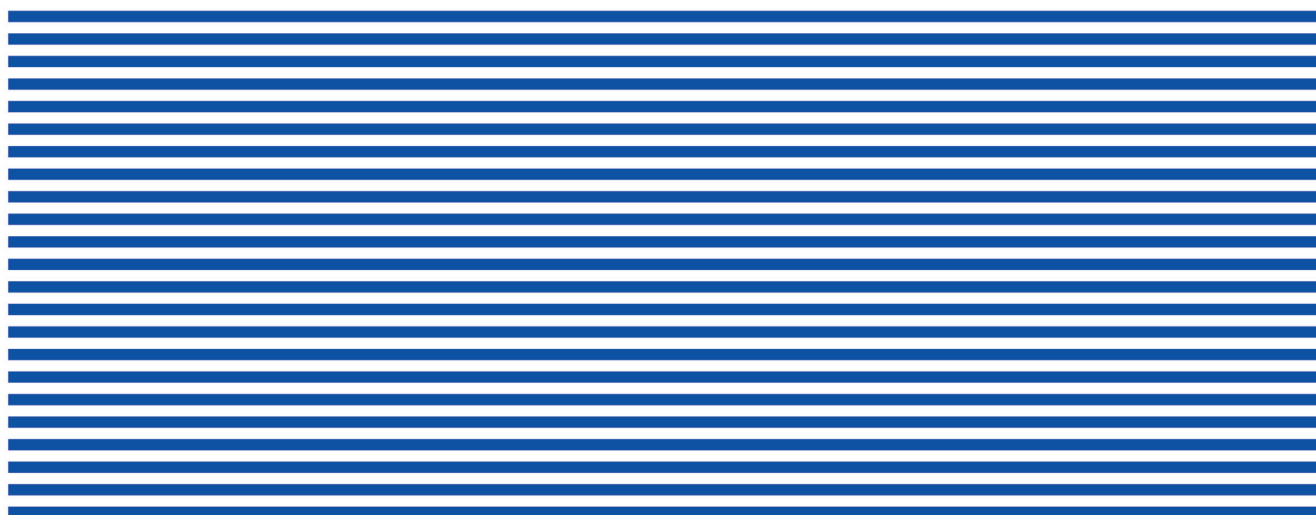




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2025

№ 3 (48)

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (48)
Сентябрь 2025

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

№ 3 (48)
September 2025

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

Качанов А.Н., Миронов Е.А. Исследование энергетических характеристик системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем – цилиндрическая загрузка» в программной среде ELCUT	5
Кошуро В.А., Фомина М.А., Захаревич А.М., Судакова Т.И., Рафалович А.Д., Фомин А.А. Индукционно-термическое вакуумное напыление молибдена на бромеллитовые втулки	13

ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Никифоров А.А., Дорошенко В.М., Самойлова Е.М., Никифорова О.В. Разработка масштабируемого информационно-измерительного комплекса мониторинга микроклимата для различных помещений	26
--	----

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Федин М.А., Булатенко М.А., Ареев Я.В., Василенко А.И. Моделирование гистерезиса конструкци- онной стали в индукционно-резистивной системе нагрева на промышленной и средних частотах	35
--	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Червоненко А.П., Попов Н.С., Домахин Е.А. Оптимизация процесса имитационного моделирования электротехнических комплексов	48
Кучменко Н.А., Молот С.В. Выбор активного фильтра для системы электропитания группы частотно- регулируемых электроприводов	54
Щербаков Ю.Г., Мишекин В.Д. Повышение эффективности солнечных панелей за счет своевременной очистки	60
Артюхов И.И., Николаев М.Д. Влияние частоты напряжения в питающей сети на режим работы магнетронного генератора	67
Вил Бариевич Байбури (к 90-летию со дня рождения)	75
К сведению авторов	77

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Kachanov A.N., Mironov E.A. Investigation of energy characteristics of the system “inductor with a traveling electromagnetic field – cylindrical load” in the ELCUT software environment.....	5
Koshuro V.A., Fomina M.A., Zakharevich A.M., Sudakova T.I., Rafalovich A.D., Fomin A.A. Induction-thermal vacuum deposition of molybdenum over bromellite bushings.....	13

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Nikiforov A.A., Doroshenko V.M., Samoylova E.M., Nikiforova O.V. Development of a scalable information-measurement complex for monitoring microclimate in various rooms.....	26
---	----

THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

Fedin M.A., Bulatenko M.A., Areev Ya.V., Vasilenko A.I. Modeling of structural steel hysteresis for inductive heating systems at industrial and medium frequencies.....	35
---	----

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Chervonenko A.P., Popov N.S., Domakhin E.A. Optimizing the simulation process of electrical complexes	48
Kuchmenko N.A., Molot S.V. Selecting an active filter for the power supply system to a group of variable frequency drives	54
Scherbakov Yu.G., Mishekin V.D. Increasing the efficiency of solar panels by timely cleaning	60
Artyukhov I.I., Nikolaev M.D. Influence of the supply network voltage frequency on the operation mode of a magnetron generator.....	67
Vil Barievich Bayburin (on the 90th anniversary of his birth)	75
Information for Authors.....	77

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.365.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР С БЕГУЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ – ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ЗАГРУЗКА» В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ELCUT

А.Н. Качанов, Е.А. Миронов

INVESTIGATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM «INDUCTOR WITH A TRAVELING ELECTROMAGNETIC FIELD – CYLINDRICAL LOAD» IN THE ELCUT SOFTWARE ENVIRONMENT

A.N. Kachanov, E.A. Mironov

В статье рассмотрены области применения индукционных устройств с бегущим электромагнитным полем и предложено их использование для предварительного нагрева под закалку валков прокатных станков. Представлены математические модели системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем – цилиндрическая загрузка». По результатам исследования получены зависимости электрического КПД и коэффициента мощности данной системы от конструктивных параметров магнитопровода индуктора; зазоров между индуктором и загрузкой, между двумя индукторами, при различных способах их включения. С учётом выявленных зависимостей сформулированы научно-практические рекомендации по выбору параметров системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем – цилиндрическая загрузка».

Ключевые слова: индукционный нагрев, бегущее электромагнитное поле, энергоэффективность, мощность тепловыделения, электродинамические силы, валок прокатного стана, цилиндрическая загрузка, программная среда ELCUT

The article considers the application areas of induction devices with a traveling electromagnetic field and proposes their use in pre-heating for hardening of rolling mill rolls. Mathematical models of the system «inductor with a traveling electromagnetic field - cylindrical load» are presented. Based on the results of the study, dependence of electrical efficiency and power factor of this system on the design parameters of the inductor magnetic circuit; the gaps between the inductor and the load, between two inductors with different ways of their connection are obtained. Taking into account the revealed dependencies, scientific and practical recommendations for choosing the parameters to the system «inductor with a traveling electromagnetic field - cylindrical load» are formulated.

Keywords: induction heating, traveling electromagnetic field, energy efficiency, heat release power, electrodynamic forces, rolling mill roll, cylindrical load, ELCUT software environment

Введение

Индукционный нагрев, пройдя более чем вековой путь развития, зарекомендовал себя как наиболее эффективный способ бесконтактной передачи тепла в электропроводящую среду и получил широкое распространение в различных отраслях промышленности за счёт удобства его встраивания как в действующие, так и в проектируемые электротехнологические комплексы и системы. Основным достоинством индукционного нагрева является передача энергии непосредственно в нагреваемый слой, что позволяет осуществить прямой глубинный нагрев, а также значительно увеличить его скорость и производительность. Однако, существуют такие технологические задачи, где помимо непосредственно нагрева, также требуется получить движение нагреваемого объекта.

Для этих целей применяется индукционный нагрев с использованием бегущего электромагнитного поля (БЭМП), что позволяет оказывать на проводящие тела как тепловое, так и механическое воздействие. Бегущее электромагнитное поле в нагреваемом объекте наводит вихревые токи, которые не только обеспечивают нагрев, но и вызывают появление электродинамических сил в нём. Использование данного эффекта привело к созданию на этой основе различных электротехнологических устройств, которые в настоящее время успешно применяются [1- 4]:

- для одновременного нагрева и перемещения слитков металлов;
- для нагрева и электромагнитного перемешивания расплавов металлов;
- для нагрева и перемещения высушиваемого материала при сушке шпона и длинномерных волокнистых материалов;
- в качестве магнитогидродинамических насосов (МГД-насосов) и др.

Одним из перспективных направлений использования индукционного нагрева с использованием БЭМП, является предварительный нагрев под закалку крупногабаритных валков прокатных станов (их размеры могут достигать до 8 метров в длину

и 2 метров в диаметре). Известно, что валки прокатных станов при работе подвергаются воздействию значительных контактных давлений, вследствие чего к поверхностям их рабочих частей (бочек) предъявляются повышенные требования по твердости, прочности, износостойкости и трещиностойкости. Соответствие валков перечисленным требованиям достигается путем изготовления их из высоколегированных углеродистых сталей, а также сложной многостадийной термообработкой, заключительной частью которой является индукционная поверхностная закалка бочки валка, при этом сам валок для получения однородного температурного поля приводится во вращение электроприводом. При индукционной закалке таких крупногабаритных изделий как валки прокатных станов требуется учитывать, что:

1. для снижения установленной мощности источника питания необходимо использовать непрерывно-последовательный способ нагрева;
2. для повышения производительности и эффективности нагрева необходимо использовать две секции индукторов, работающих на разных частотах (промышленной и повышенной);
3. для получения качественного закаленного слоя необходимо выполнить несколько циклов предварительного нагрева на промышленной частоте, обеспечивающего перепад температур между поверхностью бочки и её центром перед закалкой на повышенной частоте не более 500 °С [5, 6].

Применение токов промышленной частоты целесообразно на начальной стадии при нагреве до точки Кюри, когда магнитная проницаемость остается относительно постоянной, а удельное сопротивление растет. Целью данного этапа является формирование температурного профиля по поперечному сечению валка, т.е. нагрев до достижения максимального перепада температуры между его поверхностью и сердцевиной при котором термонапряжения не превышают предельных значений [7]. При достижении температуры точки Кюри,

когда нагреваемый слой теряет свои магнитные свойства и быстро падает мощность, нагрев целесообразнее продолжать на повышенной частоте, что позволяет частично компенсировать падение удельной мощности и повысить производительность процесса нагрева. Целью данного этапа является формирование необходимого температурного профиля на глубине закаливаемого слоя.

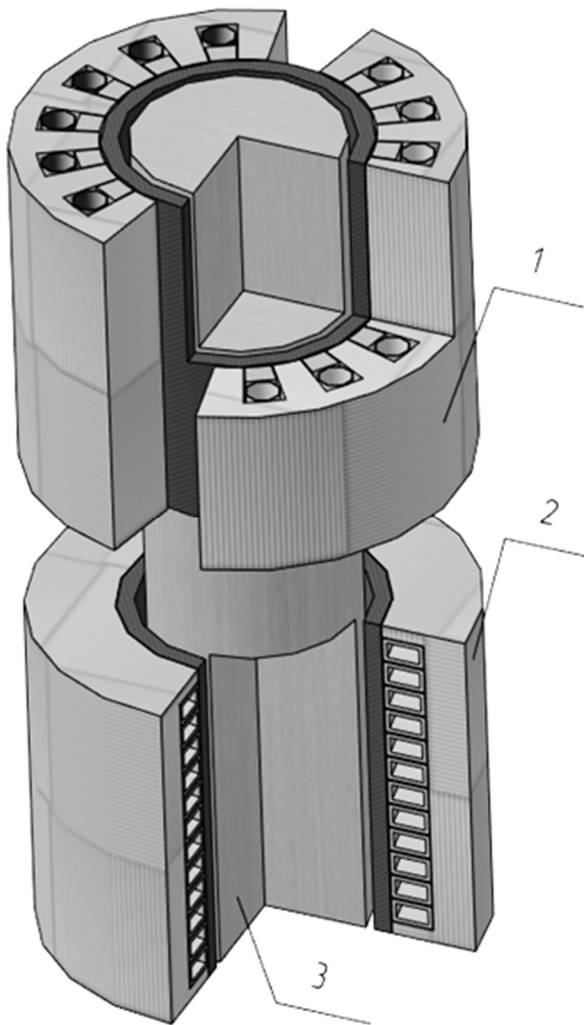


Рис. 1. Эскиз модели двухсекционной системы для двухчастотного нагрева: 1 – индукторы с БЭМП на промышленной частоте; 2 – закалочный индуктор на повышенной частоте; 3 – загрузка (валок)

Для предварительного нагрева под закалку предлагается использовать секцию, выполненную в виде нескольких индукторов с БЭМП (рис. 1), работающих на промышленной частоте, которые позволяют совместить

две функции в одном устройстве: нагрев и вращение вала с возможностью раздельного управления их режимами, что повышает энергоэффективность.

