего диапазона длин волн учтены рекомендации работы [6].

Таблица 6

$\varepsilon'_2 = 9$

$d/b = 0,2$	$\lambda, \text{ см}$	10,0	9,92	8,0	7,0	5,7
	F_2	1,05	1,0	0,58	0,43	0,3
$d/b = 0,4$	$\lambda, \text{ см}$	18,6	16,0	14,0	12	7,62
	F_2	1,0	0,66	0,45	0,30	0,19
$d/b = 0,6$	$\lambda, \text{ см}$	20,0	18,0	16,0	14,0	9,0
	F_2	0,62	0,38	0,27	0,23	0,18
$d/b = 0,2$						
$\varepsilon'_2 = 9$	$\lambda, \text{ см}$	10,0	9,92	8,0	7,0	5,7
	F_2	1,05	1,0	0,58	0,43	0,3
$\varepsilon'_2 = 16$	$\lambda, \text{ см}$	12,74	12	11,0	9,0	7,1
	F_2	1,0	0,7	0,44	0,23	0,14
$\varepsilon'_2 = 25$	$\lambda, \text{ см}$	16,1	14,0	19,0	10,0	7,8
	F_2	1,0	0,65	0,23	0,12	0,09

Рабочая длина волны – $\lambda_{раб}$ должна находиться в диапазоне $1,15 \lambda_{кр.2} \leq \lambda_{раб} \leq 0,85 \lambda_{кр.1}$. Данное условие определяет первое и последнее значение $F_2(\lambda)$ таблице (6). Из анализа дисперсионных свойств функции F_{2max} следует, что в диапазоне распространения медленной основной волны $H_{01} - \lambda_{кр.2} < \lambda < \lambda_{тр.1}$ максимальное значение F_{2max} достигается на длине волны $\lambda_{кр.1}$, а значение F_{2min} при $\lambda_{кр.2}$, при этом данное положение не зависит от ε'_2 и d/b диэлектрической пластины. При этом максимальное влияние на величину $F_2(\lambda)$ оказывает коэффициент замедления волны. Заметим, что в данной работе рассматривается диэлектрическая пластина, удельная электропроводность которой $\sigma_2 = 0$, ($\text{tg } \delta = \sigma / \varepsilon \mu = 0$ – тангенс угла диэлектрических потерь). Как показано в работе [7], в данном случае средняя энергия электрического поля $W_э$ в поперечном сечении ПрВ неизменна в направлении распространения волны. Это приводит к тому, что если на длине волны $\lambda_{тр.1}$ наблюдается минимум энергии $W_{э1}$ в воздушной прослойке, то, соответственно, и максимум $W_{э2}$ в диэлектрической пластине. Аналогично при $\lambda_{кр.2}$ наблюдаются $W_{э2min}$ и $W_{э2max}$. В диапазоне длин волн

$\lambda_{тр.1} \leq \lambda < \lambda_{кр.1}$, в котором распространяется быстрая волна H_{10} ($K_{зам} < 1$), электрическое поле в обеих средах определяется параболическими периодическими тригонометрическими функциями. Это приводит к устранению трансформации поля в воздушной прослойке ПрВ и перераспределению энергии $W_э$ между диэлектрическими слоями. В данном случае необходимо учитывать, что в диапазоне распространения быстрой волны волновое число $K_{э1} > 0$, а это значит, что в любом сечении ПрВ $W_{э2}(\lambda) < W_{э2}(\lambda_{тр.1})$, поскольку $W_э = \text{const}$. То есть на длине волны $\lambda_{тр.1}$ достигается W_{2max} в доминантном диапазоне длин волн.

Таким образом, достижение предельно допустимого уровня $W_{э2}$ в диэлектрической пластине на длине волны $\lambda_{тр.1}$ позволяет создать критериальное условие оптимизации размеров ПрВ, обеспечивающее интенсификацию СВЧ нагрева строительных материалов: сушка шпона ценных пород дерева и паркета; строительных смесей; поляризация синтетических теплоизоляционных смол и др. Для этого необходимо определить размеры ПрВ, обеспечивающие равенство $\lambda_{раб} = \lambda_{тр.1}$, для конкретного диэлектрического материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пиманов Ю.В., Вольман В.И. Техническая электродинамика. Москва: Радиотехника, 2000. 536 с.
2. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев и др. // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (II). С. 46-57.
3. Егоров Ю.В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. Москва: Энергия, 1967. 216 с.
4. Коломейцев В.А., Ковряков П.В., Баринов Д.А. Электродинамические свойства прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в Е-плоскости.

- Москва: Радиотехника, 2020. Т. 7. С. 156-158.
5. Баринов Д.А., Коломейцев В.А., Посадский В.Н. Определение собственных электродинамических параметров прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением // Радиотехника. 2014. № 10. С. 41-46.
6. Фельдштейн А.Л., Явич А.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Москва: Сов. радио, 1967. 652 с.
7. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва: Высшая школа, 1992. 364 с.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Саратов, Россия

Дрогайцева Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Железняк Алексей Робертович – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бычков Андрей Юрьевич – соискатель кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sc. Tech., Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Saratov, Russia

Olga V. Drogaytseva – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexey R. Zheleznyak – PhD (Technical Sciences), Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Andrey Yu. Bychkov – PhD Candidate, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.11.24, принята к опубликованию 12.12.24

УДК 621.78

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

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

NONLINEAR DYNAMICS LASER SURFACING TITANIUM COATINGS

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

Выполнено экспериментальное исследование по лазерной наплавке порошковой присадки на основе титанового сплава ВТ6 в импульсно-периодическом режиме генерации излучения. Образцами являлись пластины из стали 08Х18Н10Т, на поверхность которых предварительно наносился обмазочный слой из частиц присадочного порошка и связующего вещества. Подготовленная таким образом поверхность подвергалась лазерному сканированию при различных режимах с определением основных структурных характеристик и физико-механических свойств наплавленного слоя. Рассмотрена модель Лоренца для описания процесса лазерной наплавки порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08Х18Н10Т. В качестве параметров модели рассматривались такие режимы обработки как мощность импульсов, скорость наплавки и скважность. Фазовыми переменными являлись шероховатость поверхности, микротвердость и фазовый состав, а переменной состояния являлась координата вдоль длины наплавки. Параметры модели идентифицировались по экспериментальным данным шероховатости поверхности, измеряемой на базовой длине 4 мм.

Ключевые слова: лазерная наплавка, присадочный порошок ВТ6, нержавеющая сталь, характеристики поверхности, моделирование процесса наплавки по методу Лоренца

The experimental research deals with laser cladding of the powder additive based on titanium alloy VT6 in the pulse-periodic mode of radiation generation. The samples were plates made of 08X18H10T steel, where the additive powder particles and the binder are preliminary coated over the surface. The given surface is subjected to laser scanning under various modes. The main structural characteristics, including the physical and mechanical properties of the clad layer are determined. The Lorentz model is used to describe the process of laser cladding of titanium alloy powder VT6 on the stainless steel 08Kh18Ni10T. The processing modes, such as pulse power, surfacing speed and borehole, are considered as the model parameters. The phase variables are surface roughness, microhardness, and phase composition, whereas the state variable is the coordinate across the cladding length. The model parameters are identified using the experimental data relating the surface roughness which is measured based on the length of 4 mm.

Keywords: laser surfacing, VT6 filler powder, stainless steel, surface characteristics, modeling of the surfacing process using the Lorentz method

Введение

Технология лазерной наплавки и термообработки в настоящее время широко при-

меняется в различных отраслях промышленности и позволяет наносить на поверхность самые разнообразные материалы (вы-

сокотвердые, жаропрочные, жаростойкие, изоляционные, биосовместимые, тугоплавкие и т. д.) [1-7]. Форма и размеры наплаваемых (присадочных) материалов могут отличаться и зависеть от назначения функционального поверхностного слоя. Присадки могут выполняться в виде мелкодисперсных порошков и их механических смесей, проволоки, прутка, ленты, гранул, фольги. Режим обработки предусматривает использование импульсной либо непрерывной генерации фокусируемого излучения, а активными средами при накачке могут являться как твердофазные кристаллические материалы, так и газы. Разработка и применение современных технологических лазеров делают возможной высокоэффективную обработку поверхности различных деталей (от малогабаритных (миниатюрных) до крупногабаритных). Геометрия деталей также может отличаться и иметь форму сферы, цилиндра, пластины, конуса и т. п., а обрабатываемая поверхность характеризоваться криволинейностью и сложностью профиля. Подбор режимов лазерной обработки является определяющим фактором при формировании высококачественного модифицируемого слоя поверхности. Задаваемые режимы оказывают ключевое влияние на процесс структурообразования обрабатываемой поверхности и на получаемые ее свойства и эксплуатационные характеристики.

Процесс формирования покрытий при импульсной лазерной обработке является сильно неравновесным и может быть описан только с использованием методов нелинейной динамики, случайных процессов и неравновесной термодинамики. Существующие модели используют в основном термодинамический метод, описывающий тепловые и металлургические процессы. Модели нелинейной динамики процессов наплавки не известны. Модель Лоренца может описать детерминированный хаос, в том числе характер рельефа наплавленного слоя. Детерминированность свойств наплавленного слоя определяется заданным режимом наплавки. В зависимости от режимов наплавки могут быть получены как гладкие, так и пористые слои. Поэтому выбор режимов по адекват-

ным моделям позволяет существенно уменьшить трудоемкость выполнения экспериментальных исследований. В связи с этим целью работы является идентификация параметров модели по экспериментальным данным свойств наплавленного слоя.

Методика и техника эксперимента

Материалом опытных образцов являлась хромоникелевая сталь марки 08X18H10T, из которой изготавливались пластины размерами 15×20×2 мм. Пластины подвергались предварительной обработке поверхности путем ультразвуковой очистки в лабораторной ультразвуковой ванне «Кристалл-2.5» при интенсивности ультразвуковых колебаний 1,2 Вт/см², частоте колебаний 22 кГц и продолжительности 30 мин. В качестве моющей технологической среды использовался спиртовой раствор.

В качестве присадочного материала применялся порошок титанового сплава ВТ6 дисперсностью 50-70 мкм, который равномерно тонким слоем (≈200 мкм) распределялся по поверхности опытных пластин.

Процесс лазерной наплавки проводился на автоматизированной установке LRS-50A в импульсно-периодическом режиме генерации излучения.

Режимы обработки подбирались в условиях изменения следующих параметров:

- мощности излучения при фокусном расстоянии 98 мм и 100 мм;
- количества технологических проходов;
- изменения шага следования импульсов и количества технологических проходов с установлением влияния на микроструктуру наплавленного слоя;
- изменения частоты следования импульсов для определения влияния на качество обработанной поверхности.

Для определения фазового состава получаемых порошковых покрытий применялся дифрактометр ARL X'TRA.

Профилометрические исследования проводились на цифровом профилометре Mitutoyo SJ-410 с определением параметров шероховатости поверхности R_a , R_z , R_{max} и S_m .

Микротвердость наплавленных покрытий определялась на микротвердомере ПМТ-3м.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

В процессе наплавки титанового порошка были определены наиболее предпочтительные технологические режимы обра-

ботки, обеспечивающие получение наплавленного слоя с высокой степенью проплавления частиц и равномерностью покрытия поверхности расплавом присадочного материала (см. таблицу).

Экспериментальные режимы,
выбранные для лазерной импульсной наплавки порошка
титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08Х18Н10Т

Напряжение на лампе накачки, В	Мощность, Вт	Длительность импульсов, мс	Частота следования импульсов, Гц	Кол-во проходов	Шаг импульсов, мм	Фокусное расстояние, мм
325	700	1	10	3	0,1	98
325	700	1	10	7	0,2	98
325	700	1	10	12	0,3	98

При рентгенофазовом анализе было установлено, что наплавленный слой состоит из смеси фаз α -Fe, γ -Fe, Fe, Fe_2O_3 , Fe_3C , Cr_2O_3 , Fe_3O_4 , Fe_2C , TiO_2 (рис. 1-3). Соединениями, повышающими механическую прочность поверхностного слоя и существенно увеличивающими величину микротвердости, являются оксид хрома и оксиды титана в виде кристаллических решеток рутила и анатаза [8], причем доля оксидов титана существенно увеличивается с повышением числа проходов. Образование данных фаз является результатом окисления хрома и титана при тепло-

вых вложениях импульсного излучения, когда кислород воздуха вступает в реакционное взаимодействие с указанными металлами, находящимися в термически активном состоянии, с возникновением металлооксидных соединений, характеризующихся повышенной коррозионной стойкостью, твердостью и механической прочностью. Происходит преобразование металлического присадочного порошка в металлооксидную керамику, которая составляет модифицированный наплавленный слой с высокими физико-механическими свойствами.

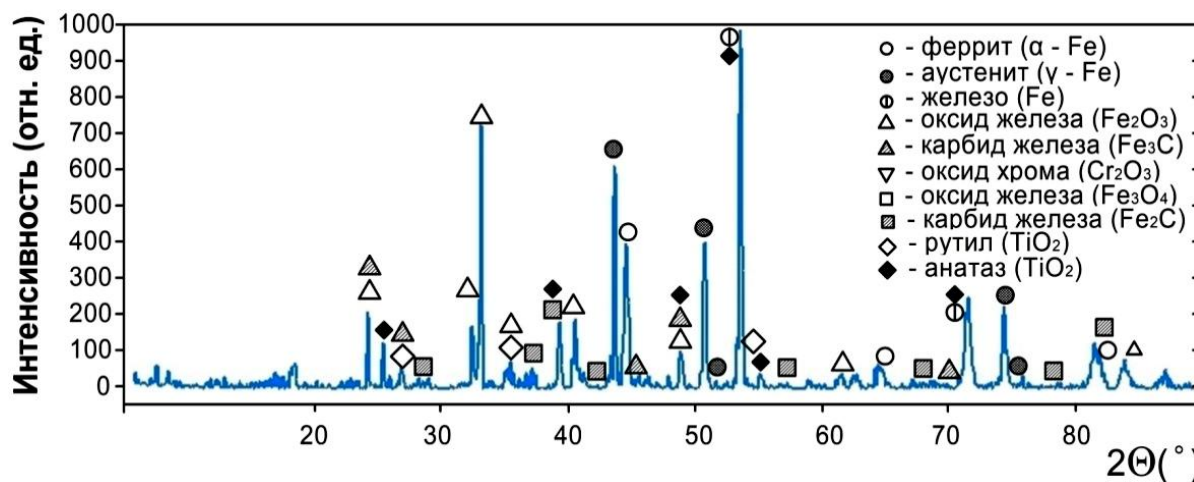


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образца № 1
(режимы наплавки: шаг следования импульсов 0,1 мм, количество проходов 3,
мощность излучения 700 Вт)

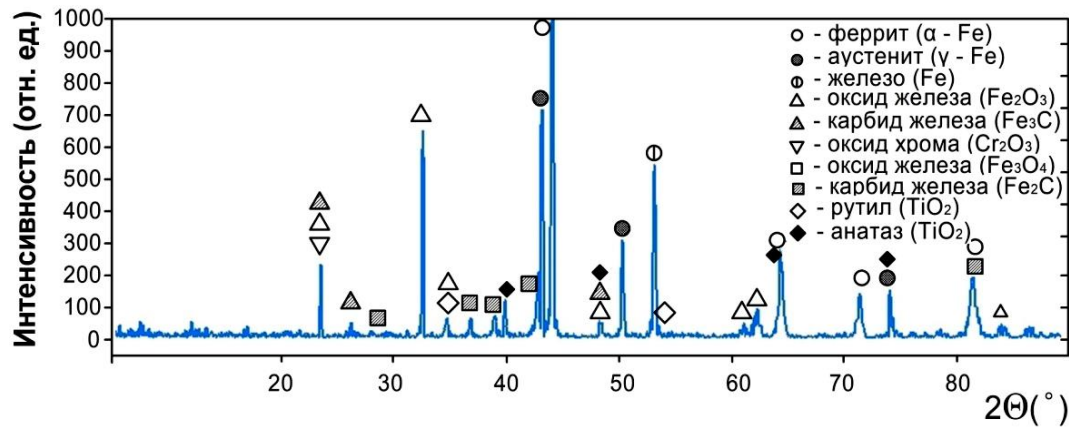


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма образца № 2
(режимы наплавки: шаг следования импульсов 0,2 мм, количество проходов 7, мощность излучения 700 Вт)

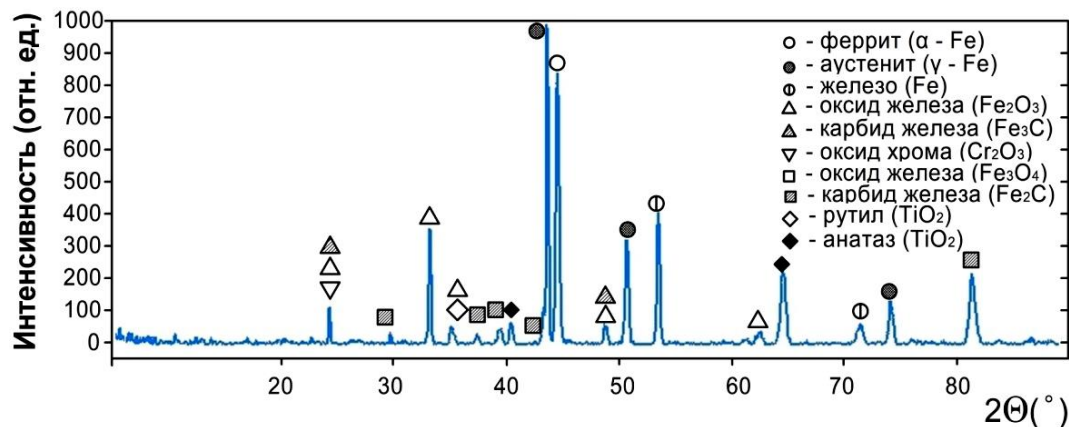


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца № 3
(режимы наплавки: шаг следования импульсов 0,3 мм, количество проходов 12, мощность излучения 700 Вт)

Профилометрические измерения и оптико-микроскопический анализ показали, что увеличение шага следования импульсов и количества сканирований поверхности при одинаковых значениях мощности, частоты и длительности импульсного излучения приводит к росту размеров пятен фокусировки и повышению структурной гетерогенности, сопровождающейся развитием рельефа поверхности. Профиль поверхности приобретает выраженный геометрически неоднородный характер с повышенными значениями высоты и шага микронеровностей.

При определении микротвердости наплавленного слоя установлено, что образец № 1 имеет постоянные значения микротвердости на разных участках наплавленного слоя. Образцы № 2 и № 3 на периферийной части пятен фокусировки имеют

бóльшие значения микротвердости, чем в центральной их части. Микротвердость поверхности образца № 1 составляла среднее значение 4,8 ГПа, образца № 2 – 6,1 ГПа, образца № 3 – 6,8 ГПа при микротвердости контрольного (не обработанного) стального образца 1,8 ГПа.

Идентификация параметров модели по экспериментальным данным

Модель Лоренца нелинейной динамики описывает как периодические, так и хаотические состояния систем и представляет собой три дифференциальных уравнения с тремя координатами системы в фазовом пространстве и тремя параметрами. В качестве фазовых координат состояния наплавленного слоя возьмем доступные экспериментальному определению шероховатость поверхно-

сти, микротвердость и фазовый состав покрытия в конечном состоянии. В качестве параметров выберем технологические режимы наплавки: скорость наплавки, мощность и скважность импульсов. Скорость наплавки является комплексным параметром и равна произведению частоты следования импульсов на диаметр пятна и на коэффициент перекрытия точек, связанный с шагом следования импульсов. Мощность импульса характеризует тепловое взаимодействие пучка с покрытием и подложкой, а скважность – время и периодичность взаимодействия. Отношение энергии импульса к скважности равно средней энергии, вводимой в покрытие при наплавке. Переменной состояния является линейная координата вдоль длины наплавленного слоя (скорости наплавки).

Правые части уравнений Лоренца имеют вид

$$D(t, x) = \begin{bmatrix} -\sigma \cdot (x_0 - x_1) \\ -x_0 \cdot x_2 + r \cdot x_0 - x_1 \\ x_0 \cdot x_1 - b \cdot x_2 \end{bmatrix},$$

где x – координаты состояния системы; r, b, σ – параметры; t – переменная состояния (расстояние вдоль длины наплавки).

Система решается с помощью оператора Mathcad:

$$F := \text{rkfixed}(x, 0, L_o, N_s, D),$$

где x – фазовые координаты состояния наплавки (высота рельефа $F1$, фазовый состав $F2$ и микротвердость $F3$); L_o – общая длина наплавки; N_s – число шагов вдоль наплавки; $\Delta t = \frac{L_o}{N_s}$ – длина одного шага.

Длина огибающей рельефа равна

$$L_{p1}(a) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^a \sqrt{1 + F_p(n)^2},$$

где $F_p(n) = \frac{1}{\Delta t} \cdot (F1(n+1) - F1(n))$ – производная линии огибающей рельефа; n – номер шага вдоль наплавки.