Отсутствие единой теории и инженерных методик требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку индукционных устройств с БЭМП для предварительного нагрева под закалку крупногабаритных валков прокатных станов.

Разработка математических моделей индукционного нагрева с использованием БЭМП в программной среде ELCUT

Численные методы расчёта и реализующих их современные программные средства, позволяющие с высокой точностью моделировать процесс индукционного нагрева при любой геометрии системы и физических свойствах объектов. Для проведения исследований был выбран широко применяемый при решении различных инженерных задач программный продукт ELCUT [8], в основе которого лежит метод конечных элементов.

На рис. 2 представлен эскиз фрагмента системы «индуктор с БЭМП – цилиндрическая загрузка», а в таблице 1 приведены исходные данные, которые использовались при моделировании в программной среде ELCUT. Для повышения точности расчётов проводилось адаптивное улучшение сетки дискретизации.

Исследования проводились с целью выявления оптимальных конструктивных параметров магнитопровода индуктора; зазоров между индуктором и загрузкой, между двумя индукторами, при различных способах их включения параметров, при которых обеспечивается достижение максимально возможного электрического КПД $\eta_{эл}$ системы. При этом также оценивались такие критерии как мощность тепловыделения P_{2T} , механическая мощность электродинамических сил P_{2M} в загрузке, мощность потерь в индукторе $P_{1П}$ и коэффициент мощности $\cos \varphi$.

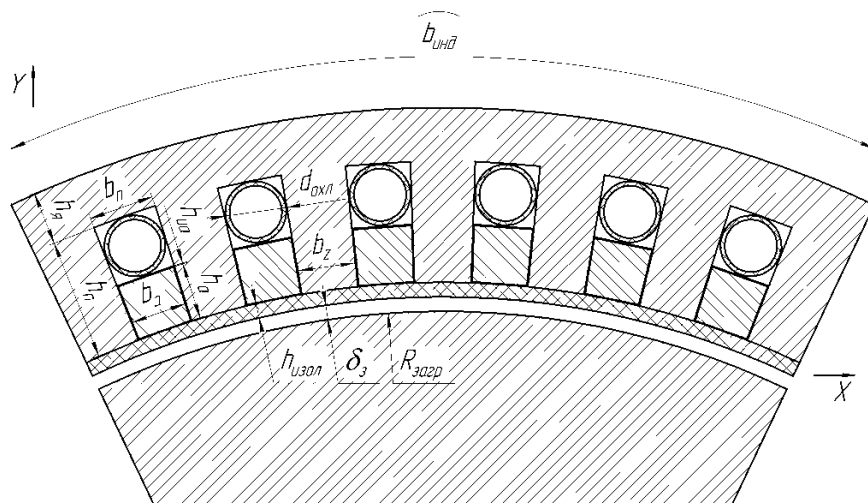


Рис. 2. Эскиз фрагмента системы «индуктор с БЭМП – цилиндрическая нагрузка» под одним индуктором

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования в программной среде ELCUT

Наименование параметра системы	Обозначение	Величина	Размерность
Длина магнитопровода индуктора (вдоль координаты Z)	$l_{инд}$	200	мм
Ширина магнитопровода индуктора	$b_{инд}$	260	мм
Ширина паза магнитопровода	b_n	10...30	мм
Ширина зубца магнитопровода	b_z	11...28	мм
Высота паза магнитопровода	h_n	40	мм
Высота ярма магнитопровода	$h_я$	20	мм
Количество пазов/зубцов	$n_{паз}/n_z$	6/7	шт.
Ширина активного слоя (обмотки)	b_a	9...29	мм
Высота активного слоя (обмотки)	h_a	12...39	мм
Толщина изоляции обмотки	$h_{иа}$	1	мм
Наружный диаметр трубки охлаждения	$d_{охл}$	10...30	мм
Толщина теплоизоляции (футеровки)	$h_{изол}$	5	мм
Длина загрузки (вдоль координаты Z)	$l_{загр}$	200	мм
Радиус загрузки	$R_{загр}$	265	мм
Величина воздушного зазора между футеровкой и загрузкой	δ_z	1...30	мм
Расстояние между соседними индукторами	δ_u	10...130	мм
Частота тока	f	50	Гц
Ток индуктора (ов)	$I_{инд}$	6000	А
Материал обмотки	электротехническая медь		
Материал футеровки	керамическое волокно		
Материал загрузки	сталь 9Х		

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Определение оптимальных конструктивных параметров магнитопровода индуктора проводилось путем нахождения зависимости его электрического КПД $\eta_{эл}$ и $\cos \varphi$ от отношения ширина паза и ширины зубца b_n/b_z магнитопровода. На рис. 3 представлены результаты исследований в виде зависимостей $\eta_{эл} = f(b_n/b_z)$ и $\cos \varphi = f(b_n/b_z)$. Анализируя приведенные графики следует отметить, что $\eta_{эл}$ достигает минимального значения 0,72 при $b_n/b_z = 0,35$, в то время как $\cos \varphi$ достигает максимального значения 0,41. По мере увеличения ширины паза $\cos \varphi$ снижается на 2-5 % от максимального, а $\eta_{эл}$ возрастает и достигает максимального значения 0,82 при $b_n/b_z = 1,75$, далее происходит его незначительное снижение (менее 1 %). Таким образом, для достижения максимально возможных значе-

ний $\eta_{эл}$ оптимальным является диапазон $1 \leq b_n/b_z \leq 2,63$.

Также было выявлено, что в зависимости от b_n/b_z , 42-52 % суммарной мощности идёт на нагрев загрузки (P_{2T}), около 30 % идет на её перемещение P_{2M} и 18-28 % идёт на потери в индукторе $P_{1П}$ (рис. 4).

На следующем этапе были проведены исследования зависимости $\eta_{эл}$ от величины зазора между индуктором и загрузкой, образованного толщиной футеровки индуктора $h_{изол}$ и толщиной воздушного зазора δ_z при различной ширине паза b_n магнитопровода индуктора.

Анализируя графики, представленные на рис. 5, можно сделать вывод, что с увеличением зазора $h_{изол} + \delta_z$ также линейно снижается электрический КПД $\eta_{эл}$, при этом, с целью компенсации этого явления, целесообразно выбирать ширину паза магнитопровода b_n большей, чем $h_{изол} + \delta_z$.

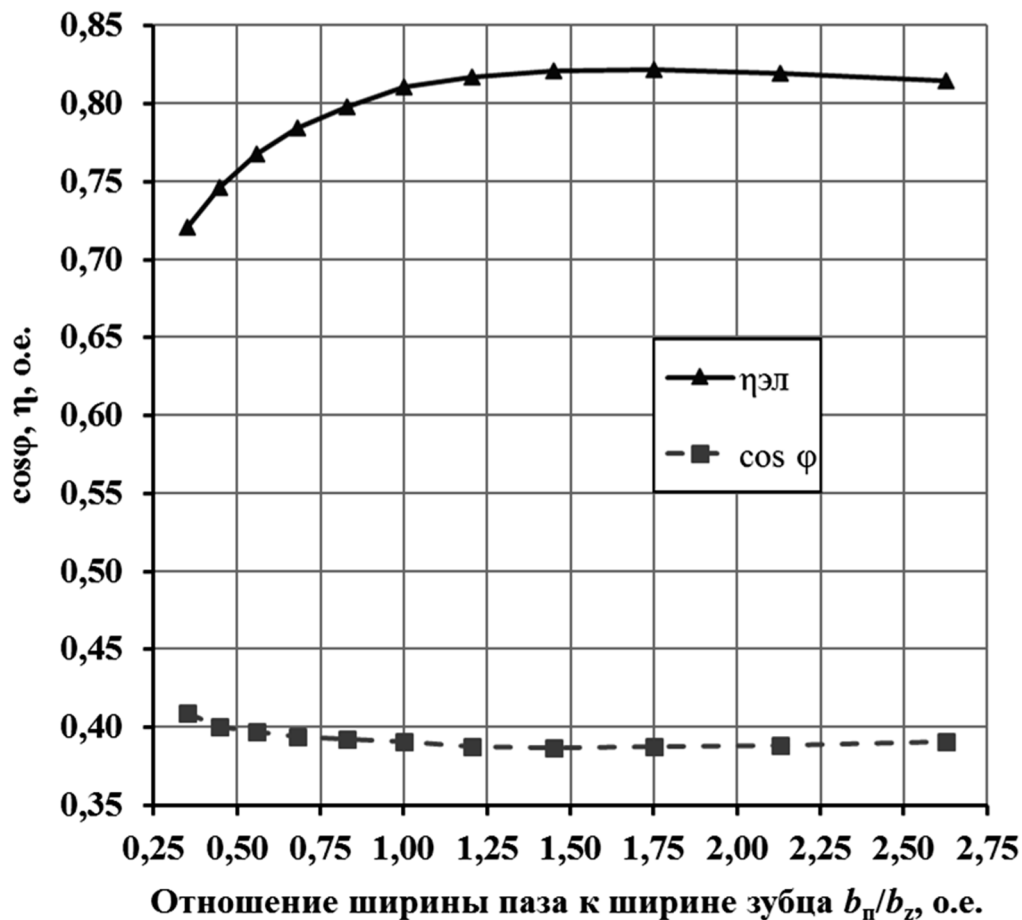


Рис. 3. Зависимости $\eta_{эл} = f(b_n/b_z)$ и $\cos \varphi = f(b_n/b_z)$

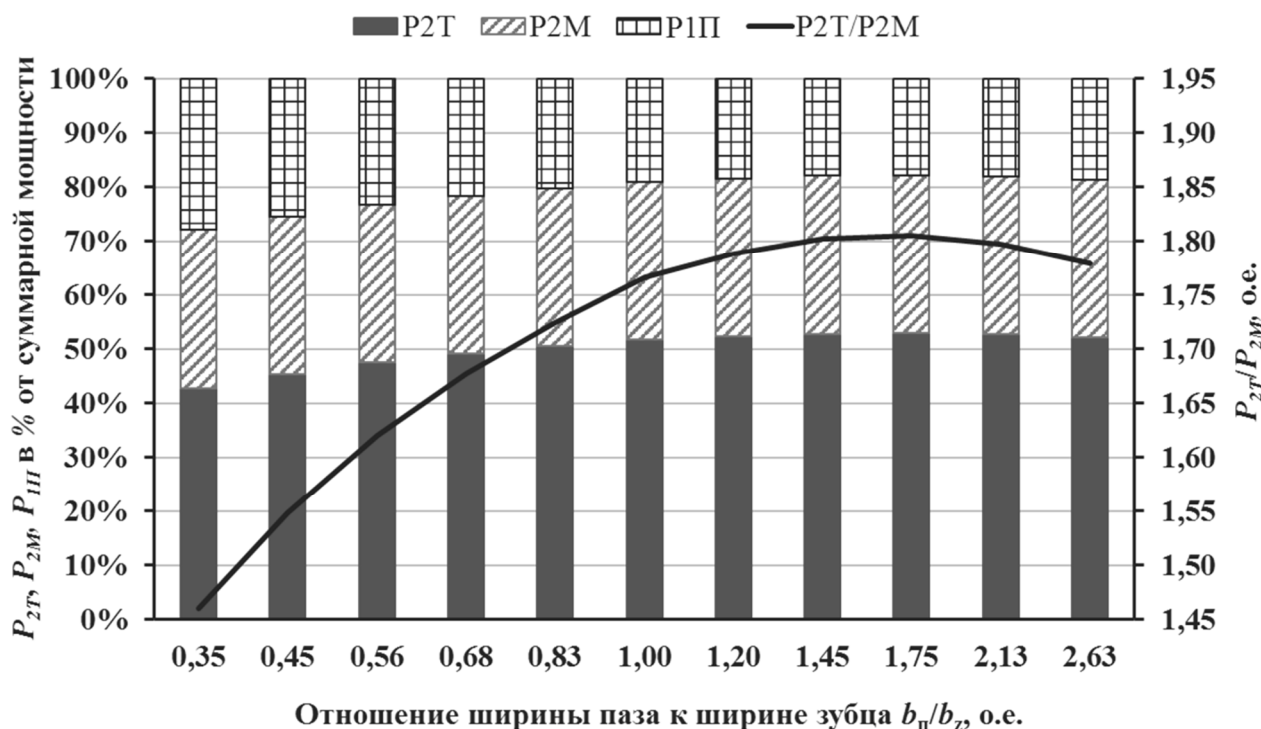


Рис. 4. Соотношение P_{2T} , P_{2M} и $P_{1П}$ в зависимости от b_n/b_z

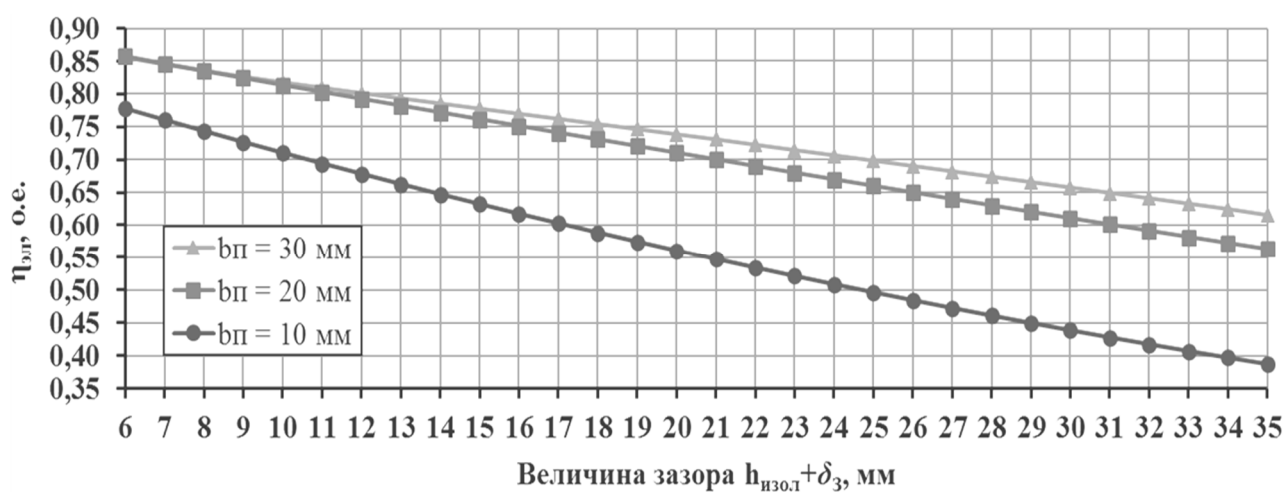


Рис. 5. Зависимость $\eta_{эл} = f(h_{изол} + \delta_3)$ при различных значениях b_n

Для расширения диапазона управления режимом вращения требуется использовать несколько индукторов, включаемых согласно и встречно [9]. На рис. 6 представлены зависимости $\eta_{эл}$ при изменении расстояния $\delta_{и}$ между согласно и встречно включенными индукторами. При встречном включении индукторов $\eta_{эл}$ достигает максимального

значения 0,832 при минимальном (в принятом диапазоне) расстоянии $\delta_{и} = 10$ мм, в то время как при согласном включении $\eta_{эл}$ достигает минимального значения 0,812. По мере увеличения $\delta_{и}$ происходит снижение $\eta_{эл}$ при встречном включении и увеличение при согласном, однако, при $\delta_{и} = 130$ мм значения $\eta_{эл}$ уравниваются.

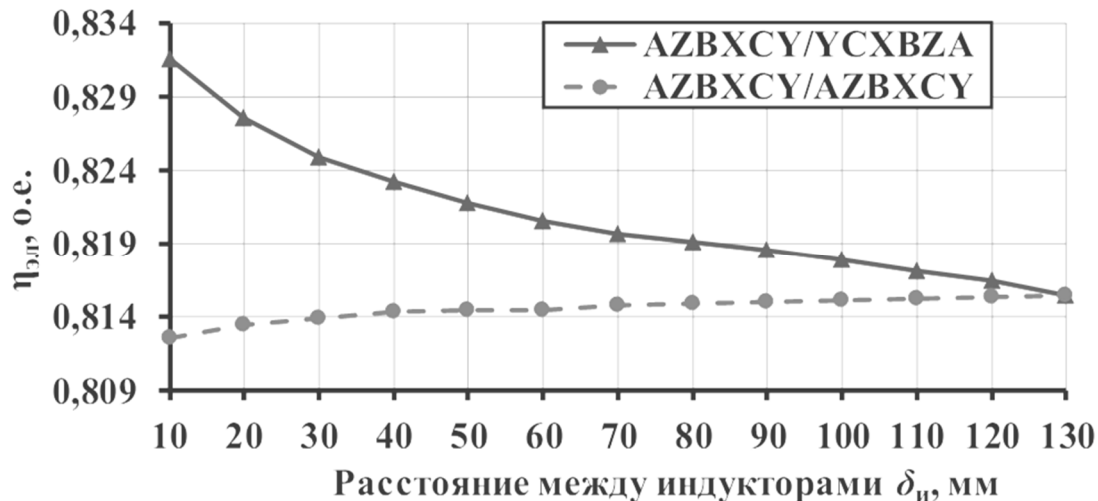


Рис. 6. Зависимости $\eta_{эл} = f(\delta_{и})$ при согласном и встречном включении индукторов

Заключение

По результатам проведенных исследований и выявленных зависимостей можно сформулировать научно-практические рекомендации по выбору параметров системы «индуктор с бегущим электромагнитным полем – цилиндрическая загрузка»:

1) оптимальное с точки зрения электрического КПД $\eta_{эл}$ соотношение ширины паза магнитопровода и зубца b_n/b_z лежит в диапазоне 1...2,63, в котором $\eta_{эл}$ изменяется не более чем на 1 %

от максимально достижимого значения 0,82.

2) необходимо выбирать минимально допустимый технологическим процессом зазор между индуктором и загрузкой, при этом для получения максимальных значений $\eta_{эл}$ ширину паза b_n следует выбирать по условию: $b_n \geq h_{изол} + \delta_z$.

3) при наличии индукторов в количестве кратном 2 и расстоянии между ними менее 130 мм целесообразно чередовать их согласное и встречное включение для достижения максимальных значений $\eta_{эл}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент 2148291 РФ, М. Кл. F27D23/04. Статор для электромагнитного перемешивания стали в дуговых сталеплавильных печах и сталеразливочных ковшах / Р.М. Христинич; заявитель и патентообладатель Христинич Р.М. № 99108894/02; заявл. 23.04.1999; опубл. 27.04.2000, Бюл. № 12. 6 с.: ил.

2. Патент Республики Казахстан № 7227 «Сушилка для шпона и длинномерных волокнистых материалов» / А.Н. Качанов, М.Н. Чукумов, Т.Г. Королева, Н.А. Качанов, В.В. Иващенко // Национальное патентное ведомство Республики Казахстан, 15.02.1999. Бюл. № 2.

3. **Вольдек А.И.** Индукционные магнитогидродинамические машины с жид-

кометаллическим рабочим телом. Ленинград: Энергия, 1970. 272 с.

4. **Качанов А.Н., Максимов А.Е.** Математическое моделирование бегущего электромагнитного поля в системе «Индуктор – расплав цинка» в программном комплексе ANSYS // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2011. № 2 (24). С. 50-55.

5. **Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю.** Технологии электромагнитной обработки крупногабаритных стальных изделий // Известия Академии электротехнических наук РФ. № 20. декабрь 2018. С. 92-101.

6. **Покровский А.М., Лешковцев В.Г.** Расчет напряжений в прокатных валках при индукционной закалке // Известия ву-

зов. Черная металлургия. 1998. № 7. С. 31-38.

7. **Лепешкин А.Р.** Разработка эффективных режимов скоростного индукционного нагрева изделий с учетом термических напряжений: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.10. Москва: МЭИ, 2007. 317 с.

8. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Вер-

сия 6.6. Руководство пользователя. Санкт-Петербург: Производственный кооператив TOP, 2021. 290 с.

9. **Качанов А.Н., Миронов Е.А.** Использование бегущего электромагнитного поля для предварительного нагрева прокатных валков при их закалке // Промышленная энергетика. 2025. № 1. С. 32-40.

Качанов Александр Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева

Миронов Евгений Андреевич – ассистент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева

Aleksander N. Kachanov – Dr. Sci. Tech., Head: Department of Electrical Facilities and Energy Saving, Orel State University named after I.S. Turgenev

Evgeniy A. Mironov – Assistant Lecturer, Department of Electrical Facilities and Energy Saving, Orel State University named after I.S. Turgenev

Статья поступила в редакцию 14.08.25, принята к опубликованию 16.09.25

УДК 621.793.1

ИНДУКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЕ ВАКУУМНОЕ НАПЫЛЕНИЕ МОЛИБДЕНА НА БРОМЕЛЛИТОВЫЕ ВТУЛКИ

**В.А. Кошуро, М.А. Фомина, А.М. Захаревич,
Т.И. Судакова, А.Д. Рафалович, А.А. Фомин**

INDUCTION-THERMAL VACUUM DEPOSITION OF MOLYBDENUM OVER BROMELLITE BUSHINGS

**V.A. Koshuro, M.A. Fomina, A.M. Zakharevich,
T.I. Sudakova, A.D. Rafalovich, A.A. Fomin**

Изучены тепловые процессы при индукционно-термическом вакуумном распылении (ИТВР) молибденовых трубчатых мишеней. Рассмотрены процессы напыления молибденового покрытия (металлизации) на вакуумплотные керамические втулки на основе оксида бериллия (BeO, бромеллит). Предложена численная модель процесса ИТВР для системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка», которая позволила установить характер распределения температурного поля в распыляемой мишени и керамических втулках, в зависимости от тока индуктора в диапазоне 1-2 кА, продолжительности компьютерного эксперимента равного 600 с и различных вариантах расположения мишеней для нанесения внешнего и внутреннего слоя металлизации. Установлено, что трубчатые мишени эффективно нагревались до температуры распыления в диапазоне 2250-2230 °С при нанесении слоя металлизации. Для внутренней металлизации требовалось уменьшить на треть диаметры кварцевой камеры и индуктора. В экспериментальных исследованиях показано, что процесс индукционно-термического вакуумного напыления (ИТВН) необходимо осуществлять при рабочем токе не менее 1200-1300 А и продолжительности выдержки не менее 10 мин для получения равномерного по толщине слоя (не менее 5-7 мкм) внутренней и внешней металлизации.

The thermal processes during induction-thermal vacuum sputtering (ITVS) of molybdenum tubular targets were studied. The processes of molybdenum coating (metallization) deposition over vacuum-tight ceramic bushings based on beryllium oxide (BeO, bromellite) were considered. A numerical model of the ITVS process for the "inductor – tubular target – ceramic bushing" system was proposed, which allowed establishing the nature of the temperature field distribution in the sputtered target and ceramic bushings, depending on the inductor current in the range of 1-2 kA, duration of the computer experiment equal to 600 s and various options for location of the targets to be applied over the outer and inner metallization layers. It was found that tubular targets were effectively heated to a sputtering temperature in the range of 2250-2230 °C when applying a metallization layer. For internal metallization, it was necessary to reduce the diameters of the quartz chamber and the inductor by one third. Experimental studies showed that the induction thermal vacuum deposition (ITVD) process must be performed at an operating current of at least 1200-1300 A and exposure duration of at least 10 min to obtain a uniform layer thickness (at least 5-7 μm) of internal and external metallization.

Ключевые слова: *индукционно-термическое вакуумное распыление, численное моделирование, ток индуктора, трубчатая мишень, молибден, индукционно-термическое вакуумное напыление, оксид бериллия*

Введение

Молибден широко используется в металлургии для повышения прочности сплавов, а также в радиоэлектронике для создания тепло- и токоведущих элементов в виде слоев металлизации, в том числе вакуумплотных керамических изделий. Нанесение молибдена на подложки обычно осуществляют методами физического (PVD) или химического (CVD) вакуумного осаждения [1]. Такие покрытия обладают низким удельным сопротивлением и высокой стабильностью [2]. Многокомпонентные металлические покрытия, основой которых является молибден и другие тугоплавкие металлы, могут использоваться в качестве высокотемпературного защитного слоя [3]. Для улучшения теплозащитных характеристик толстых газотермических покрытий вольфрама, получаемых на подложке из графита, наносят наружное двухкомпонентное PVD-покрытие толщиной 6-7 мкм, которое, в свою очередь, состоит из большого числа бислоев W/Mo [4]. Тонкий W/Mo-слой снижает влияние различных типов излучения на изменение микроструктуры нижележащего толстого покрытия.

Для соединения керамических пластин применяется лазерная стыковая сварка [5]. Высокопрочное соединение торцевых поверхностей обеспечивается применением металлизации молибденом с адгезионной прочностью не менее 7 МПа.

Таким образом, покрытия молибдена представляют большой интерес для развития микроэлектроники и вакуумных радиоэлектронных приборов. Для эффективного распыления тугоплавких металлов, в частности молибдена, требуются особые условия, например вакуум в сочетании с высокой температурой. Достаточно эффективным инструментом для создания данных условий является нагрев токами высокой частоты

Keywords: *induction-thermal vacuum sputtering, numerical simulation, inductor current, ring target, molybdenum, induction-thermal vacuum deposition, beryllia*

(ТВЧ), что ранее было показано при получении покрытий титана и карбида титана на рабочей поверхности изделий из инструментальной стали или тантал-содержащих соединений на титановых изделиях [6,7]. В данном исследовании будут изучены закономерности теплообменных процессов при индукционно-термическом вакуумном распылении (ИТВР) молибдена и последующем формировании слоя металлизации на внешней и внутренней поверхностях керамических бромеллитовых (BeO) втулок с применением метода индукционно-термического вакуумного напыления (ИТВН).