Среднеквадратическая высота микронеровностей равна

$$R_z = \sqrt{\frac{1}{N_s} \cdot \sum_{n=0}^{N_s} \left(\frac{F1(n)}{m1} \right)^2},$$

где $m1$ – масштабный коэффициент.

Среднеквадратическая микротвердость определяется как безразмерная величина

$$H_m = \sqrt{\frac{1}{N_s} \cdot \sum_{n=0}^{N_s} \left(\frac{F3(n)}{m3} \right)^2}.$$

Корреляционная функция для высоты микронеровностей равна

$$K1r(n_x) = \sum_{n=0}^{N_s-n_x} [F1((n+n_x)) \cdot F1(n)],$$

где n_x – длина корреляции.

Все переменные в системе являются безразмерными по отношению к базовому режиму обработки.

Идентификация параметров модели проводилась по экспериментальным данным определения шероховатости поверхности (среднеквадратичным отклонениям высоты микронеровностей профиля R_z) [8].

На рис. 4, 5 показаны зависимости высоты микронеровностей, микротвердости и корреляционной функции от переменной состояния (длины наплавки) для следующего режима: скорость наплавки 1 мм/с, число технологических проходов 7 и мощность излучения 300 Вт, рассчитанные по модели.

Длина «береговой линии» профиля составляет $L_{p1} = 4,723 \cdot 10^3$ м, среднеквадратическое отклонение равно $R_z = 8,841$ мкм, средняя микротвердость достигает значения $H_m = 28,598$.

Наблюдается существенная корреляция фазовых переменных по длине наплавки, что является следствием постоянства режимов обработки.

При увеличении мощности импульсного излучения до 700 Вт периодичность структуры сохраняется и средние параметры увеличиваются до значений:

$$L_{p1} = 1,118 \cdot 10^4 \text{ м}; \quad R_z = 13,842 \text{ мкм}; \\ H_m = 68,424.$$

При увеличении скорости лазерной наплавки до 3 мм/с и числа проходов до 12 при мощности 700 Вт изменение рельефа поверхности и микротвердости приобретает хаотический характер (рис. 6).

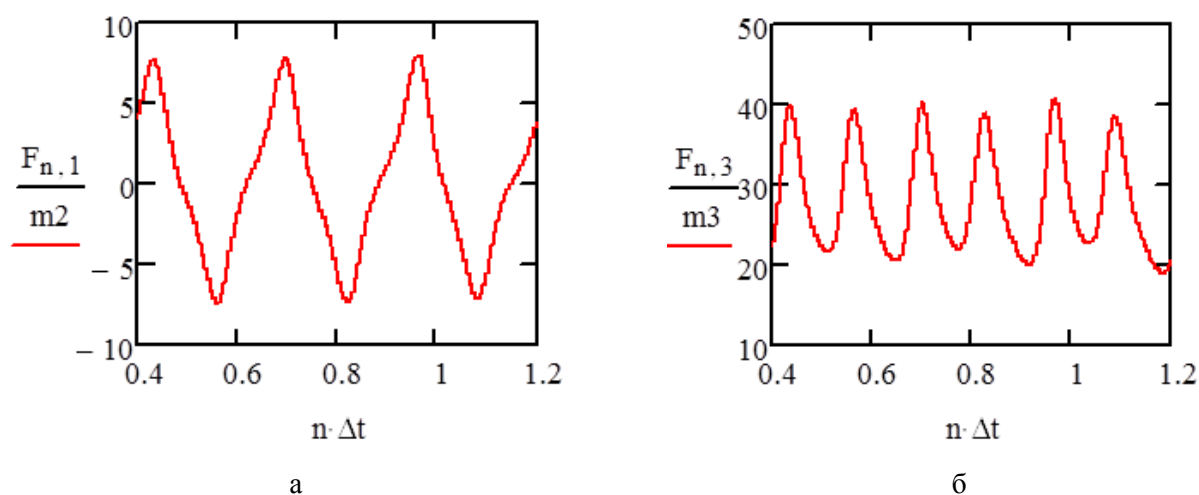


Рис. 4. Зависимости высоты микронеровностей (а) и микротвердости (б) от длины наплавки (скорость наплавки 1 мм/с, число проходов 7, мощность излучения 300 Вт)

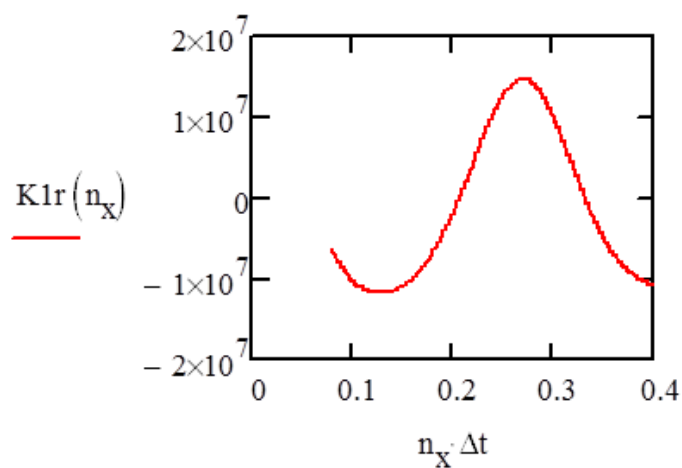


Рис. 5. Зависимость корреляционной функции от длины корреляции

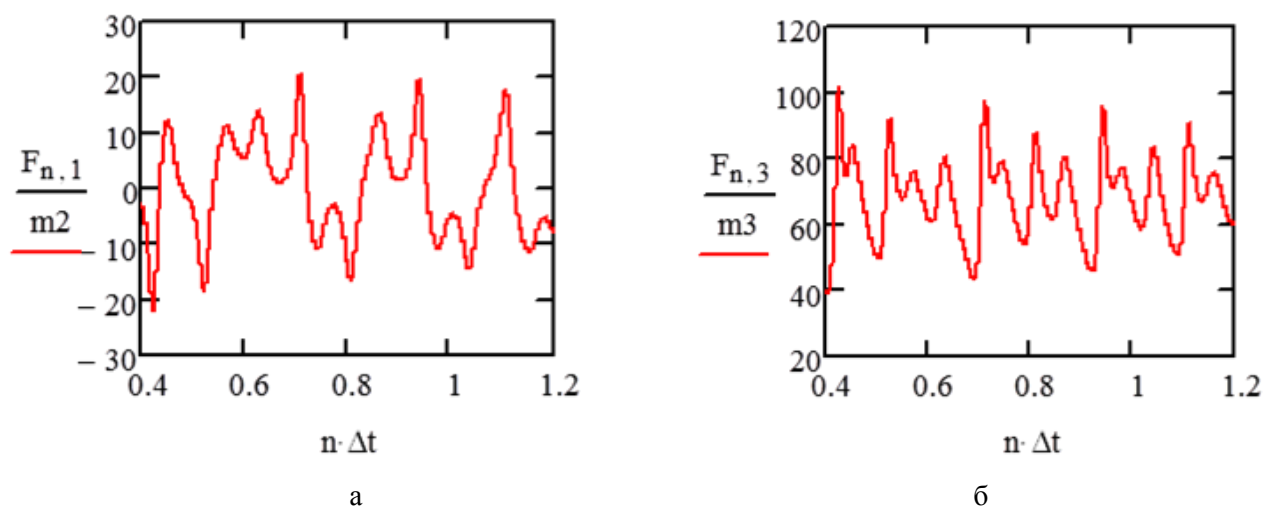


Рис. 6. Зависимости высоты микронеровностей (а) и микротвердости (б) от длины наплавки (скорость наплавки 3 мм/с, число проходов 12, мощность излучения 700 Вт)

Средние параметры наплавленного слоя равны:

$$L_{p1} = 1,895 \cdot 10^4 \text{ м};$$

$$R_z = 18,181 \text{ мкм};$$

$$H_m = 68,963.$$

Длина линии и среднеквадратическое отклонение микронеровностей возрастают, а спектр рельефа существенно меняется в зависимости от режимов обработки. Спектр рассчитывался с помощью функции *cfft* Mathcad (рис. 7).

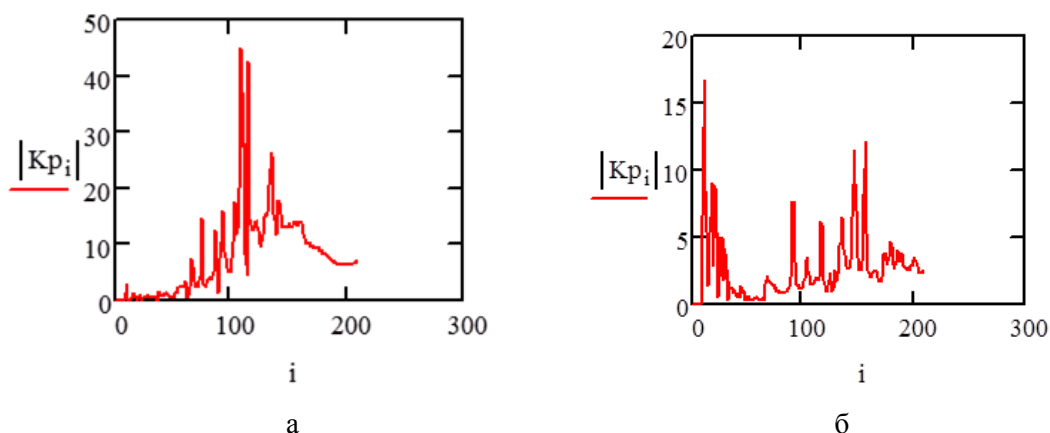


Рис. 7. Спектр рельефа в зависимости от длины волны:

а – скорость наплавки 1 мм/с, число проходов 7, мощность излучения 300 Вт;

б – скорость наплавки 3 мм/с, число проходов 12, мощность излучения 700 Вт

При интенсификации режимов увеличиваются коротковолновые гармоники.

Результаты модели согласуются с экспериментальными данными исследований [8], где с увеличением скорости с 1 до 3 мм/с и числа проходов с 7 до 12 среднеквадратическое отклонение микронеровностей возрастает с 6,5 мкм до 10,7 мкм, а средняя микротвердость – с 4,8 ГПа до 6,8 ГПа. Радиус пучка составлял 1 мм, длительность импульса 1 мс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия импульса 0,42 Дж. Скорость наплавки менялась за счет увеличения шага следования импульсов с 0,1 мм до 0,3 мм, т.е. с уменьшением коэффициента перекрытия с 0,9 до 0,7.

Экспериментально установлено, что при увеличении интенсивности обработки содержание титана увеличивается от центра к периферии наплавки (в поперечном сечении). На всей поверхности наплавленного слоя образца № 1 (шаг следования импульсов 0,1 мм, количество проходов 3) преобладает Ti, что говорит об однородности поверхностного слоя. Образцы № 2 (шаг следования импульсов 0,2 мм, количество проходов 7) и № 3 (шаг следования им-

пульсов 0,3 мм, количество проходов 12) получили неоднородную структуру наплавленного слоя. На периферийной части пятна фокусировки преобладает Ti. В центральной части пятна фокусировки заметно снижение количества Ti и возрастание Fe и Cr. Это обусловлено тем, что при лазерной наплавке используется импульс, который создает мощную ударную волну и сдвигает Ti на периферийную часть пятна фокусировки. Это отклонение содержания титана описывается фазовой переменной модели F2.

Заключение

Таким образом, параметры модели идентифицированы как мощность импульсов, скорость наплавки и скважность импульсов. Скорость наплавки включает произведение частоты следования, диаметра луча и степени перекрытия импульсов. С увеличением этих параметров развитость рельефа возрастает до появления пористости. Модель описывает шероховатость поверхности, содержание оксида титана в поперечном сечении наплавки и микротвердость по длине наплавки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Андряхин В.М.** Процессы лазерной сварки и термообработки / отв. ред. В.С. Майоров. Москва: Наука, 2006. 176 с.
2. **Крылова С.Е.** Влияние технологических параметров газопорошковой лазерной наплавки на структурные характеристики восстановленного поверхностного слоя коррозионностойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 10 (748). С. 35-40.
3. **Веденов А.А., Гладуш Г.Г.** Физические процессы при лазерной обработке материалов. Москва: Энергоатомиздат, 2015. 208 с.
4. Влияние карбида бора на свойства наплавленного металла на основе дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали / Е.Н. Еремин, А.С. Лосев, А.Е. Маталосова и др. // *Омский научный вестник*. 2017. № 4 (154). С. 21-24.
5. Влияние наномодифицирующих добавок на свойства многослойного композиционного покрытия, получаемого при лазерной наплавке / А.Н. Черепанов, А.М. Оришич, В.Е. Овчаренко и др. // *Физика металлов и металловедение*. 2019. Т. 120. № 1. С. 107-112.
6. Влияние режимов селективного лазерного воздействия на пористость образцов из порошков кобальта, хрома и молибдена / Н.А. Сапрыкина, А.А. Сапрыкин, Ю.П. Шаркеев и др. // *Транспортное машиностроение*. 2021. № 8. С. 22-28.
7. Патент РФ на изобретение № 2786263. Способ лазерного легирования инструментальной стали порошками карбида бора и алюминия / А.Б. Лупсанов, У.Л. Мишигдоржийн, А.В. Номоев, И.А. Южаков, С.Л. Лысых. Опубл. 19.12.2022 г.
8. Лазерная наплавка порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08Х18Н10Т при импульсном воздействии излучения / И.В. Родионов, П.Н. Устинов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц // *Вопросы электротехнологии*. 2023. № 4 (41). С. 40-50.

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

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

Вавилина Надежда Александровна – старший преподаватель кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

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

Статья поступила в редакцию 26.11.24, принята к опубликованию 12.12.24

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.315.616.7: 679.748

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ КАБЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИХЛОРОПРЕНА НА СОВРЕМЕННЫЙ МАТЕРИАЛ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

С.М. Дудник, К.А. Звезденков, Т.А. Меркулова,
М.В. Колыхаева, И.В. Муратов, Д.В. Новиков, Д.А. Харченко

MODERN INSULATION MATERIALS WITH IMPROVED ELECTRICAL PROPERTIES FOR POLYCHLOROPRENE SHEATHED CABLES

S.M. Dudnik, K.A. Zvezdenkov, T.A. Merkulova,
I.V. Muratov, M.V. Kolykhaeva, D.V. Novikov, D.A. Kharchenko

Приведены результаты исследования материала оболочки кабеля на основе опытной резины из хлорированного полиэтилена, разработанной в ОАО «ВНИИКП», проведены сравнения с серийной кабельной оболочкой на основе полихлоропрена. Выявлены существенные преимущества резины на основе хлорированного полиэтилена по стойкости к тепловому старению и стойкости к агрессивным средам. Проведенные исследования подтверждают, что применение ХПЭ позволит расширить ассортимент хлорсодержащих каучуков, применяемых при производстве проводов и кабелей.

Ключевые слова: сшитые кабельные материалы, резина на основе полихлоропрена, резина на основе хлорированного полиэтилена, теплостойкость, масло- и бензостойкость, морозостойкость

Для подавляющего большинства кабелей специального назначения, эксплуатируемых в условиях, когда необходимо обеспечить требования по масло- и бензостойкости,

The paper presents the results of research of the cable sheathing material based on the experimental chlorinated polyethylene rubber developed by JSC VNI-ICP and comparison with the material used in the production of the serial polychloroprene sheathed cables. The focus is made on significant advantages of the rubber based on chlorinated polyethylene regarding its resistance to thermal aging and aggressive environments. The conducted investigations confirm that the use of chlorinated polyethylene will enable extending the present range of chlorine-containing rubbers used in manufacturing wires and cables.

Keywords: cross-linked cable materials, polychloroprene rubber, chlorinated polyethylene rubber, heat resistance, oil and petrol resistance, anti-freezing property

стойкости к пониженной температуре, озоностойкости и пожаробезопасности, оболочку традиционно изготавливают из резины на основе полихлоропренового каучука (ПХ).

Данная оболочка обеспечивает допустимую эксплуатационную температуру кабельного изделия до плюс 70 °С.

Однако, учитывая тенденции к повышению эксплуатационных свойств кабельных изделий и появления новых полимерных материалов для изоляции жил, позволяющих повысить эксплуатационную температуру кабельных изделий до плюс 90 °С, необходимо применение и более теплостойкой оболочки. Резина на основе ПХ каучука, применяемая в настоящее время для оболочки, не обеспечивает требуемого срока службы кабельных изделий, так как обладает недостаточной теплостойкостью. Кроме того, существенным недостатком резин на основе данного каучука является подверженность резиновых смесей к преждевременной вулканизации, что создает трудности при их переработке и наложении. С учетом данных обстоятельств была необходима разработка нового материала оболочки с улучшенным комплексом свойств.

В последние годы на заводах РТИ и других предприятиях резинотехнической промышленности увеличиваются объемы потребления хлорированного полиэтилена (ХПЭ). Хлорированный полиэтилен получают путем обработки полиэтилена газообразным хлором, при этом возможно получение ХПЭ с различной степенью хлорирования. Свойства получаемого полимера в зависимости от степени хлорирования будут значительно разниться. Так, при содержании хлора до 15 % получают термопластичный ХПЭ в большей степени напоминающий обычный полиэтилен. В диапазонах хлорирования 15-20% появляется больше аморфной (подвижной) части и ХПЭ из термопластичного превращается термоэластопласт. В диапазонах хлорирования 25-45% ХПЭ принято считать каучуком (эластомером), именно при использовании данного ХПЭ получают резины. ХПЭ со степенью хлорирования выше 45 % опять становится жестким пластиком [1]. С увеличением степени хлорирования улучшается негорючесть, масло- и бензостойкость, однако при этом снижается морозостойкость и теплостойкость изделий из

ХПЭ. Механизм вулканизации эластомеров на основе ХПЭ существенно отличается от традиционных хлорсодержащих каучуков. Основным вулканизирующим агентом для этого полимера являются пероксиды [2, 3].

Резины на основе ХПЭ превосходят резины на основе ПХ по комплексу свойств: масло- и бензостойкости, стойкости к распространению горения, теплостойкости. Применение резин на основе хлорированного полиэтилена способно обеспечить температуру эксплуатации кабельного изделия до плюс 90 °С.

По результатам анализа данных приведенных в ТУ 16.К71-098-90 «Резина и резиновые смеси для кабельных изделий» и ГОСТ ИЕС 60092-360-2021 «Материалы для изоляции и оболочки для кабелей силовых, контрольных, управления, связи и передачи данных, используемых на судах, на подвижных или стационарных береговых установках» специалистами ОАО «ВНИИ КП» были сформулированы основные требования для резины на основе хлорированного полиэтилена с учетом уже имеющихся требований, предъявляемых к аналогичным материалам. Основные требования приведены в табл. 1.

Помимо изложенных требований, приведенных в табл. 1, важное значение имеют также и технологические параметры. Известно [4], что резиновые смеси на основе ПХ подвержены преждевременной вулканизации (подвулканизации).

Подвулканизация является свойственной проблемой для резиновых смесей на основе ПХ, которую пытаются решать разработчики рецептур резиновых смесей [5, 6]. Кабельные заводы, работающие с резиновыми смесями на основе ПХ, постоянно сталкивались с проблемами при их переработке и наложении. Причина заключается в том, незначительное повышение температурного профиля даже на пару градусов приводит к повышению скорости вулканизации, при этом резиновая смесь начинает подвулканизовываться [7, 8] вследствие чего повышается вязкость резиновой смеси и образуются частицы сшитой композиции, из-за чего смесь становится

шероховатой и теряет способность не должно приводить к преждевременной к наложению. Повышение температуры вулканизации резиновой смеси.

Таблица 1 – Требования, предъявляемые к масло-, бензостойким резинам

Параметр	Требования ГОСТ ИЕС 60092-360 тип SH	Требования ТУ 16.К71- 098-90 тип РШН-2	Требования к разрабаты- ваемой ре- зине ХПЭ
Прочность при растяжении, МПа, не менее	10	5,88	10
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	250	275	300
Относительная остаточная деформация, %, не более	–	35 40*	40
Стойкость к тепловому старению при температуре (100±2) °С в течение:	168 ч.	72 ч.	168 ч.
– изменение условной прочности при разрыве, %	±30	±20	±20
– изменение относительного удлинения при разрыве, %	±30	±35	±30
Стойкость к дизельному топливу при температуре (100±2) °С –24 часа:			
– изменение условной прочности при разрыве, %	–	–	±30
– изменение относительного удлинения при разрыве, %	–	–	±30
Стойкость к индустриальному маслу при температуре (100±2) °С – 24 часа:			
– изменение условной прочности при разрыве, %	–	±20	±25
– изменение относительного удлинения при разрыве, %	–	±25	±30
Озоностойкость	0,025 % 24 ч. отсутствие трещин	0,0015 % 3 ч. отсутствие трещин	0,025 % 24 ч. отсутствие трещин
Нижняя предельная эксплуатационная температура:			
– при подвижной прокладке	минус 15	минус 30	минус 50
– при стационарной прокладке	–	минус 40	минус 60
Стойкость к распространению горения			
– распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей ГОСТ ИЕС 60332-3-22-2011	Не должна распростра- нять горение по кат. А	–	Не должна распростра- нять горение по кат. А
– стойкость оболочки кабелей к нераспространению горения по ГОСТ 7866.1-76 (п.п. 4.5.5)	Не должна распростра- нять горение	Не должна распростра- нять горение	Не должна распростра- нять горение

* Требования для резин на основе хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ) по ТУ 16.К71-098-90. Принято решение также остановиться на значении не более 40 % для резин на основе хлорированного полиэтилена (ХПЭ)

Подвулканизация резин характеризуется изменением вязкости. Считается, что изменение минимальной вязкости на 5 условных единиц Муни является началом процесса формирования пространственной сетки (сшивания), при этом конец процесса подвулканизации фиксируется при изменении минимальной вязкости на 35 ед. Муни. Время, за которое вязкость с 5 ед. Муни возросла до 35 ед. Муни, счита-

ется платом подвулканизации, и чем это плато шире, тем резиновая смесь является более стойкой к процессу подвулканизации [9].