Численное моделирование

Технологическим инструментом в распылительной системе являлся медный индуктор, число витков которого $w = 3$, внутренний диаметр $D_{IND} = 74$ мм, а длина не превышала $H_{IND} = 33,5$ мм (рис. 1). Диаметр трубки индуктора составил 9,5 мм, а ее внутренний диаметр – 8,0 мм. В активной области индуктора вертикально располагалась кварцевая трубка с внешним диаметром $D_C = 70$ мм.

В кварцевой трубчатой камере располагалась трубчатая молибденовая мишень, которая распылялась для последующего получения покрытия (слоя металлизации). Наружный диаметр мишеней составил $D_{T1} = 50$ мм (для металлизации внешней поверхности, рис. 1 а) и $D_{T2} = 16$ мм (для металлизации внутренней поверхности, рис. 1 б) с толщиной стенки 0,5 мм. Распыляемые мишени T1 и T2 располагались в активной области индуктора 1. Распылительная система и ее геометрическая модель также содержали блоки «воздух», «вода» (для охлаждения индуктора) и «атмосфера» (давление насыщенных паров распыляемого материала мишени и остаточная воздушная атмосфера).

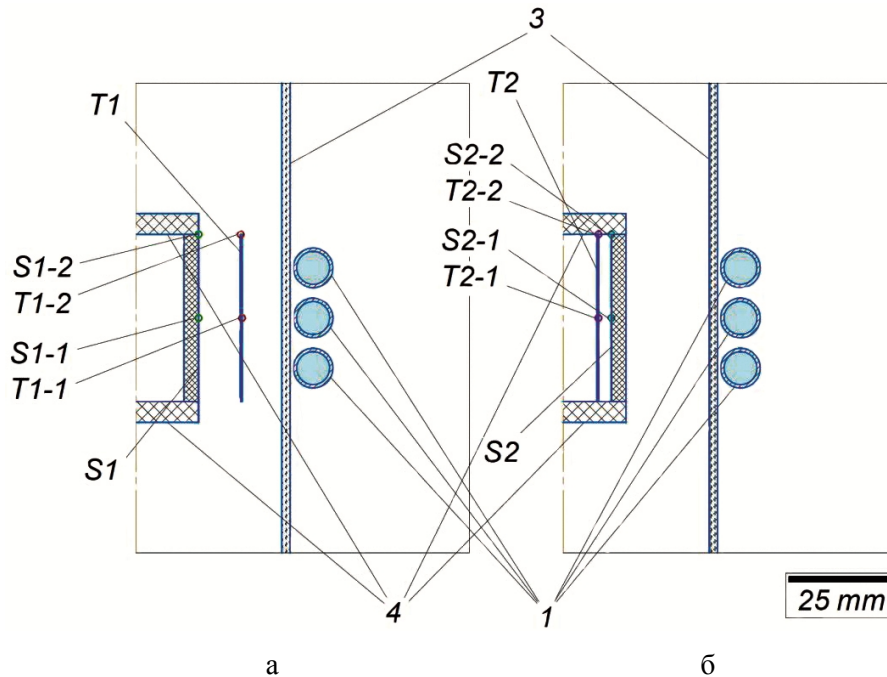


Рис. 1. Правая полуплоскость модели распылительной системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» для металлизации внешней (а) и внутренней (б) поверхностей керамических втулок: 1 – индуктор; Т1 – трубчатая мишень большого диаметра $DT1 = 50$ мм с характерными точками Т1-1 и Т1-2 контроля температуры; Т2 – трубчатая мишень малого $DT2 = 16$ мм с характерными точками Т2-1 и Т2-2 контроля температуры; S1 – внешняя поверхность керамической втулки с характерными точками S1-1 и S1-2 контроля температуры; S2 – внутренняя поверхность керамической втулки с характерными точками S2-1 и S2-2 контроля температуры; 3 – кварцевая трубка (элемент камеры) с внешним диаметром $DC = 70$ мм; 4 – высокотемпературная оснастка

Характер нагрева ТВЧ, а именно скорость и равномерность прогрева мишени до требуемой температуры, зависел от большого числа факторов. При численном моделировании задавались параметры электрической цепи, электрофизические и теплофизические характеристики материалов и сред (блоков модели), характеристики граничных процессов (границ блоков) и длительность численного эксперимента (для нестационарных процессов).

Ток индуктора I_{IND} задавался для каждого витка в диапазоне от 1000 до 2000 А (шаг изменения тока $\Delta I_1 = 500$ А). Частота тока имела постоянное значение $f = 44$ кГц, что соответствовало средней частоте в эксперименте. Выбранное соотношение длин индуктора H_{IND} и трубчатой мишени H_T обеспечивало равномерное распределение плотности тока в центральной части активной области индуктора и нагреваемой мишени.

Физическими параметрами блоков модели являлись электрофизические (элек-

тропроводность σ ; относительная магнитная проницаемость μ) и теплофизические (коэффициент теплопроводности κ , удельная теплоемкость C и плотность γ) величины (табл. 1). Так как в распыляемой системе «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» отсутствовали ферромагнетики, то для всех блоков магнитная проницаемость μ принималась равной 1 (в таблице не указано). Сделаны также допущения, что электропроводность σ неметаллических блоков равна 0.

Для определения температурного поля в нагреваемых блоках эти значения задавались при соответствующих значениях для высокотемпературного процесса. Это в первую очередь относится к блокам «мишень», «камера», «оснастка» и «керамика» (табл. 1).

Для корректного решения тепловой задачи были заданы коэффициенты, соответствующие экспериментальным данным нагрева (табл. 2).

Таблица 1 – Свойства блоков модели

№	Блок модели	Коэффициент электропроводности σ	Коэффициент теплопроводности λ	Удельная теплоемкость C	Плотность ρ	Примечание
–	–	$\text{См} \cdot \text{м}^{-1} (\times 10^6)$	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	–
1	Индуктор	57,97	401	385	8933	Медь (Cu)
2	Камера	0	1,38	750	2200	Кварц (SiO_2) при 20 °С
		0	3,8	1200	2187	SiO_2 при ~900 °С
3	Мишень	18,12	140	250	10210	Молибден (Mo) при 20 °С
		1,37	97	461	9730	Mo при ~2300 °С
		1,26	95	495	–	Mo при ~2500 °С
4	Керамика (втулки)	0	219,8	1290	2900	Бромеллит (BeO) при 100°С
		0	19,2	2100	–	BeO при ~1000 °С
5	Оснастка (для образцов)	0	~(200–300)	~800	2000 (2270)	Нитрид бора (BN-HP) при 20 °С
		~0	~27	2000	–	BN-HP при ~1000 °С
6	Вода	0	0,64	4178	996	Охладитель (интенсивный поток)
7	Воздух	0	0,027	1005	1,16	Окружающая среда
8	Атмосфера	0	~0,1	~4,0	0,005	Рабочая атмосфера в камере (давление паров $\sim p = 1\text{--}3$ Торр)

Таблица 2 – Значения коэффициентов для границ блоков

№	Наименование границы блока	Коэффициент конвективной теплопередачи α_{CONV} , $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	Коэффициент излучения ε_{RAD}
1	Внутренняя поверхность трубки индуктора (интенсивный поток воды)	$(1,0\text{--}1,2) \cdot 10^4$	–
2	Мишень (Mo) при температуре интенсивного испарения	$(1,2\text{--}1,5) \cdot 10^4^*$	~0,1 (Mo)
3	Другие поверхности блоков	5-10	0,95

* – указано типичное значение для стационарного режима испарения; однако это значение может достигать $\sim 10^5$ при температуре, близкой к точке плавления.

Теплоотдача для процесса, характеризованного конвекцией:

$$F_n = \alpha_{CONV} \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

где $(T - T_0)$ – разница между текущей и начальной температурой поверхности блока, К.

Теплоотдача для процесса, характеризованного потерями на излучение:

$$F_n = \varepsilon_{RAD} \cdot k_B \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где $k_B \approx 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная Стефана – Больцмана.

Распыляемая молибденовая мишень указанной толщины характеризовалась высокой проницаемостью для переменного магнитного поля на указанной частоте. При наибольшем диаметре равном $D_{T1} = 50$ мм появлялся интенсивный внутренний источник тепловыделения Q_V (рис. 2 а). При минимальном токе индуктора $I_{IND} = 1000$ А тепловыделение Q_V в мишени не превышало $7,6 \text{ ГВт}/\text{м}^3$, тогда как в мишени малого диаметра $D_{T2} = 16$ мм – не более $2,5 \text{ ГВт}/\text{м}^3$ (рис. 2 б). В индукторе тепловыделение в скин-слое не превышало $0,75 \text{ ГВт}/\text{м}^3$.

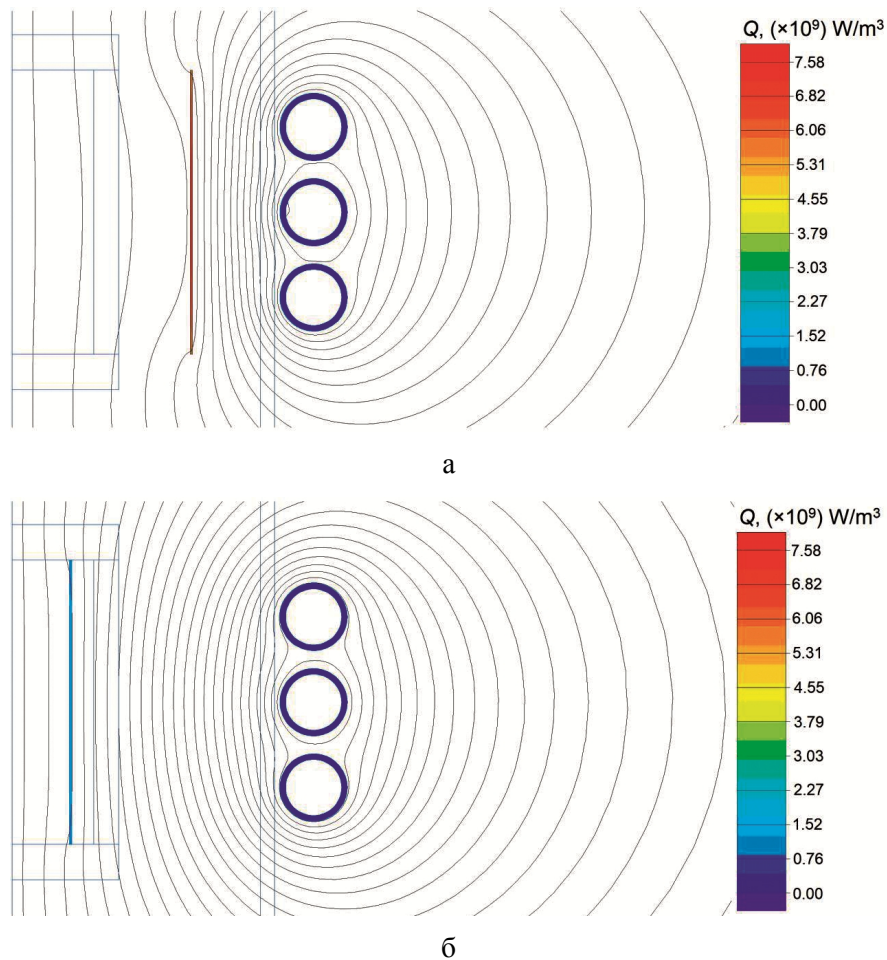


Рис. 2. Характерные поля распределения тепловыделения Q_V при минимальном токе индуктора $I_{IND} = 1000$ А для мишеней различного диаметра:
 $a - D_{T1} = 50$ мм, $b - D_{T2} = 16$ мм.

При минимальном токе индуктора $I_{IND} = 1000$ А мишень большего диаметра прогревается до температуры около 2000°C за 8-10 с (рис. 3 а). Дальнейшая выдержка приводила к прогреву остальных элементов системы, в частности керамического образца до $400-450^\circ\text{C}$ (рис. 3 в).

Характер нагрева мишеней меньшего диаметра существенно отличался от мишеней большего диаметра (рис. 3 б, г). При разогреве центральная часть мишеней достаточно быстро прогрелась до температуры около 1300°C за 60 с. Края мишени в характерных точках Т1-2 и Т2-2 прогревались медленнее, что на начальном этапе ИТВР обуславливало разницу температур свыше 500°C . Начиная с момента $t = 350-400$ с распределение температуры в системе стабилизировалось, при этом нагрев втулок не превышал значения $T \approx 1300-1350^\circ\text{C}$

(рис. 3 г). Данная температура прогрева является приемлемой для термообработки бромеллитовой керамики, что также необходимо для последующих операций получения высококачественной металлизации с необходимой адгезионно-когезионной прочностью сцепления не менее 50-60 МПа.