Ввиду возможности подвулканизации резин для стабильности технологического процесса было проведено сравнение соответствующих характеристик для резиновых смесей на основе ПХ и ХПЭ. Результаты приведены на рис. 1.

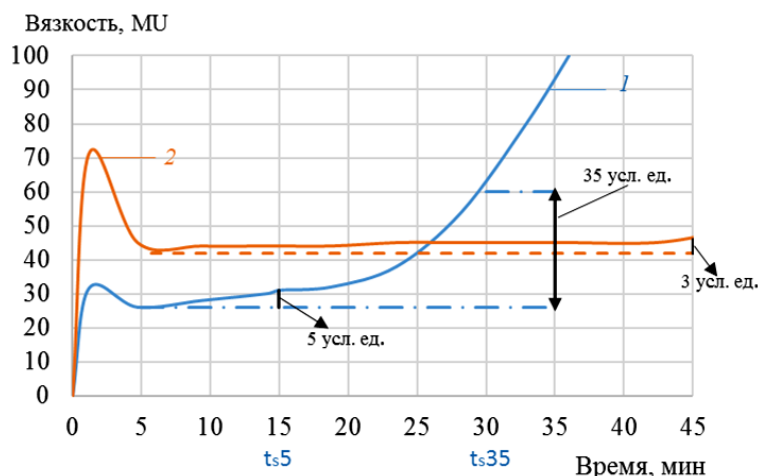


Рис. 1. Подвулканизация исследованных резиновых смесей при температуре 120 °С:

1 – резиновая смесь на основе ПХ; 2 – резиновая смесь на основе ХПЭ

Примечание: t_{55} – время индукционного периода вулканизации, при котором произошло изменение минимальной вязкости на 5 усл. ед.; t_{35} – время индукционного периода вулканизации, при котором произошло изменение минимальной вязкости на 35 усл. ед.

Проанализировав полученные данные, можно отметить, что у резиновой смеси на основе ПХ (1) подвулканизация начинается уже на $t_{55} = 15$ мин и заканчивается на $t_{35} = 28,8$ мин (t_{55}), в то время как у резиновой смеси на основе ХПЭ (2) отсутствует начало подвулканизации, поскольку минимальная вязкость изменилась всего на 3 усл. ед.

Были проведены сравнительные испытания серийной оболочки на основе полихлоропрена и исследована оболочка на основе хлорированного полиэтилена по рецептуре разработанной в ОАО «ВНИИ КП». Были определены основные параметры данных резин, а именно: физико-механические характеристики, стойкость к тепловому старению, стойкость к агрессивным средам, сопротивление раздиру, стойкость к пониженным температурам.

Физико-механические характеристики определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ ИЕС 60811-501. Физико-механические характеристики после теплового старения определяли в соответствии с ГОСТ ИЕС 60811-401. Проверку физико-механических характеристик после воздействия смазочного масла марки И-40А (ГОСТ 20799) и дизельного топлива марки ДТ-Л-К5 (ГОСТ 32511) определялось в соответствии с ГОСТ ИЕС 60811-404. Испытания на сопротивление раздиру проводились в соответствии с ГОСТ 23016. Испытания на стойкость к изгибам с одновременным закручиванием при отрицательной температуре проводили по ГОСТ 33326-2015 (п. 8.4.3). Результаты данных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты сравнительных испытаний материала оболочки на основе ПХ и материала оболочки на основе ХПЭ

Параметр	Материал оболочки на основе ПХ	Материал оболочки на основе ХПЭ
Удельный вес, г/см ³	1,58	1,47
Прочность при растяжении, МПа	13,3	13,3
Относительное удлинение при разрыве, %	397	353
Относительная остаточная деформация, %	28	35
Стойкость к тепловому старению при 100° С в течение 72 ч: – изменение условной прочности при разрыве, % – изменение относительного удлинения при разрыве, %	–13 –25	0 –5
Стойкость к дизельному топливу при 100° С в течение 24 ч: – изменение условной прочности при разрыве, % – изменение относительного удлинения при разрыве, %	–37 –36	–11 –19
Стойкость к индустриальному маслу при 100° С в течение 24 ч: – изменение условной прочности при разрыве, % – изменение относительного удлинения при разрыве, %	–17 –20	9 –21
Раздир (полоски), Н	40	46
Озоностойкость концентрация 0,025 %, 24 ч	Трещин нет	Трещин нет
Морозостойкость по Эргометру	Минус 35	Минус 40
Проверка стойкости к изгибам с одновременным закручиванием после выдержки при температуре минус 50 °С в течение 4 ч., изгибам на угол $\pm 0,07\pi$ рад в течение (50 $\pm$ 3) минут	–	На поверхности образцов трещин, видимых при внешнем осмотре, нет
– распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей ГОСТ ИЕС 60332-3-22-2011 Категория А	Не выдержал	Выдержал

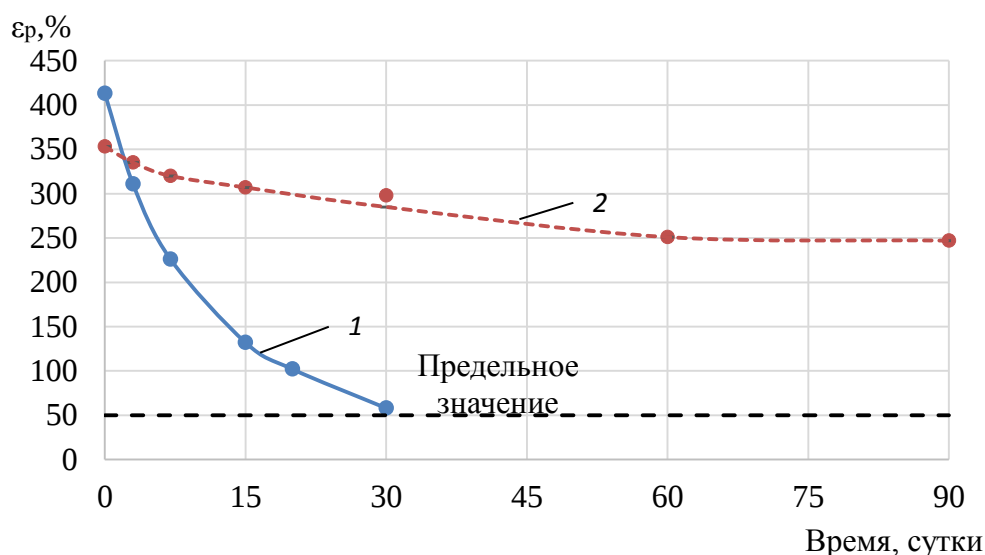


Рис. 2. Снижение относительного удлинения в процессе теплового старения при температуре 100° С:
1 – серийная резина на основе ПХ; 2 – опытная резина на основе ХПЭ

Как видно из полученных данных, оболочка на основе ХПЭ по физико-механическим показателям находится на одном уровне с серийной на основе ПХ, при этом превосходит серийную по стойкости к тепловому старению и дизельному топливу, не распространению горения и морозостойкости, что полностью соответствует предъявляемым требованиям.

Также было проведено длительное тепловое старение при температуре 100 °С до момента выхода из строя одной из оболочек; данные приведены на рис. 2.

Из приведенных данных по снижению относительного удлинения в процессе теплового старения (рис. 2) наглядно видно, что резина на основе ХПЭ является более теплостойкой по сравнению с резиной на основе ПХ. Таким образом, в данной ра-

боте было установлено, что опытная резина на основе хлорированного полиэтилена соответствует современным предъявляемым требованиям и по ряду требований превосходит серийную резину на основе ПХ. Применение хлорированного полиэтилена позволит расширить ассортимент хлорсодержащих каучуков, применяемых в кабельной промышленности. Технологические преимущества ХПЭ позволяют перерабатывать его в летние периоды при высокой температуре окружающей среды не опасаясь подвулканизации, что является технологической проблемой в случае применения резин на основе ПХ. В последующих работах планируется рассмотреть тепловое старение хлорированного полиэтилена при нескольких температурах для оценки параметров надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ронкин Г.М.** Современное состояние производства и применения хлорированных полиолефинов // Обзоры по важнейшим научным и научно-техническим проблемам химической промышленности в десятой пятилетке. Москва: НИИТЭХИМ, 1979. Вып. 1 (3). 81 с.

2. <https://rubberworld.com/cpe-a-unique-polymer-for-rubber-and-plastics-extrusion/>.

3. Изучение влияния шунгита на свойства резин на основе хлорированного полиэтилена / С.М. Дудник, Е.Э. Потапов, К.А. Звезденков, Т.А. Меркулова, С.В. Алимпиев // Каучук и резина. 2024. № 83. С. 48-53.

4. **Блох Г.А.** Органические ускорители вулканизации и вулканизирующие системы для эластомеров. Ленинград: Химия, 1978. 240 с.

5. **Резниченко С.В., Морозов Ю.Л.** Большой справочник резинщика. Ч. 1. Ка-

учуки и ингредиенты. Москва: ООО «Издательский центр «Техинформ» Международной академии информатизации, 2012. 744 с.

6. **Марк Дж., Эрман Б., Эйрич Ф.** Каучук и резина. Наука и технология / под ред. А.А. Берлина и Ю.Л. Морозова. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. 768 с.

7. **Ohm R.F.** New Developments in Cross-linking Halogen-containing Polymers // Rubber World. Oct. 1998. № 1. Vol. 209. P. 26-32.

8. **Robert C. Klingender** Handbook of Specialty Elastomers. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 558 с.

9. **Дик Дж.С.** Как улучшить резиновые смеси. 1800 практических рекомендаций для решения проблем / пер. с англ. под ред. Б.Л. Смирнова. 2-е изд. Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2016. 352 с.

Дудник Сергей Максимович – аспирант, инженер ОАО «ВНИИКП», Москва

Звезденков Константин Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией ОАО «ВНИИКП», Москва

Sergei M. Dudnik – Postgraduate Student, Engineer at JSC VNIKP, Moscow

Konstantin A. Zvezdenkov – PhD (Technical Sciences), Head of laboratory at JSC VNIKP, Moscow

Меркулова Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИ КП», Москва

Муратов Илья Витальевич – аспирант, инженер ОАО «ВНИИ КП», Москва

Колыхаева Мария Валерьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИ КП», Москва

Новиков Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, заведующий отделением ОАО «ВНИИ КП», Москва

Харченко Дмитрий Александрович – заведующий лабораторией ОАО «ВНИИ КП», Москва

Tatiana A. Merkulova – PhD (Technical Sciences), Senior Researcher at JSC VNIIPK, Moscow

Ilya V. Muratov – Postgraduate Student, Engineer at JSC VNIIPK, Moscow

Mariia V. Kolykhaeva – PhD (Technical Sciences), Senior Researcher at JSC VNIIPK, Moscow

Dmitrii V. Novikov – PhD (Technical Sciences), Division Manager at JSC VNIIPK, Moscow

Dmitrii A. Kharchenko – Chief of Laboratory at JSC VNIIPK, Moscow

Статья поступила в редакцию 02.11.24, принята к опубликованию 26.11.24

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314

АНАЛИЗ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА ДЭС С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Н.А. Кучменко, В.В. Завалишин

ANALYSIS OF DIESEL POWER PLANTS WITH VARIABLE SPEED OF THE ENGINE SHAFT ROTATION OVER THE TOTAL LOAD

N.A. Kuchmenko, V.V. Zavalishin

В работе рассматривается комплекс дизельных электростанций с переменной скоростью вращения валов двигателей на общую нагрузку, состоящий из нескольких установок. Целью статьи является анализ расхода топлива при изменении количества генераторов в работе.

Ключевые слова: комплекс ДЭС, переменная скорость вращения, расход топлива, разное количество установок

Самыми распространенными источниками автономного питания являются дизельные электростанции (ДЭС) в составе: дизельный двигатель и синхронный генератор. Традиционно применяются ДЭС с постоянной скоростью вращения двигателя [1, 2]. Большим недостатком такой установки является повышенный расход топлива при низких нагрузках [5].

Увеличение экономичности установки достигается за счет применения ДЭС с переменной скоростью вращения, которой задается оптимальная скорость вращения двигателя, соответствующая минимальному расходу топлива [1-5].

Целью статьи является исследование расхода топлива на предмет снижения эффективности расхода топлива при увеличе-

The article considers a complex of diesel power plants with a variable engine shaft speed over the total load, consisting of several units. The purpose of the article is to analyze the fuel consumption when changing the number of generators in operation.

Keywords: diesel power plant complex, variable speed of rotation, fuel consumption, different number of units

нии количества установок и уменьшения мощности одной ДЭС.

Под комплексом понимается совокупность N -го количества дизельных электростанций переменной частоты вращения, работающих на общую нагрузку (рис. 1).

Для стабилизации выходного напряжения в схему включены выпрямители B и инвертор I [5].

Через ключи $K_{НЭ1}$ и $K_{НЭ2}$ включен накопитель энергии (НЭ). При избытке вырабатываемой мощности ключ $K_{НЭ1}$, ключ $K_{НЭ2}$ разомкнут, и электроэнергия поступает в НЭ, осуществляя его заряд. В моменты резкого повышения мощности ключ $K_{НЭ1}$ замыкается, а ключ $K_{НЭ2}$ замыкается и НЭ начинает отдавать накопленную мощность,

позволяя дизельным двигателям перейти на новую мощность, компенсируя разницу между вырабатываемой и требуемой мощностями.

Для анализа расхода топлива принимается следующие составы комплекса:

- 1) 2 установки марки ЯМЗ-238Н мощностью 220 кВт (рис. 2);
- 2) 4 установки марки КамАЗ-740 мощностью 150 кВт (рис. 3);
- 3) 8 установок марки УМЗ-331 мощностью 50 кВт (рис. 4).

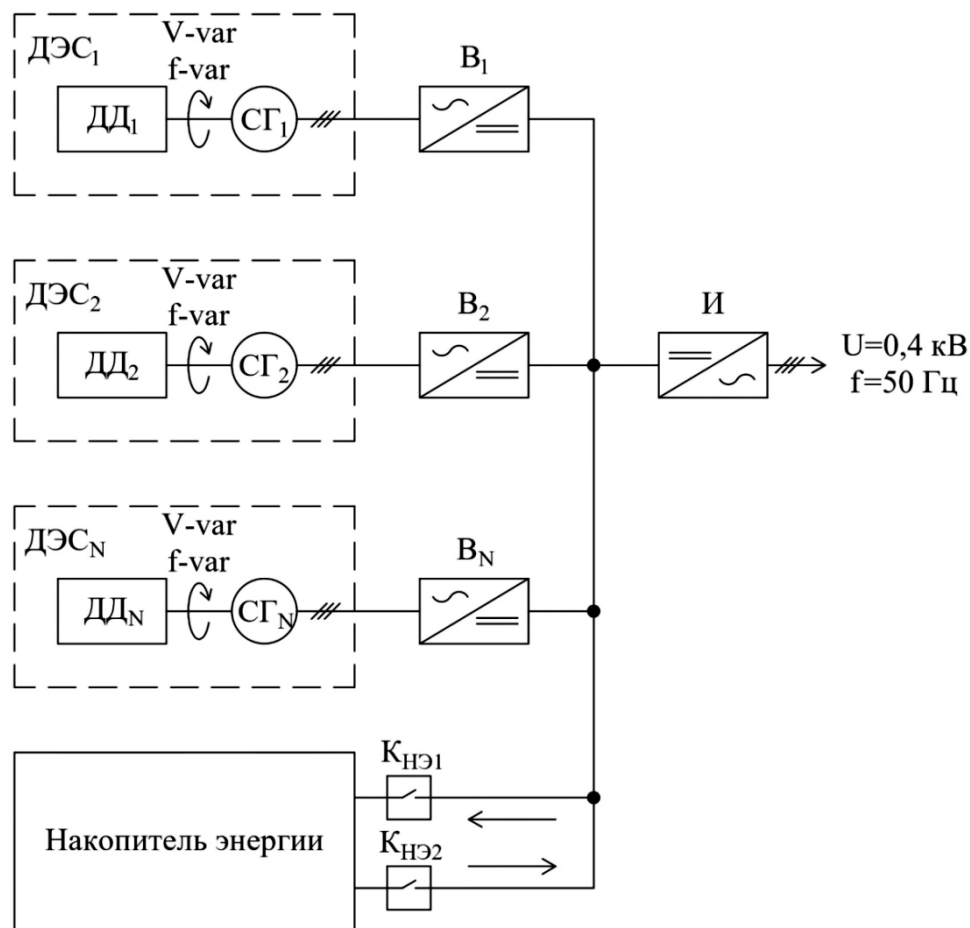


Рис 1. Структурная схема комплекса ДЭС с переменной скоростью вращения вала двигателя

Распределение мощности между генераторами принимается равномерным. На рис. 2-4 представлены многопараметровые характеристики дизельных двигателей комплекса. Режимы работы с переменной скоростью вращения ДЭС поясняются тем, что управление подачей топлива агрегатов происходит в зависимости от мощности нагрузки и наименьшего удельного расхода топлива любой зоны.

Суточный график нагрузки рассматриваемого автономного потребителя представлен на рис. 5 и в течение года он не меняется.

Расчет расхода топлива проводится по методике, представленной в [6, 7]. Согласно

методике, расход топлива одной ДЭС на отпуск электроэнергии на каждой i -й ступени суточного графика определяется по формуле

$$G_i = g_{ном} \cdot K_{изн} \cdot K_{реж} \cdot W_{выр i} \cdot 0,001, \quad (1)$$

где $g_{ном}$ – удельный расход топлива дизельным двигателем при номинальной мощности, г/кВт·ч; $W_{выр i}$ – вырабатываемая электроэнергия одной ДЭС на i -й ступени суточного графика, кВт·ч; $K_{изн}$ – коэффициент износа, 1,05 [6]; $K_{реж}$ – режимный коэффициент, учитывающий изменение удельного расхода топлива при работе ДЭС с нагрузкой отличной от номинальной.