Для ускорения процесса получения покрытия (металлизации) внутренней поверхности целесообразно осуществлять процесс ИТВР при повышенном токе индуктора. Так при максимальной величине тока $I_{IND} = 2000$ А мишень прогрелась до температуры около 1950°C за 10 с. Края мишени за $t = 60$ с прогрелись не более чем до $1250-1300^\circ\text{C}$ (рис. 4 а). Дальнейшее увеличение выдержки привело к равномерному прогреву всей системы, при этом температура прогрева керамических втулок составила около $1500-1700^\circ\text{C}$ (рис. 4 б).

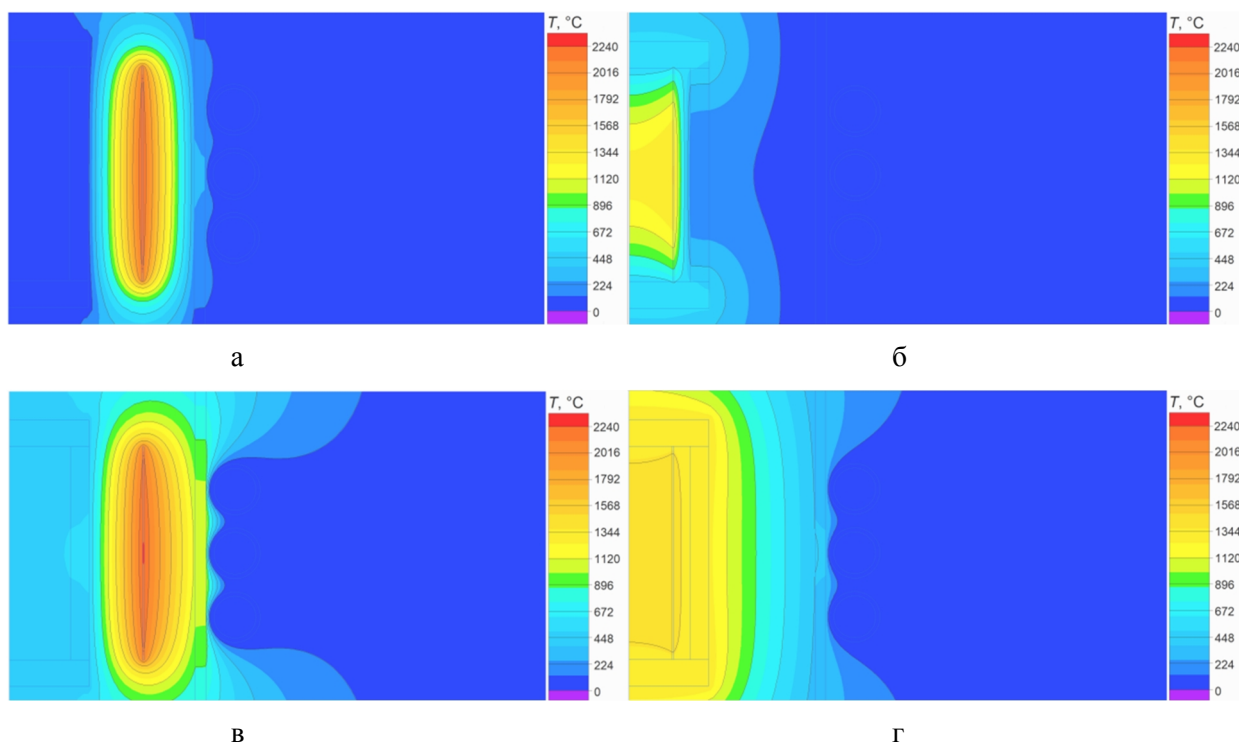


Рис. 3. Характерные поля распределения температуры при ИТВР молибденовых мишеней большего (*а, в*) и меньшего (*б, г*) диаметров при различной выдержке: *а, б* – $t = 60$ с; *в, г* – $t = 600$ с

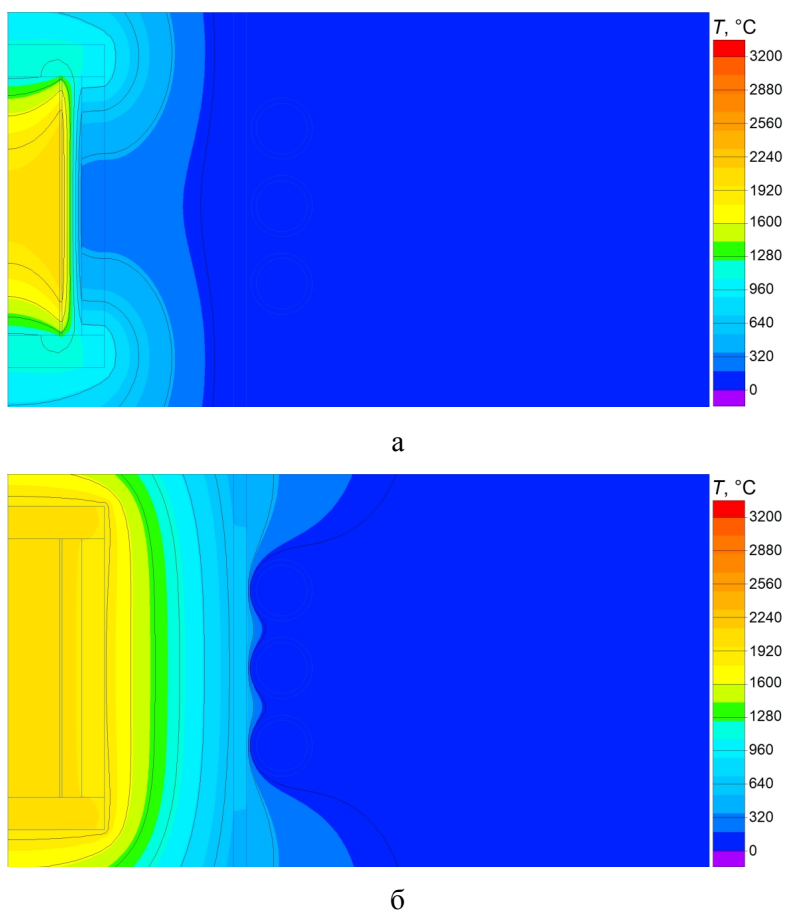
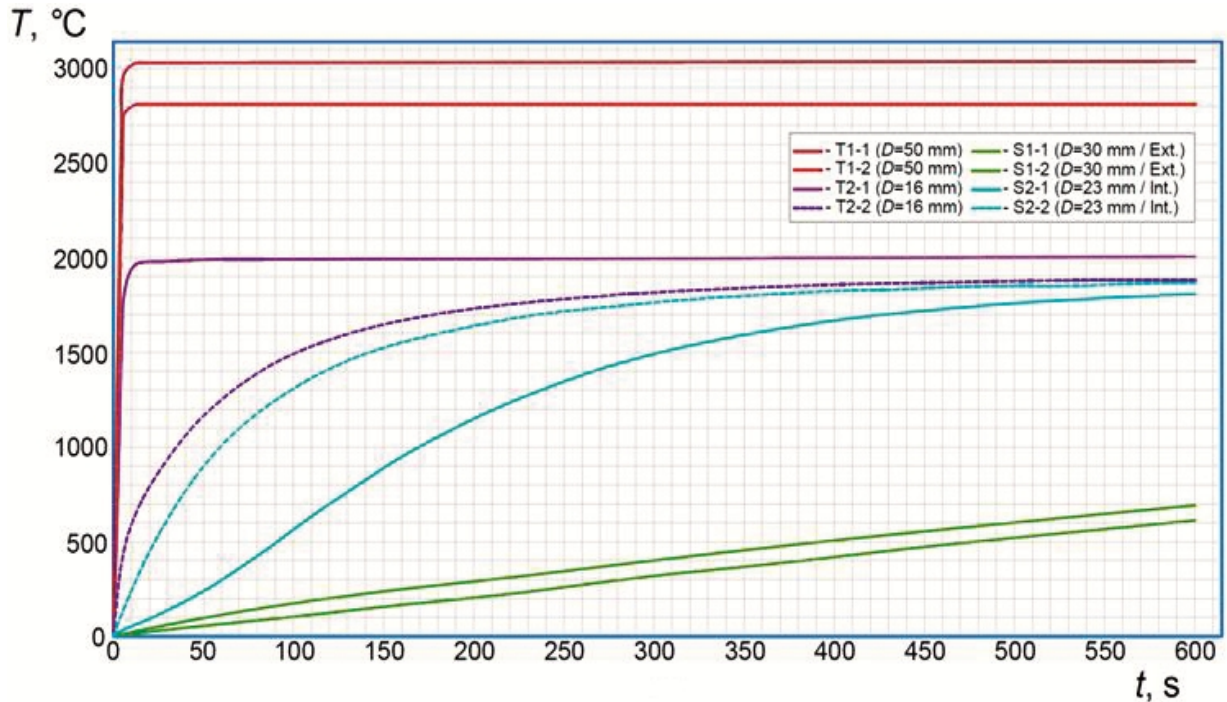


Рис. 4. Характерные поля распределения температуры при ИТВР молибденовых мишеней меньшего диаметра на максимальном токе индуктора при различной выдержке: *а* – $t = 60$ с; *б* – $t = 600$ с

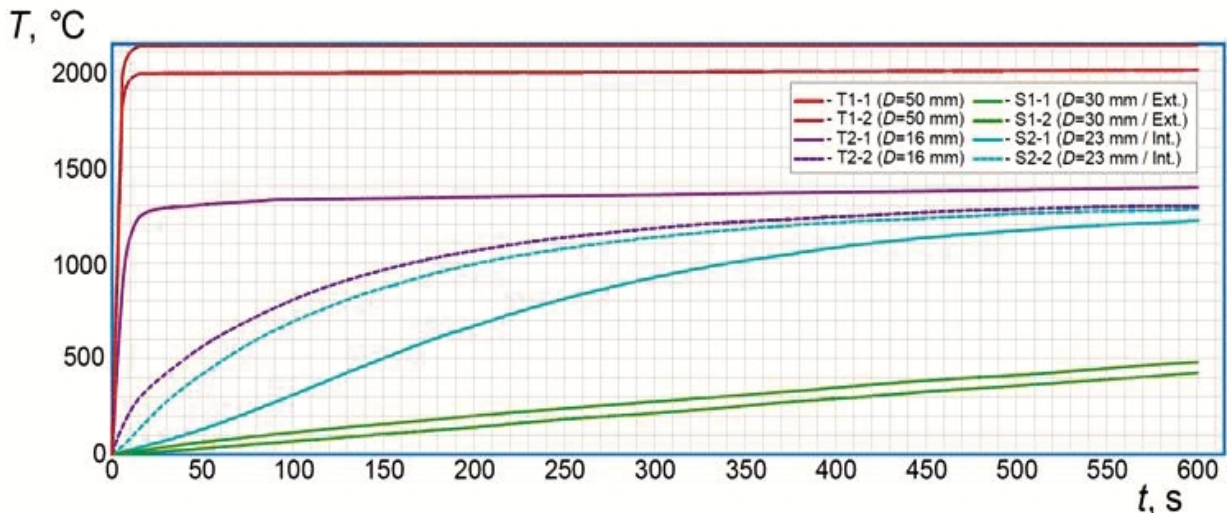
Наглядное представление о величине и равномерности нагрева элементов системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» дают кинетические кривые, которые соответствуют указанным выше на схеме характерным точкам (рис. 5).

Максимальный ток индуктора $I_{IND} = 2000$ А не может быть применен для продолжительного процесса ИТВР мо-

либденовых мишеней большого диаметра по причине ускоренного ($t \approx 5\text{--}10$ с) выхода до температуры плавления и выше (рис. 5 а). Для малого диаметра мишени данный режим также непригоден, так как существует опасность перегрева изделия и формирования дефектов, например трещин, а также переиспарения материала металлизации.



а



б

Рис. 5. Кинетические кривые нагрева молибденовых мишеней большого (Т1) и малого (Т2) диаметров при максимальном $I_{IND} = 2500$ А (а) и минимальном $I_{IND} = 1000$ А (б) токе индуктора, а также кривые прогрева внешней (S1) и внутренней (S2) поверхностей керамических втулок в характерных точках

Одним из вариантов модернизации распылительной системы для повышения эффективности процесса ИТВР для внутренней поверхности втулки может быть уменьшение диаметра камеры. Учитывая размерные параметры изделия-втулки и оснастки для размещения, рациональным может быть вариант использования кварцевой трубки с внешним диаметром $D_C = 50$ мм. Уточненный вариант расчета для максимального тока индуктора $I_{IND} = 2000$ А соответствует оптимальной температуре распыления молибдена около $T \approx 2250-2300$ °С в указанном временном интервале от 60 до 600 с. Для ИТВР большего диаметра мишеней целесообразно снизить тока индуктора до $I_{IND} = 1500$ А, что соответствует также оптимальному температурному интервалу.