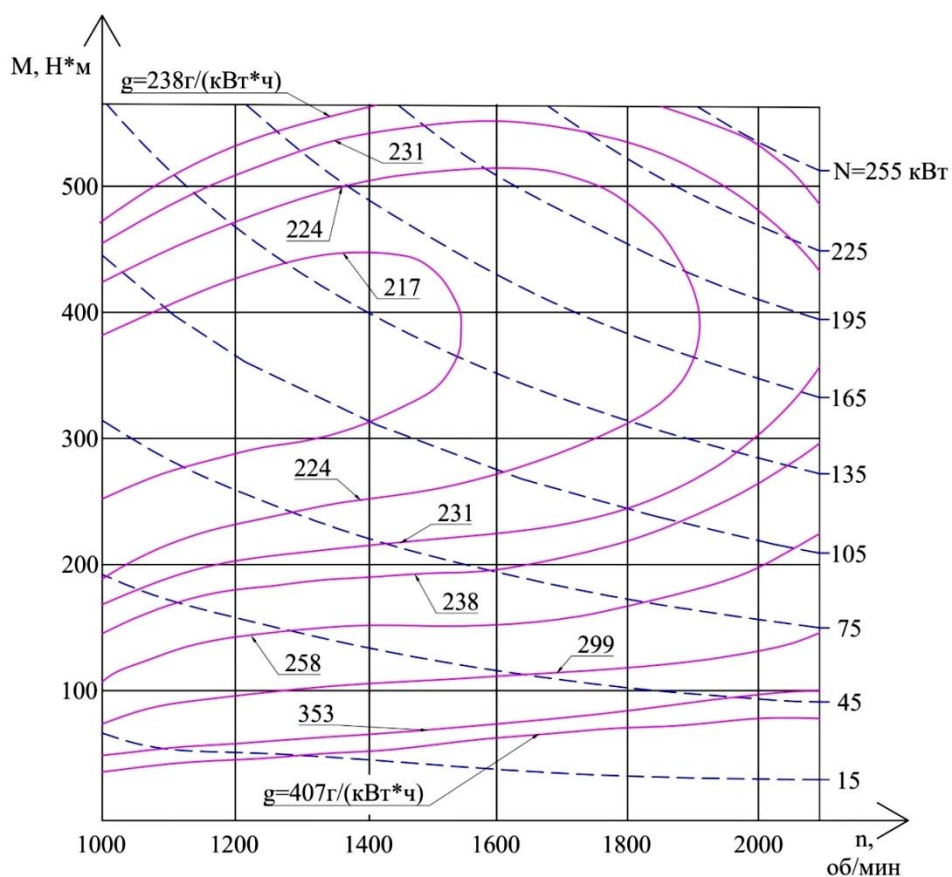


Рис. 2. Многопараметровая характеристика двигателя ЯМЗ-238Н

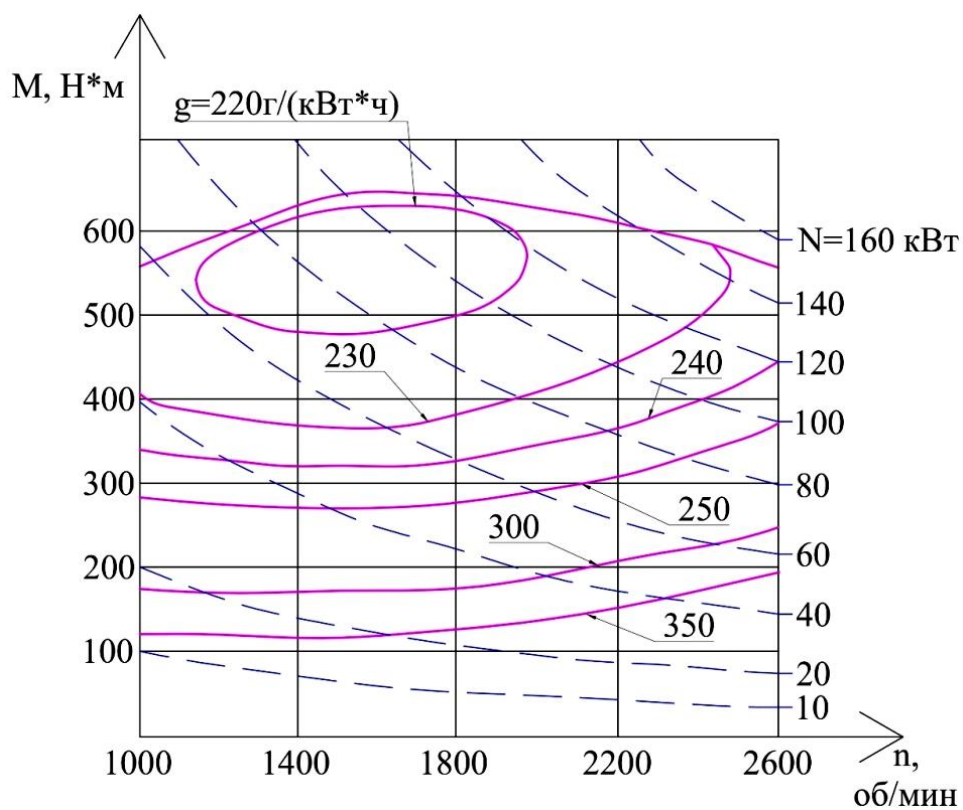


Рис. 3. Многопараметровая характеристика двигателя КАМАЗ-740

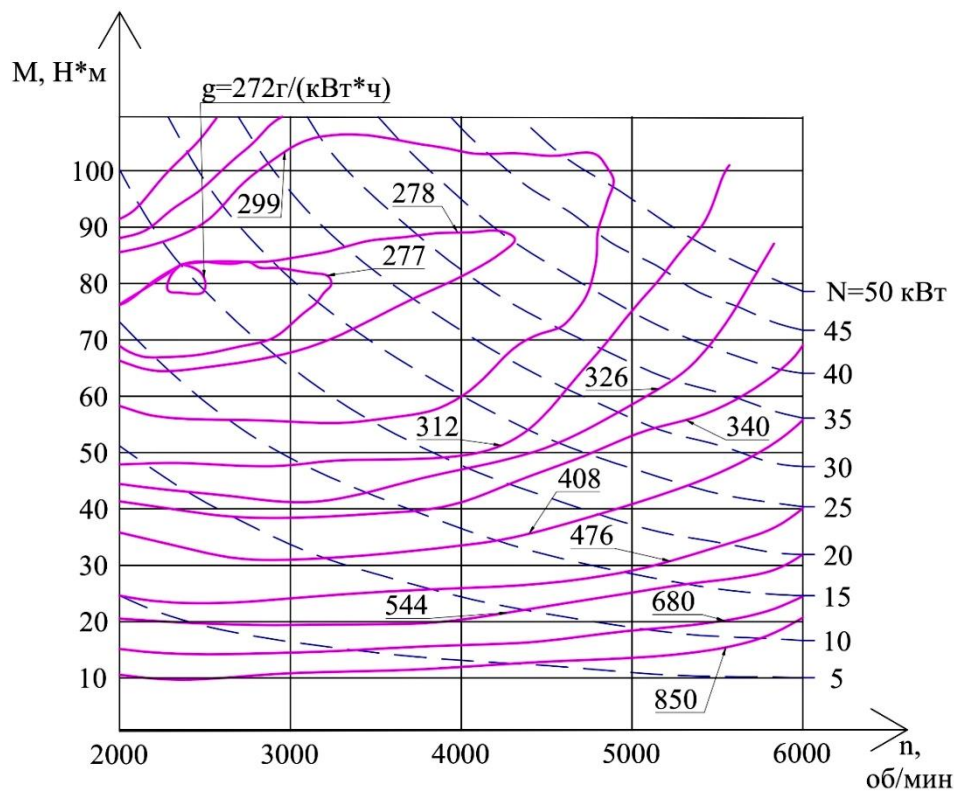


Рис. 4. Многопараметровая характеристика УМЗ-331

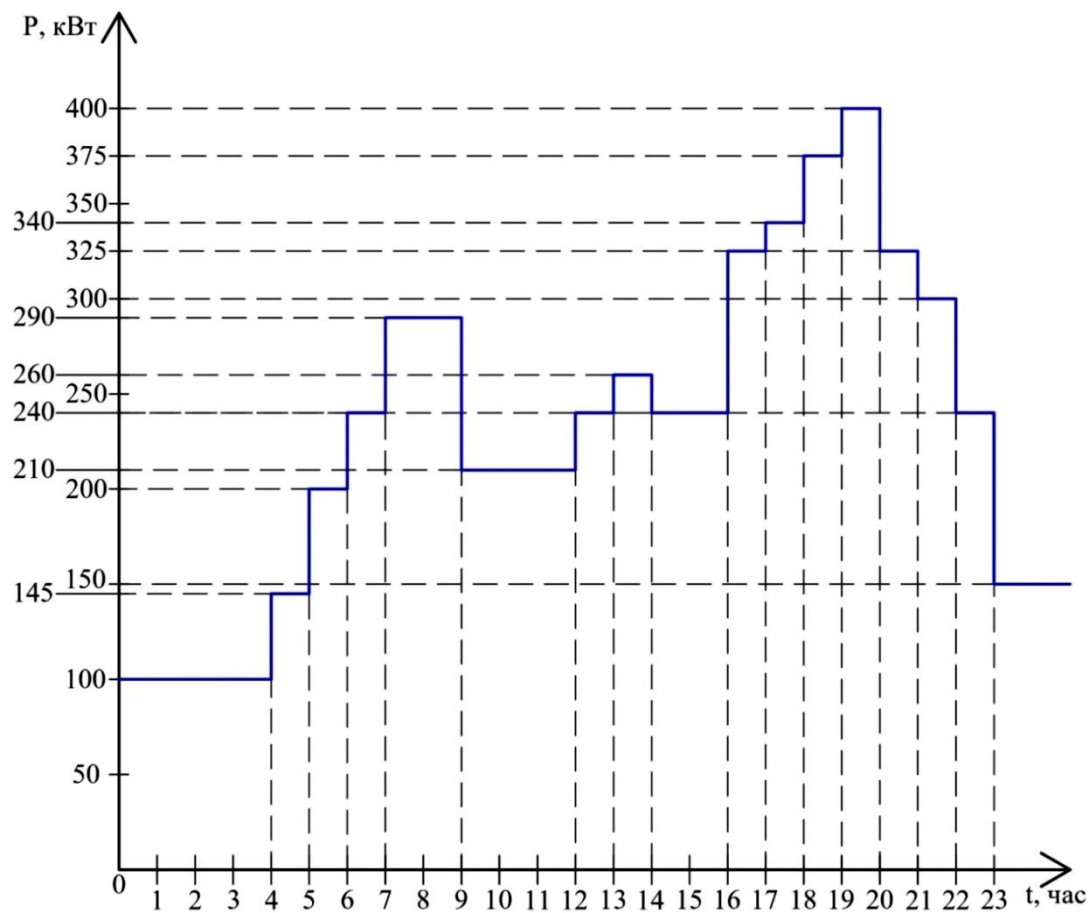


Рис. 5. Суточный график нагрузки

Режимный коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_{реж} = \frac{g_i}{g_{ном}}, \quad (2)$$

где g_i – удельный расход топлива на рассматриваемой ступени суточного графика нагрузки. Данная величина определяется по многопараметровым характеристикам двигателей (рис. 1-3), где по оси n выбирается такая скорость вращения, при которой, не теряя эффективность выработки электроэнергии, двигатель будет потреблять наименее возможное количество топлива.

Как отмечалось ранее, распределение нагрузки принимается равномерным,

в этом случае согласно методике вырабатываемую на всем временном отрезке одной установкой мощность $W_{выр i}$ можно найти по формуле

$$W_{выр i} = \frac{P_{ногр i} \cdot t_i}{m}, \quad (3)$$

где t_i – время работы ДЭС на i -й ступени суточного графика, ч; m – число одновременно работающих агрегатов.

Суммарный расход топлива определяется по формуле

$$G_{\Sigma} = m \cdot G_i. \quad (4)$$

Результат расчета представлен в табл. 1-3.

Таблица 1 – Расход топлива для 1 варианта комплекса ДЭС

Временной интервал, ч	$P_{ногр}$, кВт	m , шт.	$K_{реж}$	$W_{выр}$, кВт·ч	G , кг
0-4	100	1	0,988	400	90,090
4-5	145	2	0,986	72,5	16,291
5-6	200	2	0,988	100	22,523
6-7	240	2	0,991	120	27,090
7-9	290	2	0,998	290	65,924
9-12	210	2	0,988	315	70,946
12-13	240	2	0,991	120	27,090
13-14	260	2	0,993	130	29,416
14-16	240	2	0,991	240	54,180
16-17	325	2	1,009	162,5	37,367
17-18	340	2	1,014	170	39,270
18-19	375	2	1,028	187,5	43,903
19-20	400	2	1,032	200	47,040
20-21	325	2	1,009	162,5	37,367
21-22	300	2	1,000	150	34,178
22-23	240	2	0,991	120	27,090
23-24	150	2	0,986	75	16,853
Суммарный расход топлива за сутки G_{Σ} , кг				1283,1	

Таблица 2 – Расход топлива для 2 варианта комплекса ДЭС

Временной интервал, ч	$P_{ногр}$, кВт	m , шт.	$K_{реж}$	$W_{выр}$, кВт·ч	G , кг
0-4	100	1	1,000	400	91,560
4-5	145	2	1,000	72,5	16,595
5-6	200	2	1,000	100	22,890
6-7	240	3	1,000	80	18,312
7-9	290	4	1,000	145	33,191

Окончание табл. 2

Временной интервал, ч	$P_{номр}$, кВт	m , шт.	$K_{реж}$	$W_{выр}$, кВт·ч	G , кг
9-12	210	3	1,000	210	48,069
12-13	240	3	1,000	80	18,312
13-14	260	4	1,005	65	14,947
14-16	240	3	1,000	160	36,624
16-17	325	4	1,000	81,25	18,598
17-18	340	4	1,000	85	19,457
18-19	375	4	1,000	93,75	21,459
19-20	400	4	1,000	100	22,890
20-21	325	4	1,000	81,25	18,598
21-22	300	4	1,000	75	17,168
22-23	240	3	1,000	80	18,312
23-24	150	2	1,000	75	17,168
Суммарный расход топлива за сутки G_{Σ} , кг			1289,0		

Таблица 3 – Расход топлива для 3 варианта комплекса ДЭС

Временной интервал, ч	$P_{номр}$, кВт	m , шт.	$K_{реж}$	$W_{выр}$, кВт·ч	G , кг
0-4	100	5	0,910	80	22,848
4-5	145	5	0,910	29	8,282
5-6	200	5	0,930	40	11,676
6-7	240	8	0,930	30	8,757
7-9	290	7	0,928	82,857	24,143
9-12	210	7	0,930	90	26,271
12-13	240	8	0,930	30	8,757
13-14	260	8	0,928	32,5	9,470
14-16	240	8	0,930	60	17,514
16-17	325	8	0,930	40,625	11,858
17-18	340	8	0,977	42,5	13,031
18-19	375	8	1,043	46,875	15,356
19-20	400	8	1,005	50	15,698
20-21	325	8	0,930	40,625	11,858
21-22	300	8	0,928	37,5	10,927
22-23	240	8	0,930	30	8,757
23-24	150	5	0,930	30	8,757
Суммарный расход топлива за сутки G_{Σ} , кг			1666,6		

Заключение

Исходя из расчетов, можно отметить, что с увеличением количества установок и уменьшением их единичной мощности расход топлива увеличивается. Из этого

можно сделать вывод, что применение ДЭС с переменной скоростью вращения двигателя имеет место при небольшом количестве установок, но теряет актуальность при их увеличении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Электростанции автономных объектов на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, В.В. Соколов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 218-226.

2. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 6. С. 95-102.

3. **Дураев Н.Н., Обухов С.Г., Плотников И.А.** Имитационная модель дизельного двигателя для исследования его рабочих характеристик на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 4. С. 48-52.

4. **Завалишин В.В.** Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-

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

5. 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.

6. **Лукутин Б.В.** Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 115 с.

7. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: ЭНАС, 2012. 376 с.

Кучменко Никита Алексеевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Nikita A. Kuchmenko – Master's Student, Department of Power Systems and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 31.10.24, принята к опубликованию 26.11.24

УДК 621.3.078

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА ПРИ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков

SELECTING PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC BEARING REGULATORS UNDER DISPLACEMENT OF THE MAGNETIC SYSTEM CENTER RELATIVE TO THE ROTOR ROTATION AXIS

V.D. Kostyukov, G.A. Krylov, Yu.A. Makarichev, A.V. Starikov

Статья посвящена задаче научно обоснованного выбора параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора и независимого управления напряжениями противоположных магнитов. Рассмотрены функциональная и структурная схемы системы управления электромагнитным подшипником. Приведены передаточные функции противоположных электромагнитов с учетом смещения оси вращения ротора относительно центра магнитной системы. Определены передаточные функции системы управления для каждого электромагнита. Найдены аналитические зависимости для расчета и обоснованного выбора параметров всех регуляторов, учитывающие величину смещения центра магнитной системы относительно оси вращения, а также целый ряд начальных условий. Методом компьютерного моделирования доказано, что полученные аналитические зависимости позволяют выбрать такие параметры регуляторов, которые обеспечивают монотонный характер переходных процессов и повышение быстродействия и динамической жесткости электромагнитного подшипника.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, параметры регуляторов, устойчивость, быстродействие, динамическая жесткость

The article is devoted to the problem of scientifically substantiated selection of parameters of electromagnetic bearing regulators with displacement of the magnetic system center relative to the rotor rotation axis and independent control of the voltages of the opposite magnets. The functional and structural diagrams of the electromagnetic bearing control system are considered. Transfer functions of the opposite electromagnets are given taking into account the displacement of the rotor rotation axis relative to the magnetic system center. Transfer functions of the control system for each electromagnet are determined. Analytical dependencies for calculating and substantiating the selection of parameters of all regulators are found, taking into account the magnitude of the displacement of the magnetic system center relative to the rotation axis, as well as a number of initial conditions. Using the computer modeling method, it is proved that the obtained analytical dependencies allow selecting such regulator parameters that ensure a monotonic nature of transient processes and an increase in the response speed and dynamic rigidity of electromagnetic bearing.

Keywords: electromagnetic bearing, controller parameters, stability, response speed, dynamic rigidity

Введение

Смещение центра магнитной системы электромагнитного подшипника, компенсирующего силу веса ротора, относительно оси вращения позволяет снизить потребление электрической энергии катушками электромагнитов [1]. При этом целесообразно применить раздельное управление противоположными электромагнитами с помощью соответствующего набора регуляторов [2]. Это объясняется тем, что при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения происходит перераспределение зазоров между электромагнитами и пассивным магнитом, закрепленным на роторе. В результате изменяются постоянные времени обмоток электромагнитов и силы, действующие на ротор со

стороны противоположных магнитов. В связи с этим предлагаемая функциональная схема системы управления каждого канала управления электромагнитного подшипника, компенсирующего силу веса ротора, выглядит следующим образом (рис. 1). Каждый канал системы управления содержит датчик положения ротора, два регулятора, два силовых преобразователя, первый и второй электромагниты ЭМ1 и ЭМ2 и блок задания смещения ротора. Если регуляторы 1 и 2 имеют в своем составе композицию интегрального, пропорционального (П) и пропорционально-дифференциального (ПД) регуляторов, то структурная схема системы управления электромагнитным подшипником будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

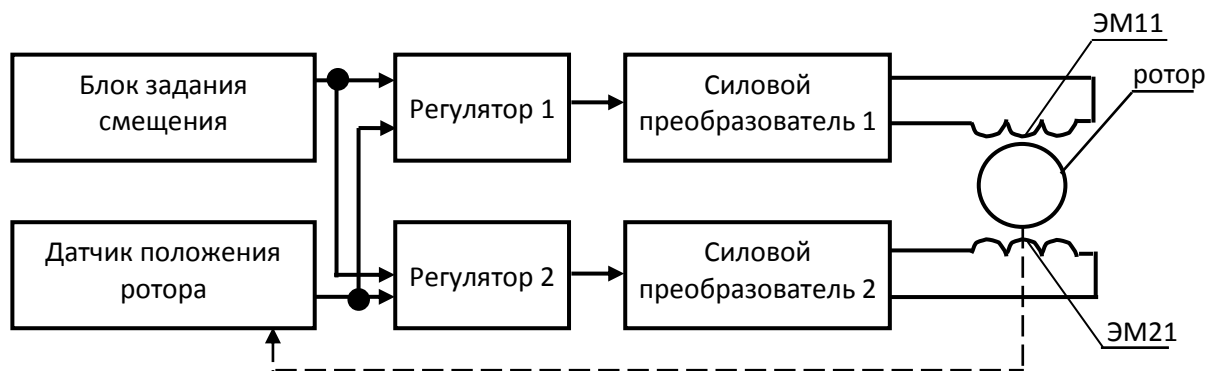


Рис. 1. Функциональная схема одного канала системы управления электромагнитным подшипником

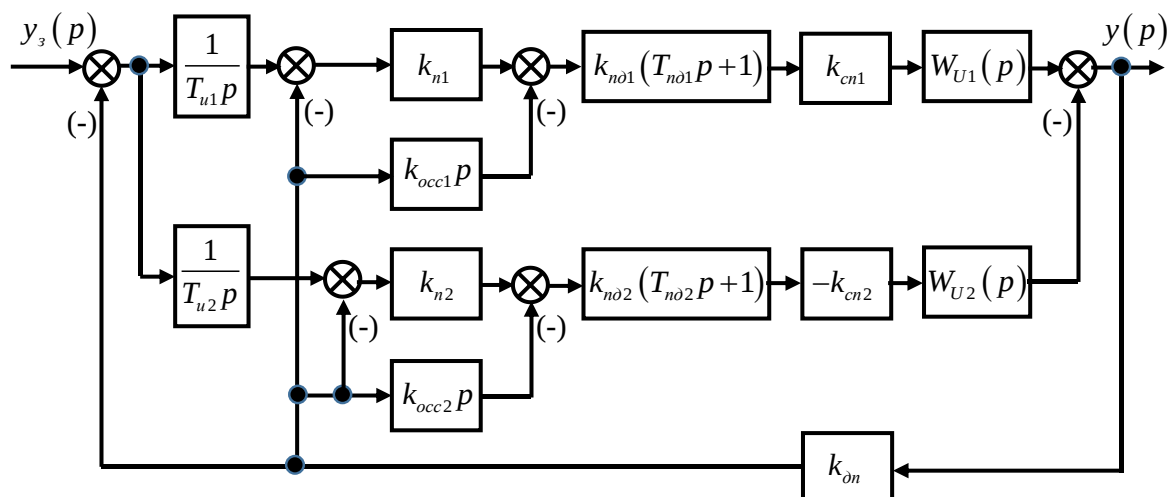


Рис. 2. Структурная схема рассматриваемой системы управления электромагнитным подшипником

На структурной схеме приняты следующие обозначения: T_{u1} и T_{u2} – постоянные времени интегральных регуляторов;

k_{n1} и k_{n1} – коэффициенты передачи П регуляторов; k_{n01} , T_{n01} , k_{n02} и T_{n02} – коэффициенты передачи и постоянные времени ПД ре-

гуляторов; k_{cn1} и k_{cn2} – коэффициенты передачи силовых преобразователей; k_{occ1} и k_{occ2} – коэффициенты передачи об-

ратных связей по скорости. Передаточные функции электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2 $W_{U1}(p)$ и $W_{U2}(p)$ равны [3]

$$W_{U1}(p) = \frac{y(p)}{U_1(p)} = \frac{k_{U1}(b_{01}p+1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (1)$$

$$W_{U2}(p) = \frac{y(p)}{U_2(p)} = -\frac{k_{U2}(b_{02}p+1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} k_{U1} &= \frac{d_3}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{01} = T_2; \quad a_0 = \frac{mT_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_1 = \frac{m(T_1 + T_2)}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \\ a_2 &= \frac{m + d_1T_2 + d_2T_2 - k_{Fy}T_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_3 = \frac{d_1 + d_2 + (d_5 - k_{Fy})T_2 - (d_6 + k_{Fy})T_1}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \\ k_{U2} &= \frac{d_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{02} = T_1; \quad d_1 = \frac{4k_{FI}^2 I_{10}^2}{(\delta - y_0)^4 R_1 + 2k_{FI}V_0(\delta - y_0)^2}; \\ d_2 &= \frac{4k_{FI}^2 I_{20}^2}{(\delta + y_0)^4 R_2 - 2k_{FI}V_0(\delta + y_0)^2}; \quad d_3 = \frac{2k_{FI}I_{10}}{(\delta - y_0)^2 R_1 + 2k_{FI}V_0}; \\ d_4 &= \frac{2k_{FI}I_{20}}{(\delta + y_0)^2 R_2 - 2k_{FI}V_0}; \quad d_5 = \frac{4k_{FI}^2 I_{10} [2I_{10}V_0 + (\delta - y_0)I'_{10}]}{(\delta - y_0)^3 [R_1(\delta - y_0)^2 + 2k_{FI}V_0]}; \\ d_6 &= \frac{4k_{FI}^2 I_{20} [2I_{20}V_0 - (\delta + y_0)I'_{20}]}{(\delta + y_0)^3 [R_2(\delta + y_0)^2 - 2k_{FI}V_0]}; \quad k_{Fy} = k_{FI} \left[\frac{2I_{10}^2}{(\delta - y_0)^3} + \frac{2I_{20}^2}{(\delta + y_0)^3} \right]; \\ T_1 &= \frac{2k_{FI}(\delta - y_0)}{(\delta - y_0)^2 R_1 + 2k_{FI}V_0}; \quad T_2 = \frac{2k_{FI}(\delta + y_0)}{(\delta + y_0)^2 R_2 - 2k_{FI}V_0}; \end{aligned}$$

m – часть массы ротора, приходящаяся на один канал управления электромагнитного подшипника; k_{FI} – конструктивный коэффициент; δ – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы; y – перемещение ротора относительно центра магнитной системы; U_1 и U_2 – напряжения, подаваемые на обмотки электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2; y_0 , I_{10} и I_{20} – начальные значения положения ротора и токов электромагнитов; I'_{10} , I'_{20} , и V_0 – начальные значения скорости изменения токов в обмотках электромагнитов и скорости перемещения ротора; p – комплексная переменная.

Целью проводимого исследования является разработка научно обоснованного подхода к выбору параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора и раздельном управлении напряжениями на обмотках магнитов.

Решение задачи

Для решения поставленной задачи методом структурных преобразований найдем передаточные функции замкнутых систем управления для каждого электромагнита

$$W_{31}(p) = \frac{y(p)}{y_3(p)} = \frac{b_{03}p^2 + b_{13}p + 1}{k_{\partial n}(a_{05}p^5 + a_{15}p^4 + a_{25}p^3 + a_{35}p^2 + a_{45}p + 1)}, \quad (3)$$

$$W_{32}(p) = \frac{y(p)}{y_3(p)} = \frac{b_{04}p^2 + b_{14}p + 1}{k_{\partial n}(a_{08}p^5 + a_{18}p^4 + a_{28}p^3 + a_{38}p^2 + a_{48}p + 1)}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} b_{03} &= T_{n\partial 1}b_{01}; \quad b_{13} = T_{n\partial 1} + b_{01}; \quad b_{04} = T_{n\partial 2}b_{02}; \quad b_{14} = T_{n\partial 2} + b_{02}; \quad a_{05} = \frac{a_{04}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}}; \quad a_{15} = \frac{a_{14}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}}; \\ a_{25} &= \frac{a_{24}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}}; \quad a_{35} = \frac{a_{34}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}} + b_{03}; \quad a_{45} = \frac{T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}} + b_{13}; \quad k_{211} = \frac{k_{n1}k_{111}}{k_{21} - 1}; \quad k_{21} = k_{n1}k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{\partial n}; \\ k_{111} &= k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}; \quad a_{04} = \frac{a_{03}}{k_{21} - 1}; \quad a_{14} = \frac{a_{13}}{k_{21} - 1}; \quad a_{24} = \frac{a_{23} + k_{21}b_{03}}{k_{21} - 1}; \quad a_{34} = \frac{a_{33} + k_{21}b_{13}}{k_{21} - 1}; \quad a_{03} = a_0; \\ a_{13} &= a_1 + k_{11}T_{n\partial 1}b_{01}; \quad a_{23} = a_2 + k_{11}(T_{n\partial 1} + b_{01}); \quad a_{33} = a_3 + k_{11}; \quad k_{11} = k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{occ1}k_{\partial n}; \\ a_{08} &= \frac{a_{07}T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}}; \quad a_{18} = \frac{a_{17}T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}}; \quad a_{28} = \frac{a_{27}T_{u1}}{k_{222}k_{\partial n}}; \quad a_{38} = \frac{a_{37}T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}} + b_{04}; \quad a_{48} = \frac{T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}} + b_{14}; \\ k_{222} &= \frac{k_{n1}k_{122}}{k_{22} - 1}; \quad k_{22} = k_{n2}k_{n\partial 2}k_{cn2}k_{U2}k_{\partial n}; \quad k_{122} = k_{n\partial 2}k_{cn2}k_{U2}; \\ a_{07} &= \frac{a_{06}}{k_{22} - 1}; \quad a_{17} = \frac{a_{16}}{k_{22} - 1}; \quad a_{27} = \frac{a_{26} + k_{22}b_{04}}{k_{22} - 1}; \quad a_{37} = \frac{a_{36} + k_{22}b_{14}}{k_{22} - 1}; \quad a_{06} = a_0; \\ a_{16} &= a_1 + k_{12}T_{n\partial 2}b_{02}; \quad a_{26} = a_2 + k_{12}(T_{n\partial 2} + b_{02}); \quad a_{36} = a_3 + k_{12}; \quad k_{12} = k_{n\partial 2}k_{cn2}k_{U2}k_{occ2}k_{\partial n}. \end{aligned}$$

В соответствии с известной методикой синтеза параметров регуляторов электромагнитного подшипника постоянные времени ПД регуляторов должны равняться утроенной величине постоянных времени электромагнитов [4]. Поскольку в соответствии с формулами (1) и (2) при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения $T_1 \neq T_2$, настройки ПД регуляторов в рассматриваемой системе раздельного управления противоположными электромагнитами должны выбираться следующим образом:

$$T_{n\partial 1} = 3T_1; \quad T_{n\partial 2} = 3T_2. \quad (5)$$

При этом если выбрать коэффициенты обратных связей по скорости равными

$$k_{occ1} = k_{occ2} = \frac{2\xi(k_{21} - 1)b_{03}\sqrt{a_{04}b_{03}} + (k_{21} - 1)a_{04}b_{13} - a_{14}b_{03}}{k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{\partial n}T_{n\partial 1}b_{01}b_{03}}, \quad (6)$$

то величины коэффициентов передачи П и ПД регуляторов могут быть выбраны равными [4]

$$k_{n1} = k_{n2} = k_{n\partial 1} = k_{n\partial 2}. \quad (7)$$

Следует также отметить, что при рассмотрении системы управления электромагнитным подшипником как не-

прерывной имеется ограничение лишь на минимальную величину этих коэффициентов с целью обеспечения неравенств

$$k_{21} > 1, \quad k_{22} > 1. \quad (8)$$

Для обоснованного выбора величин постоянных времени интегральных регуля-

торов T_{u1} и T_{u2} рассмотрим условия устойчивости систем управления каждым электромагнитом. Из передаточных

функций (3) и (4) вытекают следующие условия устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} a_{15}a_{25} - a_{05}a_{35} &> 0; \\ (a_{15}a_{25} - a_{05}a_{35})(a_{35}a_{45} - a_{25}) - (a_{15}a_{45} - a_{05})^2 &> 0; \\ a_{18}a_{28} - a_{08}a_{38} &> 0; \\ (a_{18}a_{28} - a_{08}a_{38})(a_{38}a_{48} - a_{28}) - (a_{18}a_{48} - a_{08})^2 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения коэффициентов $a_{05} - a_{45}$, $a_{08} - a_{48}$ и переходя к равенствам, получим систему четырех уравнений

относительно граничных с точки зрения устойчивости значений постоянных времени $T_{u1.эп}$ и $T_{u2.эп}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34}}{k_{211}k_{\partial n}} T_{u1.эп} - a_{04}b_{03} &= 0; \\ d_{21}T_{u1.эп}^3 + d_{22}T_{u1.эп}^2 + d_{23}T_{u1.эп} + d_{24} &= 0; \\ \frac{a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37}}{k_{222}k_{\partial n}} T_{u2.эп} - a_{07}b_{04} &= 0; \\ d_{31}T_{u2.эп}^3 + d_{32}T_{u2.эп}^2 + d_{33}T_{u2.эп} + d_{34} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} d_{21} &= \frac{(a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34})a_{34} - a_{14}^2}{(k_{211}k_{\partial n})^3}; \quad d_{22} = \frac{(a_{34}b_{13} + b_{03})(a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34}) - a_{04}a_{34}b_{13} - 2a_{14}(a_{14}b_{13} - a_{04})}{(k_{211}k_{\partial n})^2}; \\ d_{32} &= \frac{b_{03}b_{13}(a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34}) - a_{04}b_{03}(a_{34}b_{13} + b_{03}) - (a_{14}b_{13} - a_{04})^2}{k_{211}k_{\partial n}}; \quad d_{24} = -a_{04}b_{03}^2b_{13}; \\ d_{31} &= \frac{(a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37})a_{37} - a_{17}^2}{(k_{222}k_{\partial n})^3}; \quad d_{32} = \frac{(a_{37}b_{17} + b_{04})(a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37}) - a_{07}a_{37}b_{14} - 2a_{17}(a_{17}b_{14} - a_{07})}{(k_{222}k_{\partial n})^2}; \\ d_{33} &= \frac{b_{04}b_{14}(a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37}) - a_{07}b_{04}(a_{37}b_{14} + b_{04}) - (a_{17}b_{14} - a_{07})^2}{k_{222}k_{\partial n}}; \quad d_{34} = -a_{07}b_{04}^2b_{14}. \end{aligned}$$

Определив граничные значения $T_{u1.эп}$ и $T_{u2.эп}$ из решения системы уравнений (10), расчет параметров интегральных регуляторов, обеспечивающих хорошие показатели качества регулирования, можно произвести по формулам

$$T_{u1} = 3,5T_{u1.эп}, \quad T_{u2} = 3,5T_{u2.эп}. \quad (11)$$

Полученные аналитические выражения (5)-(11) позволяют произвести научно обоснованный выбор параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора. Следует также отме-

тить, что эти же формулы можно использовать при расчете параметров регуляторов и при центральном положении ротора.

Пример расчета и результаты компьютерного моделирования

Для оценки адекватности полученных формул произведем расчет параметров регуляторов системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16. При этом учтем, что для компенсации силы веса ротора центр магнитной системы смещен относительно оси

вращения на $y_0 = 165$ мкм, а электромагниты характеризуются следующими параметрами: $k_{FI} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $T_1 = 0,078$ с, $T_2 = 0,0499$ с, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $k_{Fy} = 2,75 \cdot 10^7$ Н/м. При расчете примем следующие начальные условия $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А, $I'_{10} = I'_{20} = 0$, $V_0 = 0$. С учетом того, что система управления электромагнитным подшипником оснащена датчиком положения ротора и силовыми преобразователями с коэффициентами передачи $k_{\partial n} = 10000000$ дискрет/м, $k_{cn1} = k_{cn2} = 0,0015$ В/дискрета, а коэффициенты передачи П и ПД регуляторов выбраны равными $k_{n1} = k_{n2} = k_{n\partial 1} = k_{n\partial 2} = 2$, расчет по формулам (5), (6), (10) и (11) дает следующие требуемые настройки: $T_{n\partial 1} = 0,234$ с, $T_{n\partial 2} = 0,15$ с, $k_{occ1} = k_{occ2} = 0,0032$ с, $T_{u1} = 0,0046$ с, $T_{u2} = 0,0048$ с.

Для построения переходных процессов в системе управления электромагнитным подшипником при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения разработана расчетная модель, учитывающая выбранные параметры регуляторов (рис. 3). Для сравнения разработана расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником, которая также работает при смещении центра магнитной системы, но при параметрах регуляторов, выбранных для центрального положения ротора (рис. 4). В отличие от предыдущей расчетной схемы в ней приняты следующие настройки регуляторов: $T_{u1} = T_{u2} = 0,0077$ с, $T_{n\partial 1} = T_{n\partial 2} = 0,183$ с.

Приведенные расчетные модели позволили построить графики переходных процессов по управляющему (рис. 5) и возмущающему (рис. 6) воздействиям.

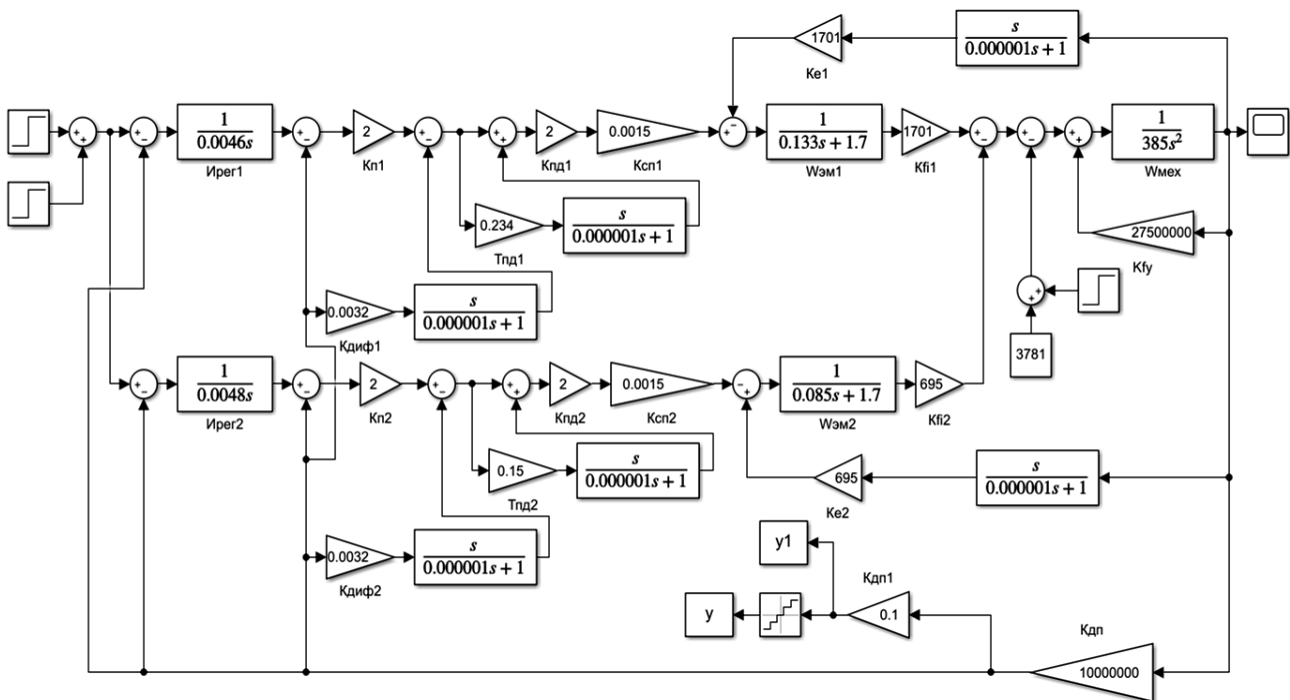


Рис. 3. Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для смещенного центра магнитной системы

Кривые, обозначенные цифрой 1, соответствуют настройкам регуляторов, выбранных с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения, а цифрой 2 – параметрам регуляторов, рассчитанных для центрального по-

ложения ротора. Анализ графиков показывает, что время переходного процесса по управляющему воздействию для графика 1 равно 0,0173 с, а для графика 2 – 0,0132 с. Следовательно, быстродействие системы управления электромагнитным

подшипником увеличивается в 1,8 раза при настройках регуляторов, выбранных с учетом смещения центра магнитной системы. Переходные процессы по возмущающему воздействию позволяют сделать вывод, что при набросе внешней силы в 1000 Н динамический провал кривой 1 составляет 3,537 мкм, а кривой 2 – 4,177 мкм. Следовательно, динамическая жест-

кость электромагнитного подшипника возрастает в 1,18 раза при настройках регуляторов, учитывающих смещение ротора. При этом необходимо отметить, что выбор параметров по формулам (5)-(11) обеспечивает устойчивую работу системы управления электромагнитным подшипником и монотонный характер переходных процессов.