Для определения влияния технологических факторов процесса индукционно-термического вакуумного напыления (ИТВН), в частности тока индуктора I_{IND} и длительности высокотемпературного воздействия t , на толщину покрытия h необходимо провести экспериментальное исследование. Таким образом, полученные теоретические данные $T(I_{IND}, t)$ необходимы для получения зависимости $h(I_{IND}, t)$, что будет определять эффективность распыления трубчатой мишени для получения слоя молибденовой металлизации.

Методика эксперимента

Распыляемая мишень, геометрия которой была рассмотрена в разделе численного моделирования, соответствовала трубке с диаметром $D_{T2} = 16$ мм, толщиной стенки $h_{T2} = 0,5$ мм при высоте $L_T = 45$ мм (рис. 6 а). Материалом для изготовления мишени являлся молибден марки МЧ (Мо 99,6-99,8 вес.%). Расположение основных элементов системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» соответствовало схеме (рис. 1 б).

Экспериментальные образцы представляли собой втулки диаметром 30 мм, толщиной стенки 4 мм и высотой 40 мм, изготовленные из вакуумплотной керамики ВБ100-1 (ГОСТ Р 70659-2023) на основе оксида бериллия (бромеллит, содержание ВеО около 99,5 вес.%) [8].

Процесс распыления мишени осуществлялся с помощью трехвиткового медного индуктора, подключенного к выходному трансформаторному блоку установки «ВЧ-30АВ» («ПромИндуктор») для нагрева ТВЧ в интервале 30-80 кГц (рис. 6 а, б). Мишень и втулка располагалась на оси системы в активной зоне индуктора с применением высокотемпературной оснастки, изготовленной из горячепрессованного гексагонального нитрида бора hBN(HP). Далее элементы системы герметизировались в кварцевой камере (рис. 6 б).

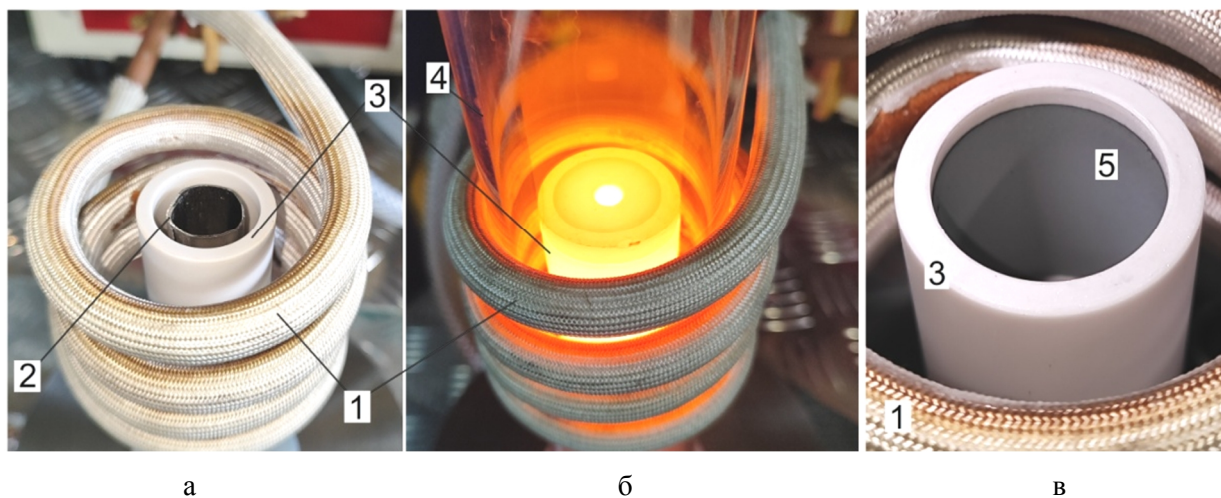


Рис. 6. Компоновка элементов системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» (а, б) и обработанная втулка (в): 1 – индуктор; 2 – мишень; 3 – керамическая втулка; 4 – камера; 5 – металлизация внутренней поверхности

После размещения элементов системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» в рабочем положении основными этапами процесса ИТВН являлись прогрев мишени и дегазация всей системы, высокотемпературная выдержка мишени для распыления, осаждение покрытия (слоя металлизации) на внутренней поверхности втулки с одновременным контролем качества изделий (отсутствие трещин), плавное

остывание элементов системы. На следующем этапе производилась замена мишени и оснастки для ИТВН внешней поверхности, извлечение втулок с покрытиями (рис. 7 а). Процесс нагрева ТВЧ до температуры испарения молибдена и его массоперенос в стационарном режиме на поверхность втулок осуществлялся при давлении не менее $p = 1-3$ Торр, контроль которого выполнялся датчиком Пирани.

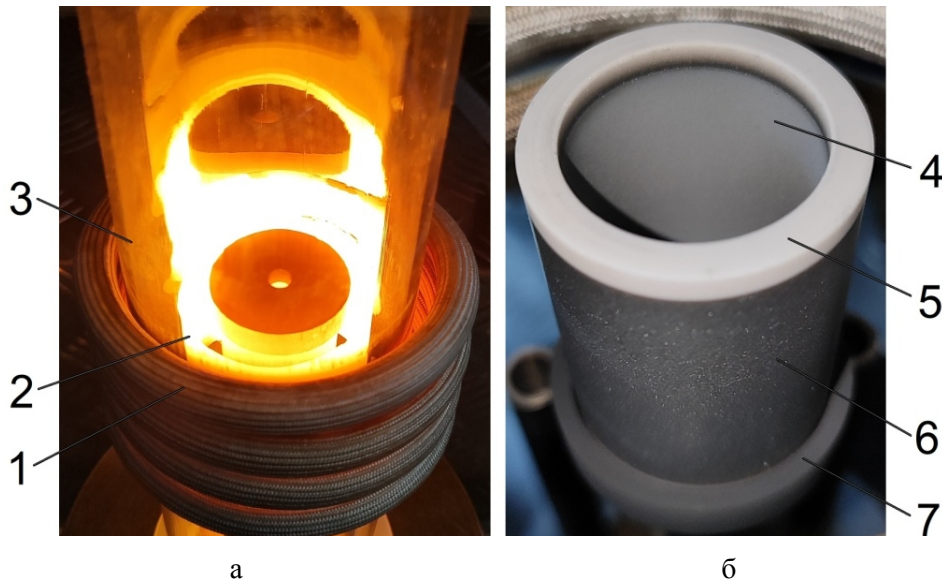


Рис. 7. Компоновка элементов системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка» (а) и обработанная втулка (б): 1 – индуктор; 2 – мишень; 3 – камера; 4 – внутренняя поверхность втулки с металлизацией; 5 – керамическая втулка; 6 – внешняя поверхность втулки с металлизацией; 7 – оснастка

Таблица 3 – Ватт-амперные характеристики процесса ИТВН молибденовой мишени для системы «индуктор – трубчатая мишень – керамическая втулка»

Номер	Ток индуктора I_{IND} кА	Потребляемая мощность (активная) P кВт
–	кА	кВт
1	1,0	$2,0 \pm 0,5$
2	1,2	$2,6 \pm 0,6$
3	1,4	$3,3 \pm 0,8$
4	1,6	$4,1 \pm 0,7$
5	1,8	$5,0 \pm 0,9$
6	2,0	$5,9 \pm 0,8$

Ток индуктора I_{IND} , равный удвоенному значению рабочего тока, задаваемого на установке «ВЧ-30АВ» при указанной конфигурации выходного трансформатора и геометрии «индуктор – мишень», при ИТВН изменялся в диапазоне 1-2 кА. Измерение потребляемой мощности P при ИТВН осуществлялось с помощью многофункцио-

нального измерительного прибора «ZGCJ» модели «CJ-3D3Y» (табл. 3).

Макро- и микроструктура нанесенных слоев исследовалась с применением оптической («МБС-10») и растровой электронной микроскопии (РЭМ; «MIRA II LMU», «Tescan»). Толщина нанесенных покрытий определялась по РЭМ-изображениям (уско-

ряющее напряжение 20 кВ), для чего керамические втулки подвергались разрушению (рис. 8).

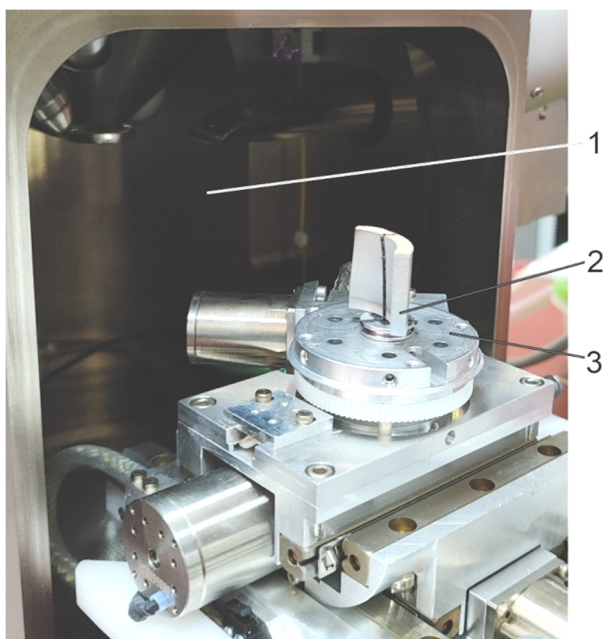


Рис. 8. Размещение фрагмента керамической втулки в камере растрового электронного микроскопа: 1 – вакуумная камера микроскопа; 2 – исследуемый образец (перпендикулярное расположение) для измерения толщины слоя металлизации; 3 – предметный (поворотный) столик

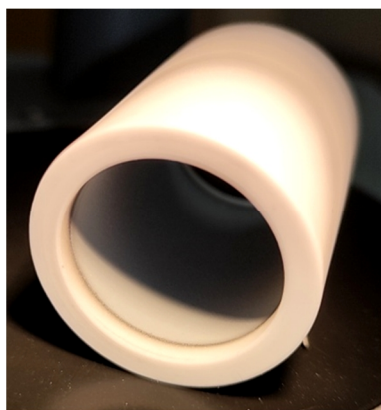
Адгезионная прочность оценивалась в результате разрушающего испытания паяного соединения, образованного между керамической втулкой с металлизацией и металлической полосой с применением серебрясодержащего припоя.

При испытании фиксировалась нагрузка, приводящая к разрушению, характер которого мог быть адгезионный (по границе «керамика – металлизация»), смешанный (частичное разрушение металлизации), когезионный (по материалу металлизации) или «когезионное по подложке» (вырывание приповерхностного слоя керамической основы изделия). Для оценки качества металлизации учитывались оба параметра: величина разрушающей нагрузки и характер разрушения.

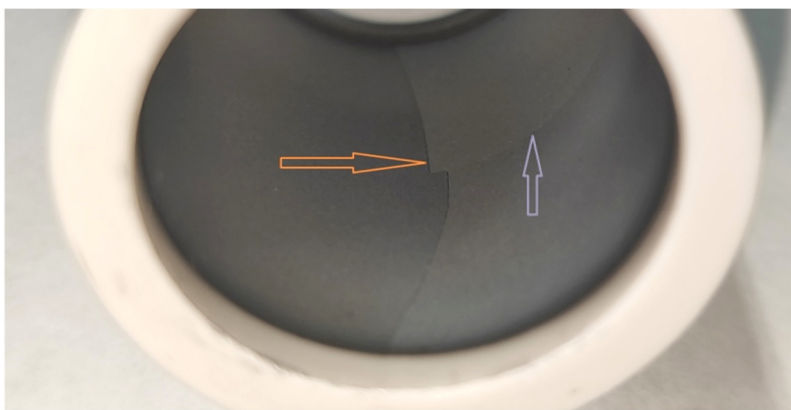
Результаты и их анализ

В результате процесса ИТВН при величине тока индуктора $I_{IND} = 1,4-1,6$ кА и продолжительности выдержки $t = 600$ с на внутренней поверхности втулки формировалось покрытие (металлизация) толщиной не менее 5,5-6 мкм (рис. 9 а). Увеличение тока индуктора до $I_{IND} = 1,8-2,0$ кА и более приводило к перегреву элементов распылительной системы, при этом наблюдались растрескивания изделия вдоль оси и по радиусу (рис. 9 б).

После завершения обработки внутренней поверхности выполнялось ИТВН наружной поверхности втулки, при этом использовались камера и индуктор большего диаметра (рис. 7 б). Необходимая толщина металлизации около 5-6 мкм достигалась при меньшей выдержке около $t = 300-360$ с. Увеличение длительности процесса ИТВН до $t = 600$ с приводило к росту слоя металлизации до 9,7-10,2 мкм, однако его механические характеристики были снижены.