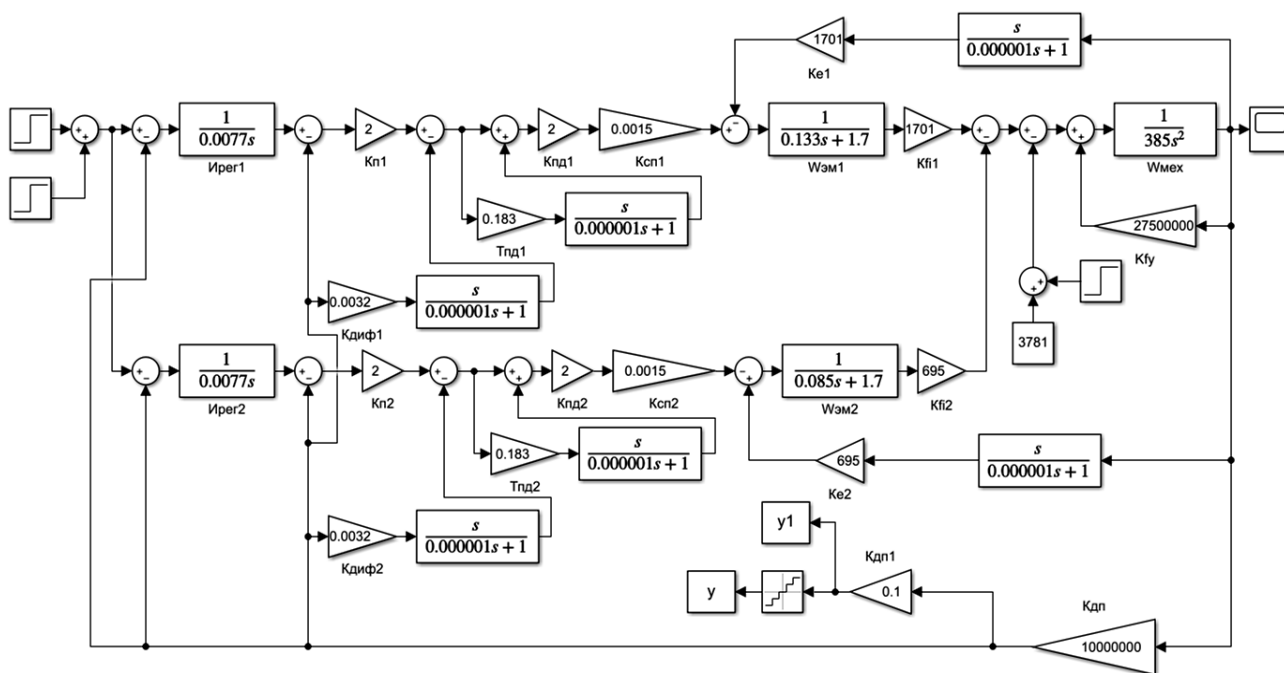


Рис. 4. Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для положения ротора в центре магнитной системы

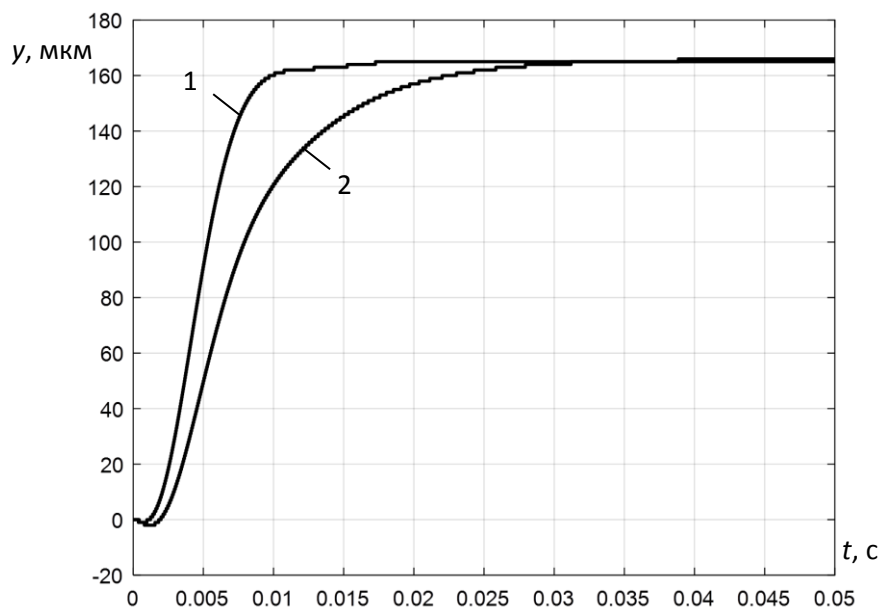


Рис. 5. Графики переходных процессов по управляющему воздействию

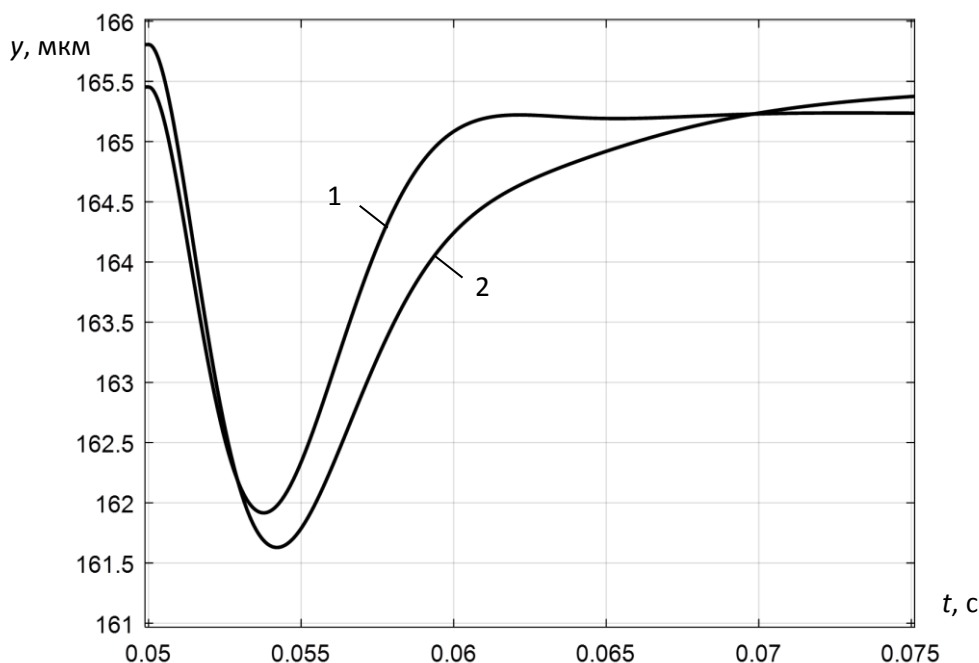


Рис. 6. Графики переходных процессов по возмущающему воздействию

Выводы

1. Применение раздельного управления напряжениями на обмотках противоположных электромагнитов с соответствующими настройками регуляторов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения.

2. Полученные аналитические выражения для расчета требуемых настроек регуляторов учитывают величину смещения центра магнитной системы относительно оси вращения, а также целый ряд начальных условий и обеспечивают монотонный характер переходных процессов во всем возможном диапазоне перемещений ротора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стариков А.В., Костюков В.Д. Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2023. Т. 31. № 1. С. 103-113.

2. Костюков В.Д., Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Разработка системы управления магнитным подвесом ротора нагнетателя газоперекачивающего агрегата с независимым регулированием токов электромагнитов // Ашировские чтения: сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. С. 320-329.

3. Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / А.В. Стариков, В.Д. Костюков, В.Н. Козловский, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 388-392.

4. Стариков А.В., Стариков С.А. Параметрический синтез регуляторов многоконтурной системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2011. № 1 (29). С. 192-200.

Костюков Владислав Дмитриевич – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Крылов Григорий Александрович – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Макаричев Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета

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

Vladislav D. Kostyukov – Postgraduate Student, Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

Gregory A. Krykov – Postgraduate Student, Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

Yuri A. Makarichev – Dr. Sc. Tech., Professor, Head: Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

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

Статья поступила в редакцию 20.11.24, принята к опубликованию 12.12.24

УДК 621.316

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.Г. Сошинов, О.С. Атрашенко, М.В. Панасенко

LIVE-LINE REPAIR AND MAINTENANCE OF POWER DISTRIBUTION NETWORKS AS A FACTOR FOR IMPROVING RELIABILITY OF POWER SUPPLY

A.G. Soshinov, O.S. Atrashenko, M.V. Panasenko

В статье рассматриваются вопросы, посвященные повышению качества и надежности электроснабжения потребителей электрической энергии за счет перехода на выполнение технического обслуживания и ремонта в распределительных электрических сетях напряжением 6-20 кВ по технологии производства работ под напряжением. Актуальность проблемы подтверждает дорожная карта группы компаний «Россети» по внедрению данной технологии. В статье подробно рассматриваются новые методы производства работ без снятия напряжения, новые инструменты и снаряжение, новые программы дополнительного профессионального образования и перспективы реализации технологии при эксплуатации. Авторы выражают надежду на то, что статья будет полезна представителям учебных заведений, реализующим направление «Электроэнергетика и электротехника», в учебном процессе при изучении соответствующих курсов основной образовательной программы.

Ключевые слова: надёжность, распределительные электрические сети, электротехническая установка, техническое обслуживание и ремонт, технология выполнения работ под напряжением

The article deals with issues related to improving the quality and reliability of power supply to electricity consumers by switching to the out-of-voltage technology for maintenance and repair in 6-20 kV distribution grids. The urgency of the problem is confirmed by the roadmap of the ROSSETI Group developed to incorporate this technology. The article provides the details of the live-line technology, new tools and equipment, new programs for additional professional education, and prospects for implementation of the technology in operation. The authors expect that the article will be useful to educational institutions implementing the program «Electric Power and Electrical Engineering» in the educational process when studying the relevant courses of the basic educational program.

Keywords: reliability, power distribution networks, electrical installation, maintenance and repair, live-line technology

Введение

Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 903н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» (зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 № 61957) определяет, что к специальным работам в электроустановках относятся работы без снятия напряжения с электроустановки, выполняемые с прикосновением к токоведущим частям, находящимся под напряжением, или на расстоянии от токоведущих частей менее допустимого, то есть, работы под напряжением на токоведущих частях [1].

В 2020 году публичным акционерным обществом (ПАО) «Россети» было принято решение о внедрении технологии производства работ под напряжением (ПРПН). Приказом ПАО «Россети» от 26.03.2020 № 135 создана Рабочая группа по внедрению технологии ПРПН. В рамках деятельности данной Группы утверждена дорожная карта по внедрению технологии ПРПН в распределительных электрических сетях напряжением 0,4-20 кВ в группе компаний «Россети». Переход на выполнение технического обслуживания и ремонта (ТОиР) по технологии ПРПН в распределительных сетях до 1000 В был запланирован в 2023 году. Обучение специалистов должно проводиться в учебных центрах подготовки

персонала технологии ПРПН по соответствующим программам дополнительного профессионального образования (ДПО).

Ориентация на надежность

Надежность электроснабжения зависит от безопасности и надежности электрических сетей высокого напряжения и распределительных электрических сетей среднего и низкого напряжения.

Особая значимость проблемы надежного электроснабжения определяется возникающими перерывами в электроснабжении потребителей, которые в той или иной мере парализуют жизнь общества и порождают всевозможные негативные последствия.

Причинами перерывов в электроснабжении потребителей могут быть [2]:

- отключения, связанные с производством плановых работ;
- отключения, связанные с производством неплановых работ;
- отключения, связанные с производством аварийных работ;
- производство работ, связанных с технологическими присоединениями новых потребителей

Распределение суммарной длительности перерывов электроснабжения (по данным ПАО «Россети» в 2022 году) на напряжении 0,4-20 кВ представлено на рис. 1.

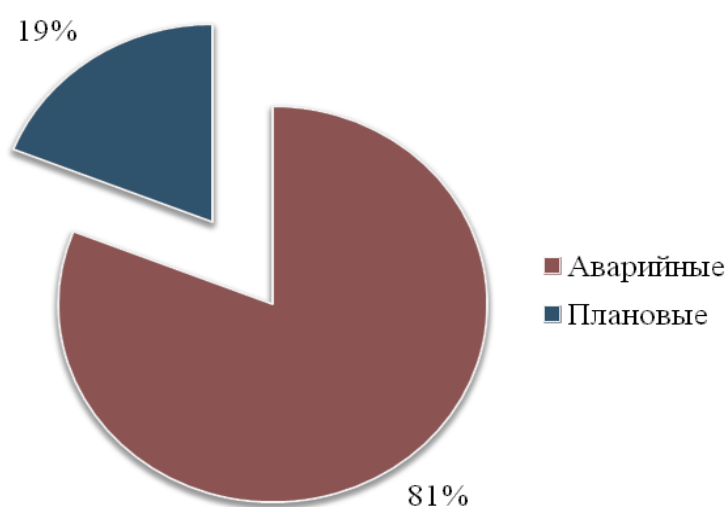


Рис. 1. Суммарная длительность перерывов электроснабжения потребителей напряжением 0,4-20 кВ

В целях выполнения приказа Министерства энергетики Российской Федерации от

29 ноября 2016 г. № 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчёту уровня

надёжности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» [3], предприятиями электрических сетей должен вестись расчёт следующих показателей надёжности электроснабжения [4]:

- показатель продолжительности отключений в результате технологических нарушений Psaidi,

- показатель частоты отключений в результате технологических нарушений Psaiifi.

По данным ПАО «Россети», 81 % времени всех перерывов электроснабжения обусловлен плановыми отключениями, связанными с проведением ремонтных работ, а показатели надёжности электроснабжения в 2022 году были следующими:

- Psaidi – 2,75 часа,
- Psaiifi – 1,46 шт.

Минимизация количества и времени отключения потребителей может быть решена за счет внедрения производства работ под напряжением в электроустановках до и выше 1000 В.

Как отметил Иванов Р.В. в докладе «Работа под напряжением в изоляции» на XI Международной научно-технической конференции «Развитие и повышение надёжности распределительных электрических сетей» [2], приоритет технологии работ под напряжением по отношению к работам, выполняемым со снятием напряжения, может быть обеспечен:

- отсутствием недоотпуска электроэнергии;
- сохранением нормального режима работы сети и схемы электроснабжения без снижения надёжности;
- отсутствием жалоб потребителей на перерывы электроснабжения;
- исключением подготовительных операций по отключению и заземлению частей электротехнической установки (ЭУ), в том числе освобождением оперативного персонала, не принимающего непосредственно участия в работах;
- исключением потерь времени для согласования заявок на отключения;

- расширением возможностей по планированию и выполнению работ (выполнение работ на воздушных линиях (ВЛ), отключение которых невозможно в данный момент по различным причинам),

- а также снижением риска травмирования персонала за счет [2]:

- полноты защитных мер и их неразрывной связи с технологией проведения работ;

- полного осознания персоналом наличия опасного производственного фактора (электрического напряжения) в месте проведения работ;

- тщательного профотбора и проверки психофизиологических особенностей работников, выполняющих работы под напряжением;

- высоких требований к квалификации персонала и опыту работы в ЭУ.

Это свидетельствует о том, что производство работ по обслуживанию распределительных сетей без снятия напряжения является наиболее прогрессивной и эффективной мерой по повышению надёжности электроснабжения потребителей.

Благодаря развитию данного метода возрастает экономическая и социальная эффективность, а работники электротехнических компаний получают возможность выполнять высокотехнологичные работы без угроз для их жизни. Поэтому работы под напряжением – один из самых актуальных и перспективных методов обслуживания электроустановок в России.

Следует отметить, что внедрение технологии ПРПН не исключает, а дополняет выполнение работ в действующих электротехнических установках со снятием напряжения. Это обусловлено тем, что при ПРПН имеется ряд ограничений на их выполнение (по погодным условиям, при аварийных ситуациях, по техническому состоянию электротехнической установки).

Некоторые факты из истории развития технологии ПРПН

В настоящее время у нас уже есть своя история внедрения технологии ПРПН, но начинали использовать элементы техно-

логи ПРПН ещё в начале прошлого века (приблизительно в 1911-1913 годах) в США и Европе. О том, как развивались технологии ПРПН за рубежом, рассказывается в ряде публикаций [5, 6].

История проведения работ без отключения линий электропередачи, то есть под напряжением, в нашей стране уходит своими корнями в далекие сороковые годы двадцатого столетия. В период Великой Отечественной войны, когда бесперебойное снабжение электроэнергией промышленных предприятий имело особое значение, в Советском Союзе был разработан и начал применяться метод ремонта воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 35 и 110 кВ без их отключения, то есть под напряжением [7].

В 1956 г. уже 75 % энергосистем СССР проводили ремонты ВЛ напряжением 35-220 кВ с использованием изолирующих лестниц, телескопических вышек с изолирующим звеном, изолирующих площадок и других аналогичных изолирующих устройств, выполненных из древесины.

Накопленный отечественный опыт показывает, что около 90 % объёма работ по ремонту линий электропередачи (ЛЭП) может выполняться без снятия напряжения. Методы ремонта ЛЭП под напряжением являются результатом творческого подхода и труда советских энергетиков. Приспособления, устройства, приемы, предложенные в Советском союзе, легли в основу дальнейшего совершенствования работ непосредственно на линиях, находящейся под напряжением [8].

Но, к сожалению, в силу ряда причин дальнейшего развития технологии ПРПН не последовало, и в 60-х годах XX столетия эти технологии в Советском Союзе постепенно были свернуты. И только в начале нового тысячелетия (в 2005-2006 годах) по инициативе директора производственного отделения «Камышинские электрические сети» филиала ПАО «Россети Юг» – «Волгоградэнерго» Хромова Николая Павловича было положено начало возрождению технологии ПРПН в современной России. К тому же технология выполнения работ под напряжением в элек-

тротехнических установках напряжением 0,4-35 кВ в России была новой, а отработанные методы подготовки специалистов ПРПН на эти классы напряжения полностью отсутствовали.

В 2011 году центр подготовки специалистов по технологии ПРПН был открыт в Камышинском технологическом институте (филиале) Волгоградского государственного технического университета (рис. 2).



Рис. 2. Демонстрация работ под напряжением при открытии учебного центра в КТИ (филиале) ВолгГТУ

С этого момента была открыта новая страница истории внедрения прогрессивной и актуальной технологии ПРПН в России.

Методы выполнения работ под напряжением

Работы под напряжением проводятся на ВЛЭП, как с голыми проводами, так и с самонесущими изолированными проводами (СИП), в электротехнических установках и на кабельных линиях [9]. При выполнении работ в электротехнических установках под напряжением до 1000 В применяются методы работы «в контакте» и «на расстоянии», с использованием соответствующих средств защиты, инструмента и снаряжения [9] (рис. 3).

Метод «в контакте» гарантирует безопасность электромонтеров, защищает их от поражения электрическим током. При выполнении работ методом «в контакте» члены бригады могут вносить в опасную зону, соответствующим образом защищенные, некоторые части тела, инструменты и снаряжение, предназначенные для производства ра-

бот под напряжением. Главным условием выполнения работ под напряжением методом «в контакте» является изолирование на месте производства работ всех токоведущих частей электроустановки. Как хирургу готовят поле для его дальнейшей деятельности, так электромонтеры готовят себе рабочее место для того, чтобы произвести какую-то рабочую операцию [9].



Рис. 3. Работы под напряжением методом «в контакте»

При производстве работ методом «на расстоянии» члены бригады остаются все время за пределами опасной зоны (рис. 4).

Указанные в наряде работы выполняются с использованием соответствующих инструментов, вводимых в эту зону. Эти инструменты закрепляются на изоляционных штангах [9].



Рис. 4. Установка разрядника под напряжением методом «на расстоянии»

В настоящее время разработаны программы дополнительного профессионально-

го образования и идет внедрение метода «в изоляции» в электротехнических установках напряжением 6-10 кВ. Работы данным методом проводятся по схеме: токоведущая часть электроустановки под напряжением – изоляция – человек – изоляция – земля [2].

Работы под напряжением методом «в изоляции» производятся с использованием автогидроподъемника с изолированным звеном (АГПИ) (рис. 5), средств индивидуальной защиты, средств коллективной защиты, диэлектрических штанг и траверс [2].



Рис. 5. Обучение управлению АГПИ для выполнения работ методом «в изоляции»

На воздушных линиях высокого и сверхвысокого напряжения при выполнении работ под напряжением применяется метод «на потенциале провода».

Инструменты и снаряжение для выполнения работ под напряжением

Выполнение ТООР по новой технологии послужило стимулятором для технического совершенствования в развитии используемого нового специального инструмента и снаряжения. При выполнении работ под напряжением применяются изолированные и изоляционные инструменты.

Изолированные инструменты изготавливаются из металла, покрываются изоляционным материалом для защиты работников от поражения электрическим током и недопущения короткого замыкания между проводящими частями с различным потенциалом (рис. 6 а). Изоляционное покрытие может состоять из одного или нескольких слоёв.

Если применяются два или три слоя, то они должны быть контрастного цвета [10]. Изолированные инструменты состоят полностью из изоляционного материала,

то для создания достаточной механической прочности в этих инструментах могут применяться усиливающие металлические вставки (рис. 6 б).



а



б

Рис. 6. Образцы изолированных инструментов (а) и изоляционных инструментов (б)

Для подготовки рабочего места к выполнению работ под напряжением и безопасного выполнения этих работ используются специальные приспособления и снаряжение.

В качестве индивидуального снаряжения могут использоваться: защитный шлем с забралом, различные пояса безопасности, защитные очки, диэлектрические перчатки, защитные кожаные перчатки. Так, например, при работе под напряжением до 1000 В электромонтер одновременно использует сразу

три пары перчаток: хлопчатобумажные тонкие перчатки для защиты рук от пота; тонкие диэлектрические перчатки и сверху кожаные защитные перчатки.

При выполнении работ под напряжением методом «на расстоянии» на ВЛЭП и в распределительных устройствах напряжением до 1000 В применяются изоляционные штанги и некоторые инструменты для совместного с ними применения (щётки, наконечники и др.) (рис. 7 а).



а



б

Рис. 7. Выполнение работ методом «на расстоянии» (а) и методом в изоляции

В качестве средств индивидуальной защиты при выполнении работ под напряжением методом «в изоляции» (рис. 7 б) ис-

пользуются: диэлектрические перчатки, диэлектрические нарукавники, защитные кожаные перчатки [2].

При выполнении работ под напряжением методом «в изоляции» есть некоторые особенности применения защитных средств. Так, для защиты от случайных прикосновений к токоведущим частям находящихся под напряжением или заземленным конструкциям частями тела, не защищенными диэлектрическими перчатками,

применяются изолирующие нарукавники, которые защищают руки от запястья до плеч. Периодичность испытаний диэлектрических перчаток и нарукавников – не менее 1 раза в 6 месяцев [2].

Рабочие испытательные напряжения для диэлектрических перчаток и нарукавников представлены в табл. 1 [2].

Таблица 1 – Рабочие испытательные напряжения для диэлектрических перчаток

Наименование средств индивидуальной защиты	Класс изделия	Рабочее напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ
Диэлектрические перчатки	2	17,0	20
Диэлектрические нарукавники	2	17,0	20

Для выполнения работ под напряжением следует использовать только сертифицированные средства защиты, имеющие маркировку с указанием завода-изготовителя, наименования или типа изделия и года выпуска, с не истекшим сроком периодического испытания (определяется по штампу испытательной лаборатории на средстве защиты) [11].

Изолирующими электрозащитными средствами следует пользоваться только по их прямому назначению в электроустановках напряжением не выше того, на которое они рассчитаны (наибольшее допустимое рабочее напряжение) в соответствии с технологией и методикой выполнения работы [11].