а



б

Рис. 9. Керамическая втулка с металлизацией внутренней поверхности (а) и дефекты в виде трещин (б), вызванные перегревом (показаны «стрелочками»)

Высокое качество металлизации, оцениваемое при отрыве припаянной металлической полосы с внешней поверхности втулок, характеризовалось усилием отрыва не менее $5\text{--}6 \text{ кгс/мм}^2$ (около $50\text{--}60 \text{ МПа}$). Адгезионный или когезионный тип разрушения системы «керамика – металлизация» обычно характеризовался широким интервалом усилия отрыва от $0,5\text{--}1$ до $3\text{--}5 \text{ кгс/мм}^2$. Смешанный характер разрушения или когезионное разрушение по подложке характеризовалось более высокими значениями усилия отрыва, изменяемого от $5,5\text{--}6$ до 8 кгс/мм^2 и более. Учи-

тывая, что прочность при растяжении бромеллитовой керамики составляет около 120 МПа [8], можно отметить, что пористая структура приповерхностного слоя не претерпела существенного разупрочнения в результате металлизации.

При макроанализе фрагментов втулок с наиболее качественной металлизацией наблюдался светлый след отрыва «по подложке» (рис. 10 а, б). На обратной стороне металлической полосы, оторванной от втулки, наблюдались крупные фрагменты бромеллитовой керамики (рис. 10 в).

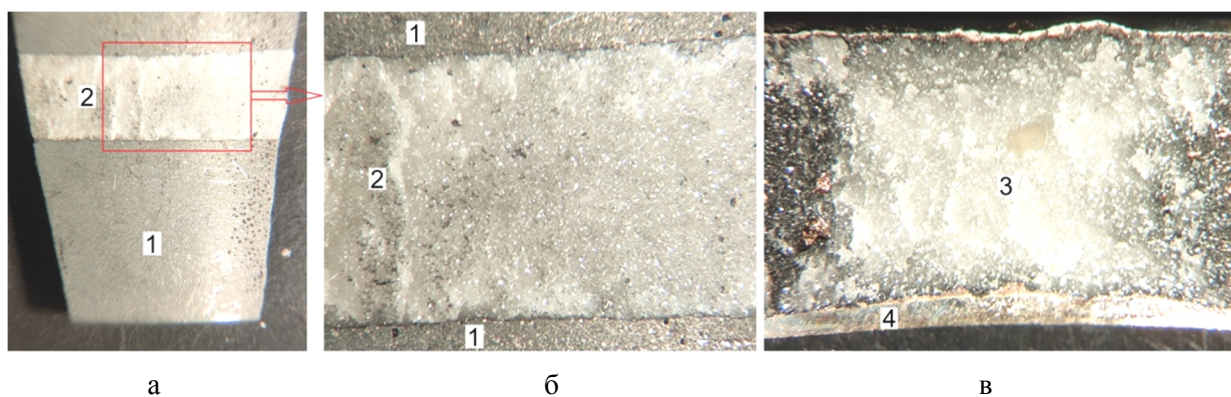


Рис. 10. Макроанализ фрагмента втулки (а), увеличенный участок отрыва (б) и фрагмент металлической полосы с остатками приповерхностного слоя изделия (в)

Выводы

На основе численного моделирования процесса ИТВР и последующего эксперимента при металлизации методом ИТВН установлены оптимальные значения тока индуктора в интервале $1,4\text{--}1,6 \text{ кА}$ в указанном частотном диапазоне $30\text{--}80 \text{ кГц}$. Оптимальными параметрами индуктора распылительной системы являлось число витков $w = 3$, а также внутренний диаметр $D_{IND} = 74 \text{ мм}$ при длине $H_{IND} = 33,5 \text{ мм}$. Для металлизации внешней поверхности керамической втулки диаметром $D_S = 30 \text{ мм}$ в активной области индуктора располагалась молибденовая мишень диаметром $D_T = 50 \text{ мм}$ с толщиной стенки $h_T = 0,5 \text{ мм}$, при этом высокотемпературная оснастка с изделием герметизировалась в кварцевой трубке с внешним диаметром $D_C = 70 \text{ мм}$. Для внутренней поверхности описанной выше керамической втулки целесообразно использовать молибденовую мишень диа-

метром около $D_T = 16 \text{ мм}$ с толщиной стенки не менее $h_T = 0,5 \text{ мм}$. В результате ИТВН молибденовых мишеней при выдержке от $300\text{--}360$ до 600 с на рабочих поверхностях керамических втулок формировался слой металлизации от $5\text{--}6$ до $9,7\text{--}10,2 \text{ мкм}$ с прочностью сцепления от $5,5\text{--}6$ до 8 кгс/мм^2 и более. Таким образом, предлагаемая технология индукционно-термического вакуумного напыления тугоплавких металлов, в частности молибдена, может быть использована для получения высококачественной металлизации рабочих поверхностей изделий из вакуумплотной керамики на основе оксида бериллия марки ВБ100-1, в том числе внутренней и внешней поверхностей втулок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00010.

Экспериментальные исследования процесса металлизации молибденом вакуум-

плотных керамических (бромеллитовых) втулок выполнены в рамках научно-технического сотрудничества между СГТУ имени Гагарина Ю.А. и АО «НПП «Алмаз»,

диссертационного исследования докторанта Кошуро В.А. (научный консультант Фомина А.А.) и также являются научным заданием для последующих проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Microstructure, electrical resistivity and stresses in sputter deposited W and Mo films and the influence of the interface on bilayer properties / G.K. Rane, S. Menzel, T. Gemming, J. Eckert // Thin Solid Films. 2014. Vol. 571 (1). P. 1-8.

2. Molybdenum thin films with low resistivity and superior adhesion deposited by radio-frequency magnetron sputtering at elevated temperature / X. Dai, A. Zhou, L. Feng et al. // Thin Solid Films. 2014. Vol. 567. P. 64-71.

3. Microstructure and mechanical properties of Mo-Ta-W refractory multi-principal element alloy thin films for hard protective coatings / Y. Zhang, Z. Xu, Z. Zhang et al. // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 431. P. 128005.

4. Plasma thermal performance of a dual-process PVD/PS tungsten coating on carbon-based panels for nuclear fusion application /

H. Kim, H.J. Lee, S.H. Kim, C. Jang // Fusion Engineering and Design. 2016. Vol. 109-111 (A). P. 590-595.

5. Laser butt joining of Al₂O₃ ceramic plates metallized by friction stir welding / H. Sonomura, K. Katagiri, T. Yamaguchi et al. // Ceramics International. 2022. Vol. 48 (16). P. 23381-23386.

6. **Koshuro V., Fomina M., Fomin A.** High-hardness carbide coatings and their production on X82WMoCrV6-5-4 steel using induction physical vapor deposition // Composite Structures. 2022. Vol. 281. P. 115045.

7. Superhard Ta-O-N coatings produced on titanium using induction physical vapor deposition / V. Koshuro, M. Fomina, A. Zakharevich, A. Fomin // Ceramics International. 2022. Vol. 48 (13). P. 19467-19483.

8. **Балкевич В.Л.** Техническая керамика: учеб. пособие для втузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Стройиздат, 1984. 256 с.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия», старший научный сотрудник лаборатории «Индукционные, плазменные и лазерные технологии обработки материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомина Марина Алексеевна – научный сотрудник лаборатории «Индукционные, плазменные и лазерные технологии обработки материалов», аспирант кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Koshuro – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Senior Research Fellow of the Laboratory of Induction, Plasma and Laser Technologies for Material Processing, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Marina A. Fomina – Research Fellow of the Laboratory of Induction, Plasma and Laser Technologies for Material Processing, Postgraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Захаревич Андрей Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского; доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Судакова Татьяна Ивановна – начальник отдела главного технолога НПЦ «Электронные системы», АО «НПП «Алмаз»

Рафалович Александр Давидович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе НПЦ «Электронные системы», АО «НПП «Алмаз»

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия», ведущий научный сотрудник лаборатории «Индукционные, плазменные и лазерные технологии обработки материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey M. Zakharevich – PhD (Physics and Mathematics), Head: Laboratory for Diagnostics of Nanomaterials and Structures, Saratov State University; Associate Professor of the Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tatyana I. Sudakova – Head of Chief Process Engineer's Department at Scientific and Production Center «Electronic Systems», JSC Almaz

Aleksander D. Rafalovich – PhD (Technical Sciences), Deputy Director of Research, Scientific and Production Center «Electronic Systems», JSC Almaz

Aleksander A. Fomin – Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Leading Research Fellow of the Laboratory of Induction, Plasma and Laser Technologies for Material Processing, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.08.25, принята к опубликованию 16.09.25

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.94: 551.58

РАЗРАБОТКА МАСШТАБИРУЕМОГО ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА МИКРОКЛИМАТА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

А.А. Никифоров, В.М. Дорошенко, Е.М. Самойлова, О.В. Никифорова

DEVELOPMENT OF A SCALABLE INFORMATION-MEASUREMENT COMPLEX FOR MONITORING MICROCLIMATE IN VARIOUS ROOMS

A.A. Nikiforov, V.M. Doroshenko, E.M. Samoylova, O.V. Nikiforova

В статье представлены результаты разработки масштабируемого информационно-измерительного комплекса (ИИК) для автоматизированного мониторинга параметров микроклимата офисных помещений. Разработанный ИИК основан на трехуровневой архитектуре и включает распределенную сеть беспроводных измерительных узлов, систему сбора данных и облачную платформу для хранения информации. Техническая реализация ИИК выполнена на базе микроконтроллерной платформы ESP32 с использованием прецизионных датчиков температуры, влажности, концентрации CO₂ и атмосферного давления. Система обеспечивает масштабируемость от одной до ста измерительных точек. Экспериментальные исследования показали погрешности измерений: температуры $\pm 0,3$ °C, влажности ± 2 %, концентрация CO₂ $\pm 0,005$ % (об), давления ± 1 гПа при автономной работе узлов до 12 месяцев. Сравнительный анализ показал преимущества ИИК: снижение стоимости развертывания в 2-3 раза, возможность использования открытых протоколов передачи данных, интеграция с системами управления зданием. Практическая значи-

The article presents the results of developing a scalable information-measuring complex (IMC) for automated monitoring of microclimate parameters in office buildings. The developed IMC is based on a three-tier architecture and includes a distributed network of wireless measuring nodes, a data collection system, and cloud platform for storing information. The technical implementation of the IMC was carried out using an ESP32 microcontroller platform with precision sensors for temperature, humidity, CO₂ concentration, and atmospheric pressure measurement. The system provides scalability from one to one hundred measurement points. Experimental studies have shown the following measurement errors: temperature ± 0.3 °C, humidity $\pm 2\%$, CO₂ ± 50 ppm, pressure ± 1 hPa at operating autonomously up to 12 months.

A comparative analysis demonstrated advantages of the IMC, including cost reduction by 2-3 times during deployment, open data transfer protocols, and integration with building management systems. Creation of a ready-made technical solution has practical significance for automating microclimate control in office buildings.

мость заключается в создании готового технического решения для автоматизации контроля микроклимата офисных зданий.

Ключевые слова: информационно-измерительный комплекс, мониторинг микроклимата, беспроводные сенсорные сети, IoT, облачные технологии

Введение

Качество микроклимата в офисных помещениях оказывает существенное влияние на производительность труда, здоровье и комфорт работников. Согласно исследованиям А. Hedge и J. Mallory, отклонения параметров микроклимата от оптимальных значений могут снижать производительность труда на 10-20% и увеличивать заболеваемость персонала [1]. Особую актуальность данная проблема приобрела в условиях развития концепции «умных» зданий и повышения требований к энергоэффективности офисных комплексов.

Действующие санитарные нормы и правила (СанПиН 1.2.3685-21) устанавливают требования к параметрам воздуха рабочей зоны: температура воздуха должна находиться в диапазоне 17-40 °С, относительная влажность – 20-75 %, концентрация углекислого газа не должна превышать 0,25 % (об) [2]. Контроль атмосферного давления также важен для обеспечения комфортных условий работы, особенно в высотных зданиях.

Современные тенденции развития офисной инфраструктуры характеризуются внедрением систем автоматизации зданий (BMS), интеграцией с платформами интернета вещей (IoT) и применением облачных технологий для централизованного управления. В этих условиях традиционные локальные системы контроля микроклимата не обеспечивают требуемой гибкости и масштабируемости.

Энергоэффективность современных офисных зданий напрямую связана с точностью поддержания параметров микроклимата. Избыточное кондиционирование может увеличивать энергозатраты на 30-40 %, в то время как недостаточное – приводить к нарушению санитарно-гигиенических норм

Keywords: *information-measurement complex, microclimate monitoring, wireless sensor networks, IoT, cloud technologies*

[3]. Автоматизированные системы мониторинга микроклимата позволяют оптимизировать работу систем ОВиК и достичь значительной экономии энергоресурсов.

На современном рынке представлен широкий спектр коммерческих решений для мониторинга микроклимата помещений. Среди наиболее распространенных можно выделить системы Honeywell Building Technologies, Schneider Electric EcoStruxure, Siemens Desigo и отечественные разработки компаний «Данфосс» и «Овен» [4-7].