При обнаружении непригодности средств защиты они подлежат изъятию и удалению с места производства работ. Об изъятии непригодных средств защиты должна быть сделана запись в оперативной документации. Использовать при выполнении работ неисправные средства защиты не допускается [11].

Подготовка специалистов к выполнению технологии ПРПН

Стратегической целью внедрения технологии ПРПН являлась подготовка персонала нового поколения, способного качественно выполнять эксплуатацию распределительных сетей страны в современных условиях [12].

Как уже отмечалось в начале статьи, в соответствии с дорожной картой ПАО «Россе-

ти» обучение специалистов должно проводиться в учебных центрах подготовки персонала технологии ПРПН по соответствующим программам дополнительного профессионального образования (ДПО).

Первый учебный центр России, созданный и открытый в КТИ (филиал) ВолгГТУ, занимался обучением работников сетевых компаний выполнению работ под напряжением в электротехнических установках до 1000 В.

На начальном этапе была разработана и утверждена одна учебная программа дополнительного профессионального образования «Работы под напряжением на воздушных, кабельных линиях электропередач и в распределительных устройствах до 1000 В». Для реализации этой программы в учебном центре были созданы открытый и закрытый учебно-тренировочные полигоны, включающие в себя полный комплекс рабочих мест для наиболее часто встречающихся в практической деятельности работ (рис. 8).

Причем элементы ВЛ закрытого учебно-тренировочного полигона выполнены высотой, позволяющей проводить обучение персонала без подъема на опору. Все оборудование на учебно-тренировочных полигонах находится под рабочим напряжением и оснащено контрольными устройствами. Контролирующие устройства позволяют фиксировать ошибки, допускаемые при выполнении работ, и обеспечивают полную защиту персонала от поражения электрическим током [13].



Рис. 8. Обучение бригады ВМЭС
ПАО «Россети Юг» на закрытом полигоне
КТИ (филиал) ВолгГТУ

В дальнейшем сотрудниками учебного центра КТИ был расширен перечень программ повышения квалификации для электротехнического персонала ПАО «Россети», выполняющего работы под напряжением на воздушных, кабельных линиях и в распределительных устройствах:

- «Работы под напряжением на воздушных, кабельных линиях электропередач и распределительных устройствах до 1000 В»;
- «Работы под напряжением в электроустановках до 10 кВ для инженерно-технических работников, специалистов и руководителей предприятий»;
- «Работы под напряжением на ВЛИ (СИП) до 1000 В».

Программа повышения квалификации разработана для электротехнического персонала выполняющего работы по строительству и эксплуатации линий электропередач, выполненных СИП;

- «Чистка электроустановок до 10 кВ под напряжением».

Все эти годы постоянным партнером учебного центра КТИ было ООО «Сектор Энерго», которое является производителем и поставщиком инструмента, снаряжения и приспособлений для выполнения работ под напряжением.

С 2023 года установлены и закреплены партнерские связи с ООО «Сейф Технологии». Благодаря этому партнерству разработана и реализуется новая программа в области

выполнения работ под напряжением: «Управление автогидроподъемником с изолированным звеном при выполнении работ под напряжением в электроустановках до 46 кВ».

На стадии с МЧС России находится, разработанная в КТИ (филиал) ВолгГТУ программа ДПО «Экстремальное отключение электроснабжения потребителей до 1000 В во время проведения спасательных операций».

КТИ (филиал) ВолгГТУ является практически единственным вузом России, в котором технология ПРПН преподается в соответствующих курсах основной образовательной программы по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника и профилям «Электроснабжение» и «Цифровая энергетика».

Надежность, безопасность плюс экономическая выгода

Опыт проведения ТОиР по технологии ПРПН в распределительных сетях показал, что задачи, которые ставили перед собой инициаторы внедрения данной технологии, при решении вопросов повышения надежности и качества электроснабжения потребителей успешно решаются.

При этом надежность и качество электроснабжения потребителей достигаются в первую очередь за счет отсутствия перерывов в электроснабжении потребителей на время выполнения эксплуатационных работ или сведения перерывов в электроснабжении к минимуму.

Расчеты, проведенные авторами в момент начала внедрения технологии ПРПН в производственном отделении «Камышинские электрические сети» филиала ОАО «МРСК Юга» – «Волгоградэнерго», показали, что годовая упущенная выгода (из-за плановых отключений) районных электрических сетей Волгоградской области составила в среднем 10000 кВт·ч и 50 млн рублей [14].

И напротив, годовой экономический эффект при внедрении технологии ПРПН для распределительных сетей до 1 кВ в первый год работы составляет более 112 тыс. руб., во второй и последующие годы (без учета инфляции и увеличения тарифов) – более 183 тыс. рублей [14].

Особенно ощутимый эффект достигается при производстве работ в электрических сетях напряжением 6, 10 и 35 кВ.

Мониторинг отдельных видов работ, выполняемых без отключения и с отключением напряжения, представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Мониторинг выполнения работ в электротехнических установках с отключением и под напряжением

Виды работ	Выполняемые работы					
	с отключением			под напряжением		
	операции	время	участники	операции	время	участники
Обслуживание КТП 10/0,4 кВ	планирование	10 дней	бригада диспетчера оперативный персонал	планирование	0 дней	бригада
	вывод в ремонт	0,5-1,0 ч		вывод в ремонт	0 мин	
	подготовка рабочего места	15-20 мин		подготовка рабочего места	7-10 мин	
	работа по обслуживанию	1 ч		работа по обслуживанию	1,5 ч	
	восстановление рабочего места	10 мин		восстановление рабочего места	0 мин	
	ввод в работу	0,5-1,0 ч		ввод в работу	0 мин	
	Итого	10 дней, 1,93 ч		Итого	1,6 ч	
Замена изолятора 10 кВ	вывод в ремонт	1-1,5 ч	бригада диспетчера оперативный персонал	вывод в ремонт	0 мин	бригада
	подготовка рабочего места	15-20 мин		подготовка рабочего места	7-10 мин	
	работа по замене	5-7 мин		работа по замене	5-7 мин	
	восстановление рабочего места	10 мин		восстановление рабочего места	3 мин	
	ввод в работу	0,5-1,0 ч		ввод в работу	0 мин	
	Итого	2,0 ч		Итого	15,0 мин	
Подключение / Отключение	планирование	10 дней	бригада диспетчера оперативный персонал	планирование	0 дней	бригада
	вывод в ремонт	0,5 ч		вывод в ремонт	0 мин	
	подготовка рабочего места	15-20 мин		подготовка рабочего места	20-30 мин	
	работа по подключению	20 мин		работа по подключению	20 мин	
	восстановление рабочего места	10 мин		восстановление рабочего места	5 мин	
	ввод в работу	0,5 ч		ввод в работу	0 мин	
	Итого	10 дней, 1,75 ч		Итого	0,75 ч	
Обнаружение дефекта (нагрев контакта)	Сообщить диспетчеру Оформить в журнал Назначить ответственного Включить в план Подать заявку Вывести в ремонт Устранить Ввести в работу Внести записи в журнал			Сообщить диспетчеру Устранить Внести записи в журнал		

Анализ таблицы подтверждает снижение длительности перерывов при выполнении работ в электротехнических установках под напряжением, что в конечном итоге приводит к повышению надежности электроснабжения потребителей.

Проблемы и риски реализации технологии ПРПН

Как отмечают И.М. Валеев и Т.А. Мусаев [4], несмотря на явные преимущества внедрения технологии ПРПН, и, как показывает отечественный и зарубежный опыт, предлагаемая методика проведения работ имеет определенные риски.

В качестве рисков проведения ПРПН необходимо отметить:

- опасность для нормальной работы электроустановок и для обслуживающего персонала;
- повышение вероятности возникновения аварийных ситуаций;
- возникновение различных нештатных ситуаций, в процессе эксплуатации электрооборудования (с течением времени снижается электрическая характеристика изоляции, изнашиваются токоведущие части, обмотки и подшипники электрических машин, отдельные механические детали).

В результате этого, а также из-за заводских дефектов, неправильных действий персонала, загрязнения, неблагоприятных атмосферных условий и других причин происходят износ и повреждение электрооборудования [4].

Еще одним существенным риском является отсутствие единого Образовательного стандарта по направлению профессиональной подготовки «Выполнение ТОиР по технологии ПРПН» и, как следствие, единого подхода к организации учебного процесса в центрах подготовки персонала сетевых организаций при обучении методам ПРПН. Эта проблема возникла в связи с реализацией дорожной карты ПАО «Россети» и созданием собственных Центров повышения квалификации.

В настоящее время наряду с учебным центром КТИ (филиал) ВолгГТУ организовано обучение технологии ПРПН в Центре работ под напряжением (г. Заинск, Татарстан), в ПАО «Россети Московский регион» на базе собственного Учебного центра, в Энергетическом институте повышения квалификации ПАО «Кубаньэнерго» (г. Краснодар), в Учебном центре «Россети Урал» (г. Екатеринбург), на Учебно-практическом полигоне «Ленэнерго» и др.

Во избежание возможных рисков при организации обучения, таких, например, как излишняя и неоправданная самостоятельность обучающих организаций, приводящая к несогласованности учебных планов и рабочих программ, разрозненному и некачественному методическому обеспечению, неполному или неправильному обеспечению учебного процесса специальным инструментом и снаряжением, возникает необходимость в создании единого образовательного пространства при обучении технологии ПРПН.

Начиная с 2019 года на ежегодной Международной научно-технической конференции «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей» работает секция, частично или полностью посвященная вопросам организации работ под напряжением. В работе этой секции принимают участие с докладами авторы статьи (рис. 9).



Рис. 9. Выступление на VIII конференции «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей»

Так, в докладе «Формирование единого профессионального образовательного пространства при обучении выполнению работ под напряжением в электротехнических установках до и выше 1000 В» на VIII конференции в 2023 году одними из предложений авторов данной статьи были:

- разработка и утверждение Образовательного стандарта по направлению профессиональной подготовки выполнению ТОиР по технологии ПРПН;

- создание базовой организации для профессионального образования, профессиональной подготовки/обучения, повышения квалификации персонала по технологии ПРПН.

По итогам конференции было принято решение о целесообразности разработки образовательного стандарта по направлению профессиональной подготовки выполнения ТОиР по технологии проведения работ под напряжением.

Эта тема получила дальнейшее развитие в апреле 2024 года на совещании главных инженеров группы компаний «Россети» по актуальным вопросам производственной деятельности. На совещании было предложено создать на базе Учебного Центра ПАО «Россети Московский регион» единый Центр компетенций ПАО «Россети» по обучению персонала группы Компаний «Россети» выполнению

работ под напряжением в электроустановках 0,4-10 кВ. Планируется создание общего образовательного пространства по данной технологии, что должно повысить качество подготовки персонала ПАО «Россети», а это, в свою очередь, приведет к повышению качества ТОиР и надежности электроснабжения потребителей.

Выводы

Создание единого профессионального образовательного пространства при обучении технологии производства работ под напряжением позволит избежать в учебном процессе возможных методических ошибок, излишней и неоправданной самостоятельности обучающих организаций и, таким образом, поднять обучение персонала ПАО «Россети» современным инновационным технологиям ПРПН на высокий научно-технический уровень.

Разработка и реализация новых программ дополнительного профессионального образования по обучению работам под напряжением, ориентированным на повышение надежности распределительных электрических сетей, повышение качества ТОиР электротехнических установок, позволят успешно выполнить дорожную карту Группы «Россети» по внедрению ПРПН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок: Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15.12.2020 № 903н. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс» (дата обращения: 05.09.2024).

2. **Иванов Р.В.** Работа под напряжением методом в изоляции: Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей: презентация доклада IX Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 3-4 июля 2024 г. URL: [https://eepir.ru/wp-](https://eepir.ru/wp-content/uploads/2024/07/Ivanov-Roman-V.-Rosseti-Moskovskij-region_Raboty-metodom-v-izolyacii.pdf)

[content/uploads/2024/07/Ivanov-Roman-V.-Rosseti-Moskovskij-region_Raboty-metodom-v-izolyacii.pdf](https://eepir.ru/wp-content/uploads/2024/07/Ivanov-Roman-V.-Rosseti-Moskovskij-region_Raboty-metodom-v-izolyacii.pdf) (дата обращения 12.10.2024).

3. Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 29 ноября 2016 г. № 1256

[Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс» (дата обращения: 16.09.2024).

4. **Валеев И.М., Мусаев Т.А.** Оценка эффективности работ под напряжением на предприятиях электрических сетей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 3 (122). С. 46-53.

5. **Богданов В.В., Хромов Н.П., Сошинов А.Г.** Подготовка энергетиков нового // Технические науки – от теории к практике: матер. XX Междунар. заоч. науч.-практ. конф. 17 апр. 2013 г. / Сибирская ассоциация консультантов (СибАК). Новосибирск, 2013. С. 23-33.

6. **Богданов В.В., Хромов Н.П., Сошинов А.Г.** Инновационный подход к подготовке энергетиков нового поколения // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. г. Новочеркасск, 14-18 окт. 2013 г. / Южно-Российский гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск, 2013. Т. 1. С. 298-301.

7. **Барг И.Г., Полевой С.В.** Ремонт воздушных линий электропередачи под напряжением. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 224 с.

8. **Бибин Е.А.** Совершенствование охраны труда при выполнении работ под напряжением: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01; [Место защиты: Моск. энергет. ин-т]. Москва, 2010. 158 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/658.

9. **Дремлюга А.Б., Сошинов А.Г.** Программы и методика подготовки специалистов для проведения ремонтных работ в электросетевом комплексе под

напряжением // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф., г. Иваново, 9-13 ноября 2015 г. / ИГЭУ им. В.И. Ленина. Иваново, 2015. Т. 3. С. 522-527.

10. ГОСТ ИЕС 60900-2019. Работа под напряжением. Ручные инструменты для работ под напряжением до 1000 В переменного и 1500 В постоянного тока. Общие требования и методы испытаний.

11. Типовая инструкция организации и выполнению работ под напряжением в электроустановках до 1000 В: утв. Членом правления, техническим директором ОАО РАО «ЕЭС России» Б.Ф. Вайнзихером 31.03.2008. URL: https://hydropower.ru/lib/detail.php?list_id=55&element_id=7985&ysclid=m42kzsyg3r759212109 (дата обращения 12.10.2024).

12. **Сошинов А.Г.** Методика проведения ремонтных работ в электросетевом комплексе под напряжением // Справочник специалиста по охране труда. 2014. № 9. С. 35-43.

13. **Богданов В.В., Богданов И.В., Сошинов А.Г.** Инновационный подход в подготовке энергетиков нового поколения по производству работ под напряжением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11-4. С. 537-540. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6174> (дата обращения: 01.12.2024).

14. **Сошинов А.Г.** Ремонтные работы под напряжением // Энергонадзор. 2014. № 12 (64). С. 48-51.

Сошинов Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Anatoly G. Soshinov – PhD (Technical Sciences), Head: Department of Electricity Supply Systems for Industrial Enterprises, Branch of Volgograd State Technical University, Kamyshin Technological Institute

Атрашенко Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Olga S. Atrashenko – Senior Lecturer, Department of Electricity Supply Systems for Industrial Enterprises, Branch of Volgograd State Technical University, Kamyshin Technological Institute

Панасенко Михаил Владимирович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета

Mikhail V. Panasenko – Lecturer, Department of Electricity Supply Systems for Industrial Enterprises, Branch of Volgograd State Technical University, Kamyshin Technological Institute

Статья поступила в редакцию 26.11.24, принята к опубликованию 12.12.24

УДК 621.311.6: 621.314.58

ГИБРИДНАЯ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВЧ-УСТАНОВКИ

И.И. Артюхов, М.Д. Николаев, А.Г. Катунцев

HYBRID SOLAR-DIESEL POWER SUPPLY SYSTEM FOR MICROWAVE INSTALLATION

I.I. Artyukhov, M.D. Nikolaev, A.G. Katuntsev

Для осуществления широкого спектра технологических процессов применяют СВЧ-установки. Если эти установки получают электроэнергию от мощной промышленной сети, то применение типовых решений для построения магнетронных генераторов не вызывает проблем. Однако при подключении СВЧ-установки к источнику энергии ограниченной мощности, например к дизель-генератору или солнечным батареям практически невозможно обеспечить стабильность режима работы. В статье анализируется эта проблема, рассматриваются варианты ее решения.

Ключевые слова: СВЧ-установка, магнетрон, система электропитания, дизель-генератор, солнечные панели

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ-нагрева в термических процессах обусловлены особенностями ее поглощения. СВЧ-энергия преобразуется в тепло внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1]. Большое число СВЧ-установок используется, в частности, для термообработки сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, которые обычно содержат много воды и поэтому хорошо поглощают СВЧ-энергию. При этом широкое применение получили установки конвейерного типа [2], в которых СВЧ-энергия распре-

To implement a wide range of technological processes, conveyor microwave installations are used. If these installations receive electricity from the powerful industrial network, then the use of standard solutions for the construction of magnetron generators does not cause problems. However, when connecting a microwave installation to a limited-power energy source, such as a diesel generator or solar batteries, it is virtually impossible to ensure stable operation. The article analyzes this problem and discusses options for solving it.

Keywords: microwave installation, magnetron, power supply system, diesel generator, solar panels

деляется по всему объему установки за счет применения нескольких генераторов СВЧ-колебаний.

В последнее время получают развитие мобильные СВЧ-установки. Они применяются для сезонной термообработки сельхозпродукции на фермерских хозяйствах, находящихся на значительном удалении от централизованных сетей электроснабжения [3], размораживания и плавки льда [4], нагрева грунта [5], организации пунктов питания в экспедициях и т. д. Перспективным направлением является использование электромагнитных колебаний СВЧ-диапазонов для быстрой стерилизации медицинских инструментов в полевых и походных условиях [6].

Для создания электромагнитных колебаний в рабочих камерах СВЧ-установок наиболее часто применяют магнетроны, причем при относительно небольшой мощности магнетронов они выполнены пакетированной конструкции, то есть на постоянных магнитах.

Для работы пакетированного магнетрона требуется источник питания с двумя выходами. С одного выхода снимается напряжение для нагрева катода. На другом выходе формируется высокое напряжение, которое подается на промежуток анод-катод магнетрона.

Исторически сложилось так, что приоритетное направление при разработке источников питания магнетронов состояло в упрощении схемы и минимизации ее элементов. Такой подход приемлем для СВЧ-устройств бытового и некоторых применений промышленного назначения.

На рис. 1 показана одна из наиболее распространенных схем источников питания магнетронов.

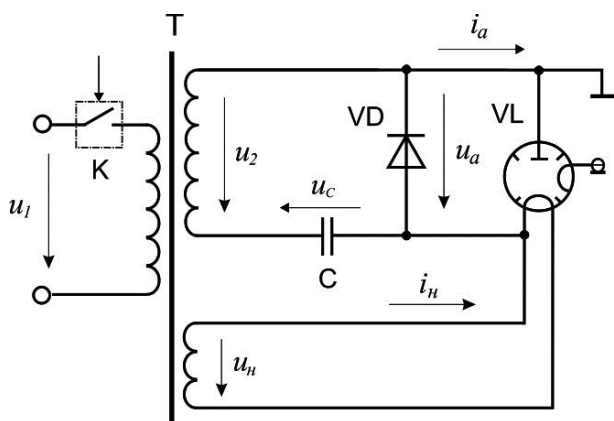


Рис. 1. Схема источника питания магнетрона с одним трансформатором

Основой схемы является силовой трансформатор Т с двумя вторичными обмотками. Первичная обмотка трансформатора подключается к питающей сети с напряжением u_1 . Обмотка высокого напряжения u_2 и несимметричный удвоитель напряжения на конденсаторе С и диоде VD образуют источник анодного питания магнетрона. Другая вторичная обмотка с напряжением u_H обеспечивает нагрев катода.

Возможен вариант схемы с двумя трансформаторами (рис. 2). Один трансформатор ТН обеспечивает нагрев катода, другой ТА подает энергию в анодную цепь. Наличие второго трансформатора в этой схеме, естественно, усложняет конструкцию, однако предоставляет дополнительные возможности за счет разделения процессов управления магнетроном по катодной и анодной цепям.

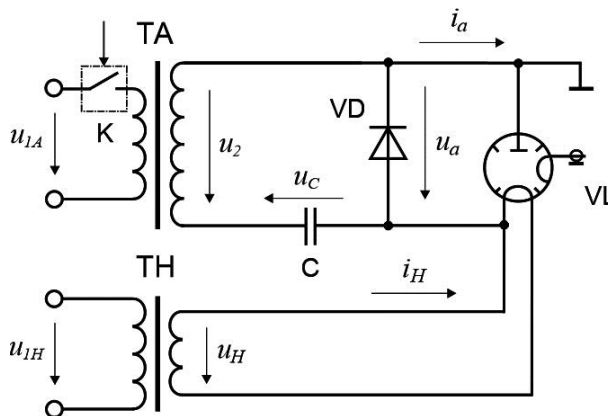


Рис. 2. Схема источника питания магнетрона с двумя трансформатором

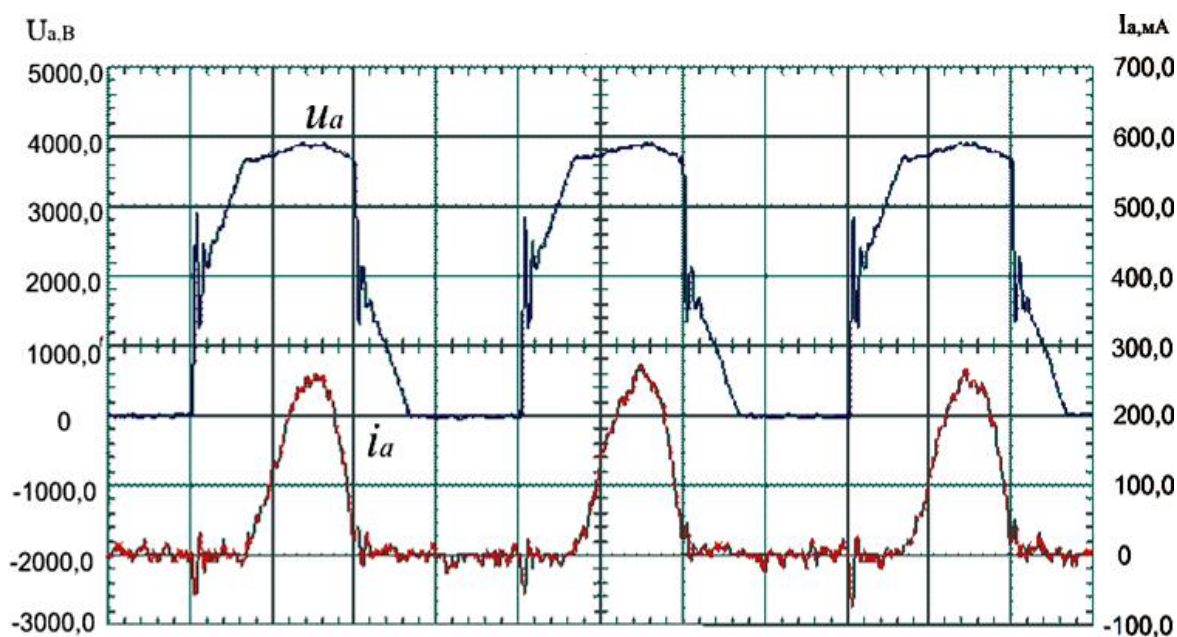
Существующие источники питания рассчитаны на подключение к промышленной сети 50 Гц, при этом вследствие простоты конструкции в них не предусмотрена плавная регулировка выходной мощности магнетрона. Для регулирования интенсивности нагрева используется способ изменения длительности включенного состояния магнетрона с помощью коммутатора К. Кроме того, существенным недостатком типовых схем является сильная зависимость выходной мощности магнетрона от напряжения сети [7].

Результаты экспериментальных исследований [8] объясняют причину этого явления. Прежде всего надо помнить, что магнетрон имеет существенно нелинейную вольт-амперную характеристику с малым динамическим сопротивлением на рабочем участке. При этом если магнетроны мощностью 5-6 кВт и более запитываются по анодной цепи напряжением с низким уровнем пульсаций, то применение простых схем (рис. 1 и 2) не позволяет сделать этого.

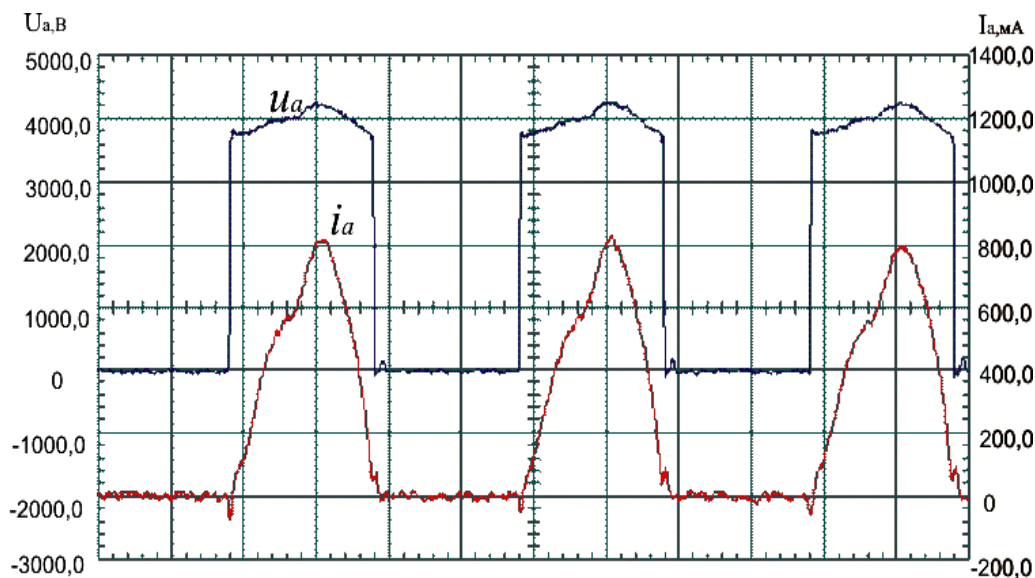
На рис. 3 показаны осциллограммы, характеризующие работу магнетрона 2М214 фирмы LG. Для записи осциллограмм при-

менялся двухканальный запоминающий осциллограф Fluke 196С. Источник питания магнетрона был собран по двухтрансфор-

маторной схеме (рис. 2). На первичную обмотку накального трансформатора подавалось фиксированное напряжение 220 В.



а



б

Рис. 3. Осциллограммы анодного тока и напряжения на аноде при напряжении питания анодного трансформатора 170 В (а) и 230 В (б)

Масштаб по оси абсцисс: 1 деление – 5 мс. Из осциллограмм видно, что для исследуемого магнетрона пороговое значение напряжения U_0 , при котором начинается генерация СВЧ-колебаний, составляет ориентировочно 3800 В. Если напряжение питания анодного трансформатора равно 170 В, то анодное напряжение u_a достигает

указанного порогового значения U_0 только спустя некоторое время после начала полупериода сетевого напряжения. При дальнейшем увеличении напряжения на первичной обмотке анодного трансформатора до 240 В происходит увеличение среднего значения анодного тока от 50 до 250 мА, при этом рассеиваемая на аноде магнетрона мощность

возрастает от 180 до 980 Вт. График зависимости мощности на аноде магнетрона от напряжения питания сети показан на рис. 4.

Из-за того что элементы источников питания (рис. 1 и 2) работают на частоте 50 Гц, они имеют неудовлетворительные массогабаритные показатели. Кроме того,

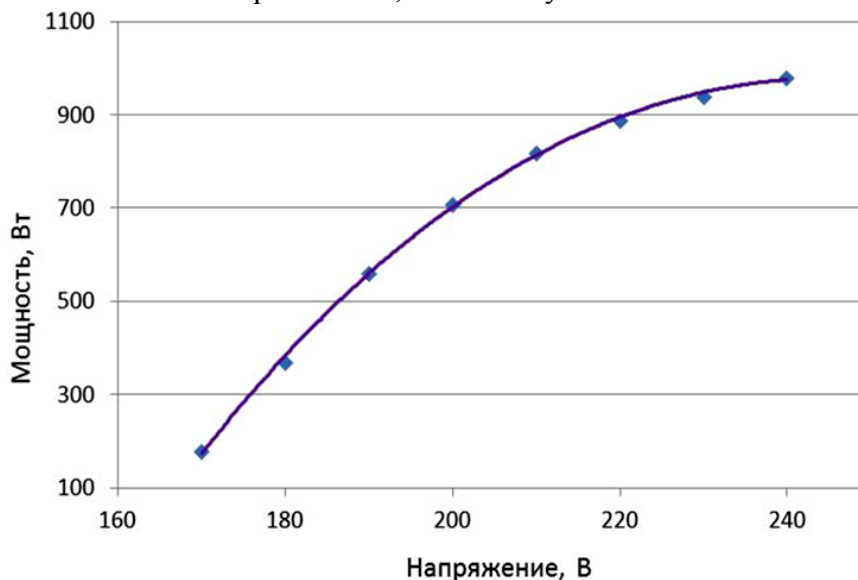


Рис. 4. График зависимости мощности на аноде магнетрона от напряжения сети

Таким образом, необходимо принципиально изменить подход к построению систем электропитания СВЧ-установок на пакетированных магнетронах. При этом надо иметь в виду, что источниками энергии в общем случае могут быть дизель-генератор, ветрогенераторы и солнечные панели [9].

Выше было показано, что для управления или, в частном случае, стабилизации режима работы СВЧ-установки необходимо иметь возможность воздействовать на амплитуду напряжения между анодом и катодом магнетрона.

В [10] приведены результаты исследования технического решения, которое предусматривает применение на первичной обмотке анодного трансформатора регулятора напряжения в виде встречно-параллельно соединенных тиристоров с импульсно-фазовым управлением. Соответствующая схема приведена на рис. 5.

Основу генератора составляет магнетрон VL. Электропитание цепи анод – катод магнетрона осуществляется с применением однофазного мостового выпрямителя

сильная зависимость выходной мощности магнетронных генераторов от величины сетевого напряжения не позволяет применить эти схемные решения при разработке и создании мобильных СВЧ-установок, способных работать в полевых и походных условиях.

VD1-VD4, вход которого подключен к высоковольтной обмотке повышающего трансформатора ТА. Накал катода осуществляется с помощью трансформатора ТН, первичная обмотка которого соединена с фазой источника питания через регулятор напряжения РН.

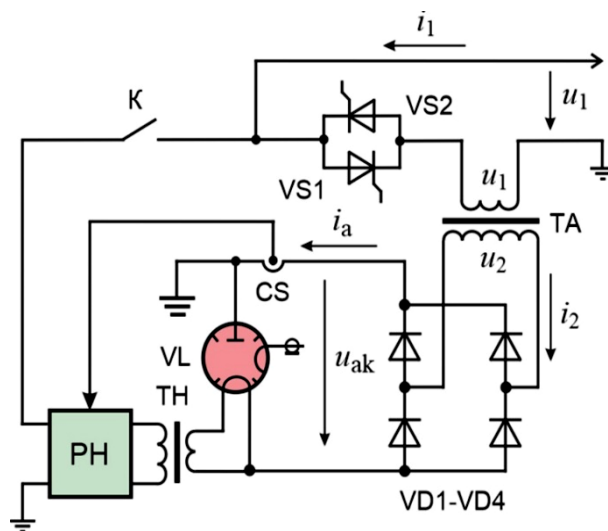


Рис. 5. Схема магнетронного генератора с тиристорным регулятором напряжения

Схемное решение на рис. 5 имеет ряд недостатков. Тиристорный регулятор VS1, VS2 позволяет изменять среднееквадратичное значение напряжения в широком диапазоне угла управления α . Это свойство является полезным для электротермических установок резистивного нагрева, так как мощность этих установок при заданном сопротивлении нагревательных элементов зависит от квадрата действующего напряжения. Однако в системе электропитания магнетрона импульсно-фазовое регулирование напряжения не приводит к требуемому эффекту. Это объясняется тем, что магнетрон входит в режим генерации СВЧ-колебаний только после того, как напряжение между анодом и катодом магнетрона превышает пороговое значение U_0 . Поэтому изменение угла управления α тиристорами в диапазоне от 0 до некоторого

значения, которое зависит от величины питающего напряжения, не приводит к изменению тока магнетрона и соответствующему изменению его выходной мощности.

В ряде работ, в том числе [11, 12], предложены схемы источников питания, в которых используются анодные трансформаторы с магнитными шунтами. Недостаток этих схем состоит в том, что они не позволяют регулировать режим работы магнетронного генератора, а только ограничивают величину анодного напряжения при колебаниях параметров сети.

На рис. 6 показана гибридная схема электропитания СВЧ-установки, состоящей из N магнетронных генераторов. Необходимая для работы установки энергия вырабатывается дизель-генератором и солнечными панелями.

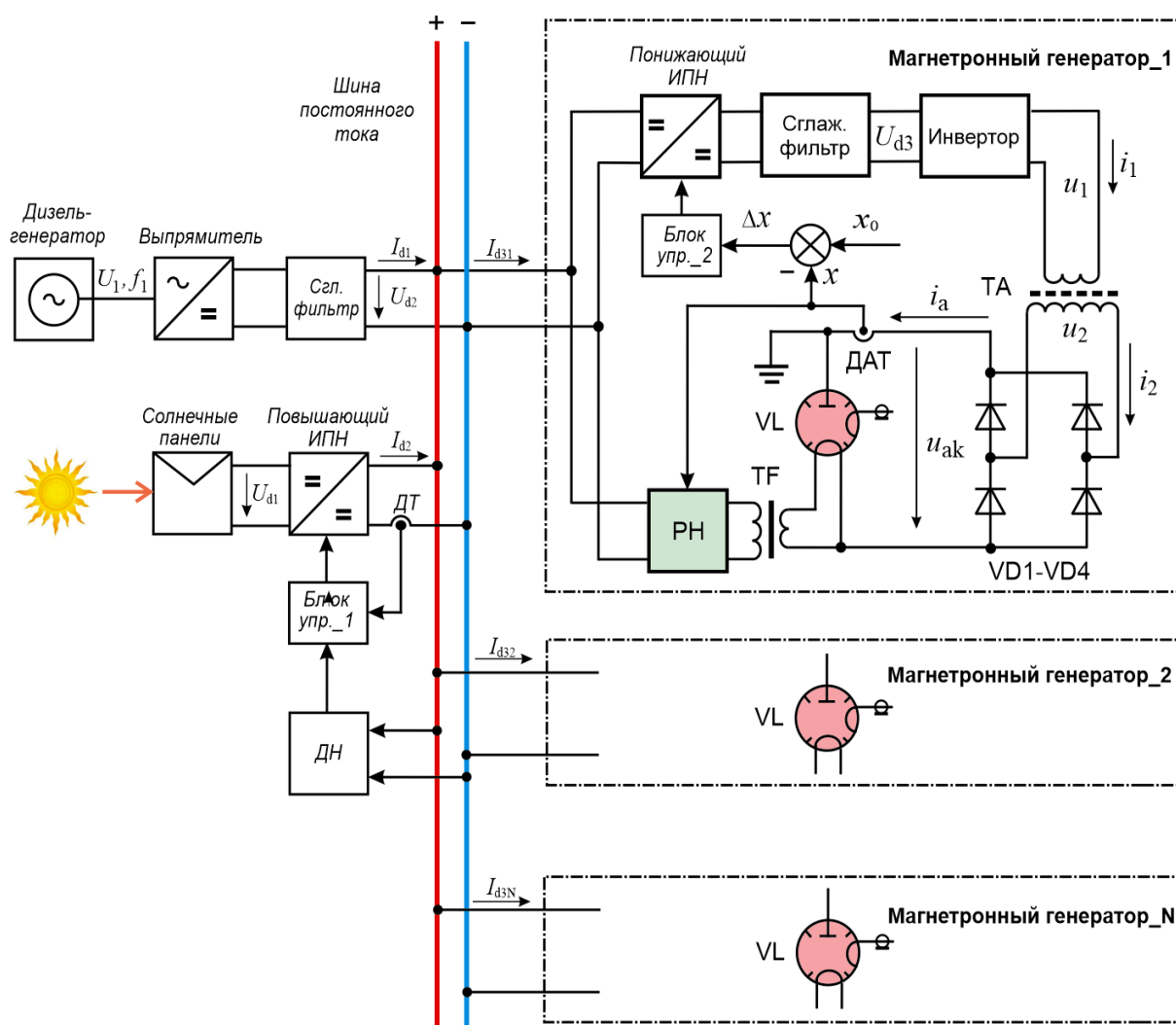


Рис. 6. Гибридная схема электропитания СВЧ-установки

Суммирование мощности источников энергии осуществляется на шине постоянного тока, к которой через сглаживающий фильтр подключен выход выпрямителя. Сюда же через повышающий импульсный преобразователь напряжения присоединены солнечные панели. Блок управления (Блок упр._1) этим преобразователем оснащен функцией поиска точки максимальной мощности солнечных панелей. Для этого на него поступают сигналы от датчика тока ДТ и датчика напряжения ДН.

Питание анодных цепей каждого из магнетронных генераторов осуществляется по схеме с промежуточным звеном повышенной частоты. Это позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели генераторов.

Напряжение U_{d2} с шины постоянного тока через понижающий импульсный преобразователь напряжения и сглаживающий фильтр подается на вход инвертора. Блок управления (Блок упр._2) позволяет за счет широтно-импульсной модуляции регулировать напряжение U_{d3} и тем самым изменять амплитуду напряжений u_1 и u_2 на обмотках анодного трансформатора ТА. Это дает возможность стабилизировать режим работы магнетронного генератора.

Сигнал x с датчика анодного тока (ДАТ) сравнивается с сигналом x_0 опорного источника, задающего режим работы генератора. В результате формируется сигнал ошибки

$$\Delta x = x_0 - x.$$

Под действием этого сигнала Блок упр._2 формирует коэффициент модуляции, необходимый для стабилизации выходной мощности магнетрона.

Магнетронные генераторы потребляют от шины постоянного тока мощность

$$P_{MG1} + P_{MG2} + \dots P_{MGN} = (I_{d31} + I_{d32} + \dots I_{d3N}) \cdot U_{d2}.$$

Источники энергии отдают в шину постоянного тока мощность

$$P_{ДГ} + P_{СП} = (I_{d1} + I_{d2}) \cdot U_{d2}.$$

Соотношение между значениями $P_{ДГ}$ и $P_{СП}$ зависит от технических характеристик дизель-генератора и солнечных панелей. Таким образом, возникает необходимость в решении оптимизационной задачи.

В любом случае доля $P_{ДГ}$ будет уменьшаться при возрастании инсоляции. Это позволяет снизить расход дизельного топлива, что является положительным фактором при размещении СВЧ-установки на значительном удалении от автозаправочных станций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Промышленное применение СВЧ-нагрева / О. Морозов, А. Каргин, Г. Савенко, В. Требух, И. Воробьев // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2010. № 3. С. 2-6.

2. Novel foodstuff conveyor belts compound for energy saving: the effect of microwave pre-heating and 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. **Ербаев Е.Т.** Применение возобновляемых источников энергии для электрообеспечения СВЧ-установок агропромыш-

ленного комплекса // *Вопросы электротехнологии*. 2022. № 3 (36). С. 62-66.

4. **Тригорлый С.В., Чудров А.А** Моделирование СВЧ-размораживания грунта // *Вопросы электротехнологии*. 2023. № 1(38). С. 14-20.

5. **Тригорлый С.В., Желнов В.Е.** Компьютерное моделирование СВЧ электротехнологических установок с волноводно-щелевыми излучающими системами // *Вопросы электротехнологии*. 2023. № 1(38). С. 21-28.

6. Расширение областей применения быстродействующего СВЧ-стерилизатора и обеспечение его работы в походных и

полевых условиях / В.Б. Байбурин, В.П. Мещанов, А.А. Никифоров и др. // Вопросы электротехнологии. 2024. № 3 (44). С. 22-28.

7. **Артюхов И.И., Николаев М.Д.** Особенности функционирования СВЧ-установки конвейерного типа при колебаниях параметров питающей сети // Вопросы электротехнологии. 2024. № 1 (42). С. 87-94.

8. **Артюхов И.И., Земцов А.И., Тютюманова В.В.** Экспериментальное исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности // Вопросы электротехнологии. 2015. № 2 (7). С. 72-76.

9. 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 En-

gineering (Brno, Czech Republic). 2018. DOI: 0.1109/EPE.2018.8395978.2.

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. New Simulation Method of New HV Power Supply for Industrial Microwave Generators with N=2 Magnetrons / N. El Ghazal, A. Belhaiba, M. Chraygane at al. // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2013. Vol. 4. № 12. P. 55-64.

12. Failures' Study of a New Character Three-Phase High Voltage Supply for industrial Microwave Generators with one Magnetron per Phase / R. Batit, M. Chraygane, M. Ferfra at al. // Journal of Engineering Science and Technology Review 2016. Vol. 9. № 1. P. 145-150.

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

Николаев Михаил Денисович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Катунцев Александр Геннадьевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Mikhail D. Nikolaev – Postgraduate Student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander G. Katuntsev – Master's student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.11.24, принята к опубликованию 12.12.24

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) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/134, главному редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Артюхову И.И. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ Р 7.0.5-2008 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 20.12.2024 Дата выхода в свет 26.12.2024

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 11,5 Уч. изд. л. 5,0

Тираж 500 экз. Заказ 56 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 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 2025 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
Translation and editing by A.H. Askarova

Address of the editorial office:
77 Politekhnicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 20.12.2024 Date of publication: 26.12.2024

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 11,5 Publication base sheet 5,0

Circulation: 500 printed copies. Order 56 Subscription and individual copies: open rates

Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnicheskaya Str.

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: PI No. *FS77-54621*