Анализ технических характеристик существующих систем показал следующие основные ограничения:

Высокая стоимость масштабирования. Большинство коммерческих решений имеют модульную архитектуру, при которой стоимость системы линейно возрастает с увеличением количества контролируемых точек. Стоимость развертывания системы для 100 точек может достигать 500-800 тыс. руб., что делает экономически нецелесообразным их применение в небольших офисах.

Закрытые протоколы и форматы данных. Многие производители используют проприетарные протоколы связи (например, BACnet, Modbus, KNX), что затрудняет интеграцию с внешними системами и создает зависимость от конкретного поставщика [8]. Отсутствие открытых программных интерфейсов ограничивает возможности создания собственных приложений для анализа данных.

Традиционные системы часто требуют прокладки специализированных кабельных сетей, что значительно увеличивает время и стоимость монтажа. Настройка систем требует специализированного программного обеспечения и квалифицированного персонала.

Большинство существующих решений ориентированы на локальное хранение и обработку данных, что затрудняет реализацию удаленного мониторинга и аналитики. Интеграция с современными платформами IoT и облачными сервисами либо отсутствует, либо требует дополнительных затрат.

Анализ научных публикаций в области мониторинга микроклимата показал активное развитие исследований в направлении создания беспроводных сенсорных сетей [9–11], применения технологий машинного обучения для прогнозирования параметров микроклимата [12] и интеграции с системами управления зданиями [13]. Однако большинство предложенных решений носят экспериментальный характер и не доведены до уровня коммерческого применения.

Обзор современного состояния в области мониторинга микроклимата показал необходимость разработки нового класса ИИК, обеспечивающих сочетание высокой функциональности, масштабируемости и экономической эффективности.

Целью данной работы является разработка масштабируемого ИИК мониторинга микроклимата для офисных помещений, обеспечивающего:

- многопараметрический контроль – одновременное измерение температуры воздуха, относительной влажности, концентрации углекислого газа и атмосферного давления с точностью, соответствующей требованиям действующих нормативных документов;

- гибкое масштабирование – возможность развертывания системы от одной до ста измерительных точек без изменения базовой архитектуры и с линейным ростом стоимости;

- беспроводную архитектуру – исключение необходимости прокладки специализированных кабельных сетей за счет применения современных протоколов беспроводной связи;

- интеграцию с облачными сервисами – обеспечение удаленного доступа к данным мониторинга, их хранения и аналитической обработки с использованием современных облачных платформ;

- открытые интерфейсы – предоставление API для интеграции с внешними систе-

мами управления зданиями, платформами интернета вещей и специализированными приложениями;

- энергоэффективность – обеспечение автономной работы измерительных узлов не менее 12 месяцев при интервале измерений 5 минут.

Научная новизна работы заключается в разработке архитектуры масштабируемого ИИК, алгоритмов компенсации погрешностей измерений в условиях изменяющихся внешних факторов и методики комплексной оценки качества микроклимата офисных помещений.

Практическая значимость исследования состоит в создании готового к внедрению технического решения, обеспечивающего снижение затрат на создание систем мониторинга микроклимата и повышение энергоэффективности офисных зданий.

Материалы и методы

Разработанный ИИК построен на основе трехуровневой архитектуры, обеспечивающей масштабируемость, надежность и гибкость системы мониторинга микроклимата (рис. 1).

Уровень датчиков включает распределенные измерительные узлы, каждый из которых содержит комплект сенсоров для контроля параметров микроклимата и микроконтроллер для обработки данных. Измерительные узлы обеспечивают автономную работу и передачу данных по беспроводным каналам связи.

Уровень сбора данных представлен локальными концентраторами (шлюзами), осуществляющими агрегацию данных от измерительных узлов, их предварительную обработку и передачу на сервер. Концентраторы обеспечивают буферизацию данных при временных потерях связи и синхронизацию времени в сети.

Уровень обработки данных включает локальный сервер для хранения и обработки данных, а также облачную платформу для долгосрочного хранения, аналитики и предоставления удаленного доступа к информации.

Взаимодействие между компонентами системы осуществляется по схеме рис. 2.

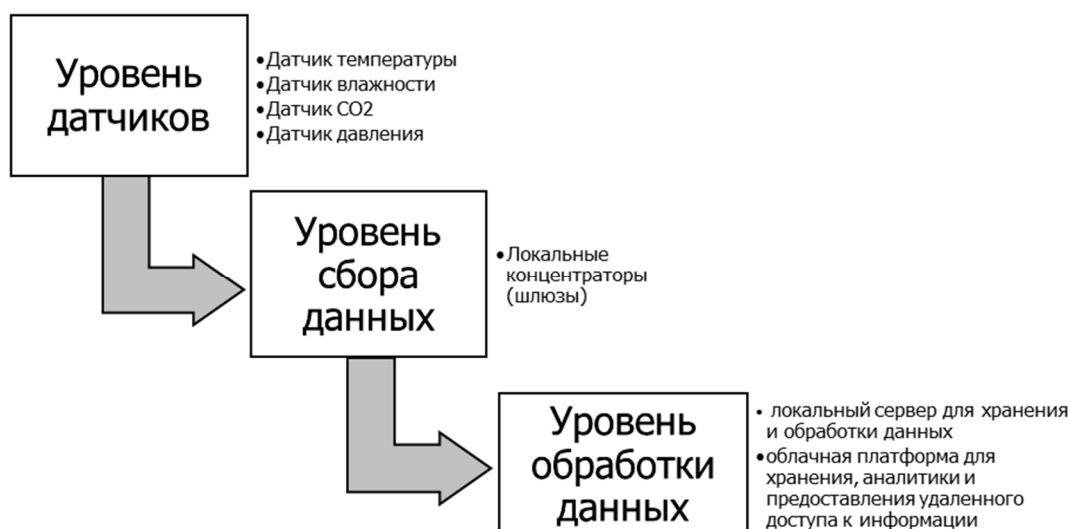


Рис. 1. Трехуровневая архитектура разработанной ИИК

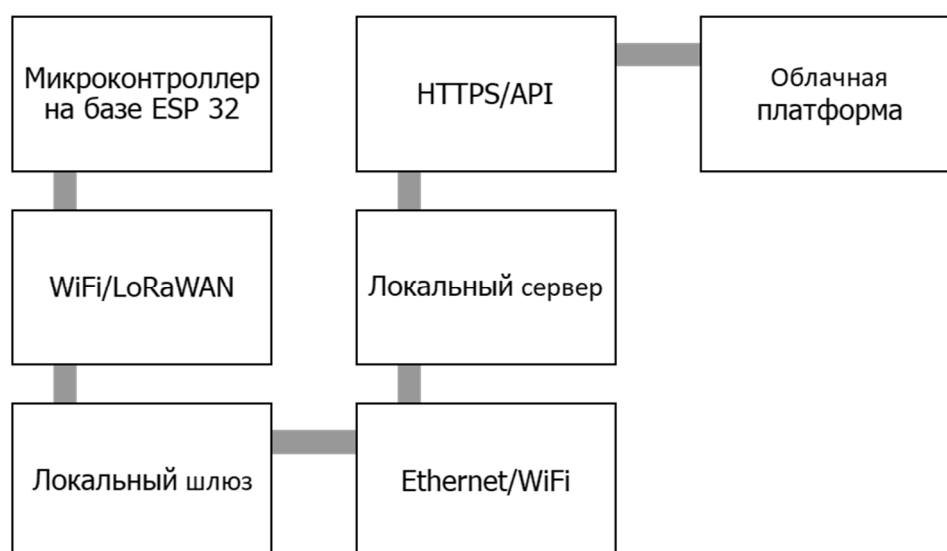


Рис. 2. Схема взаимодействия между компонентами ИИК

Данная архитектура обеспечивает горизонтальную масштабируемость путем добавления новых измерительных узлов без изменения базовой инфраструктуры системы.

Аппаратная часть измерительных узлов построена на микроконтроллерной платформе ESP32-WROOM-32E (рис. 3).

Выбор ESP32 обусловлен оптимальным сочетанием вычислительной мощности, энергоэффективности и наличием встроенных средств беспроводной связи. Двухъядерная архитектура позволяет выделить одно ядро для обработки данных датчиков, а второе – для управления сетевыми функциями.



Рис. 3. Модуль ESP32-WROOM-32E

Для измерения параметров микроклимата выбран следующий комплект датчиков (рис. 4):

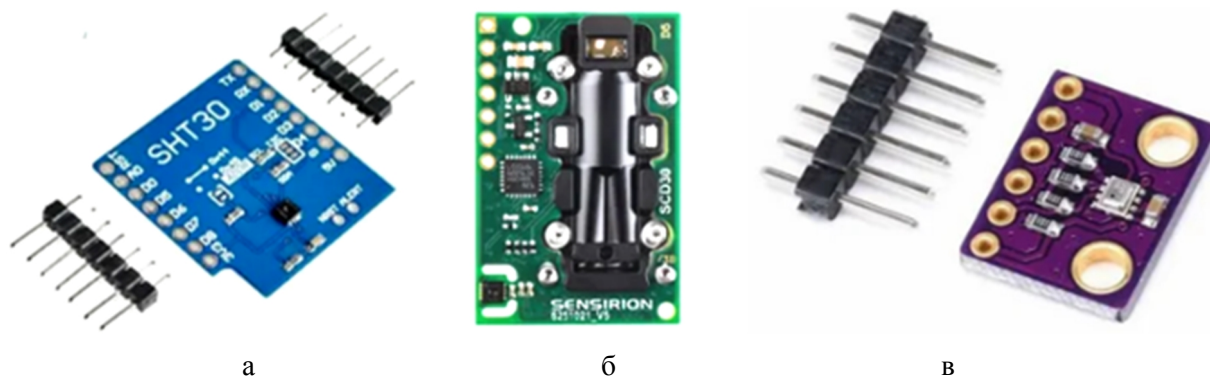


Рис. 4. Комплект датчиков: а – SHT30; б – SCD30; в – BMP280

- датчик температуры и влажности SHT30;
- датчик концентрации CO₂ SCD30;
- датчик атмосферного давления BMP280.

Выбор датчиков основан на анализе точностных характеристик, энергопотребления и совместимости с микроконтроллерной платформой. Все датчики поддерживают цифровой интерфейс I2C, что упрощает схемотехнику и повышает помехоустойчивость.

Измерительные узлы поддерживают два режима питания. Сетевое питание через адаптер 5В/1А с встроенным стабилизатором 3,3 В. Автономное питание от литий-ионной батареи емкостью 3000 мАч. Таким образом, для обеспечения длительной автономной работы реализованы энергосберегающие режимы: активный режим (опрос датчиков и передача данных), режим ожидания (WiFi активен), режим глубокого сна.

При включении системы сбора информации с датчиков тока каждые 5 минут и среднем потреблении тока в 12 мА фоновый режим работы составил 10,4 дня, а при включении опроса датчиков каждый 1 час время автономной работы составляет более 12 месяцев.

Для обеспечения гибкости развертывания системы поддерживаются два протокола беспроводной связи WiFi 802.11n (2,4 ГГц) и LoRaWAN Class A.

Выбор протокола осуществляется при конфигурации узла в зависимости от особенностей объекта и требований к дальности связи.

Для передачи данных используется JSON-формат. Передача данных на сервер осуществляется по протоколу HTTPS с аутентификацией по API-ключу. Для повышения надежности реализованы механизмы подтверждения доставки сообщений, повторная отправка при ошибках (до 3 попыток) и локальная буферизация данных при потере связи (до 1000 записей).

Система поддерживает две топологии сети «Звезда» и ячеистая топология. Причем ячеистая топология обеспечивает самовосстановление сети при выходе из строя отдельных узлов и расширение зоны покрытия.

Встроенное программное обеспечение разработано в среде Arduino IDE с использованием фреймворка ESP32.

Серверная часть системы реализована на платформе Node.js с использованием технологий API-сервер

Интеграция с облачными сервисами реализована на базе Amazon Web Services (AWS).

Облачная архитектура обеспечивает автоматическое масштабирование ресурсов в зависимости от нагрузки и географическое распределение данных для повышения отказоустойчивости.

Результаты эксплуатационных исследований

Для определения точностных характеристик разработанного ИИК проведена серия калибровочных экспериментов в климатической камере ESPEC TABA1MC-71 (рис. 5). Измерения проводились в диапазоне температур от –10 °С до +50 °С, относительной влажности от 10 до 90 %, концентрации CO₂ от 400 до 5000 ppm.



Рис. 5. Климатическая камера ESPEC TABAI MC-71

Результаты калибровки показали следующие метрологические характеристики: $\pm 0,3^\circ\text{C}$, дополнительная погрешность $\pm 0,1^\circ\text{C}$ на каждые 10°C отклонения температуры окружающей среды, основная погрешность измерений влажности $\pm 2\%$, дополнительная погрешность $\pm 0,5\%$ на каждые 10°C отклонения температуры, основная погрешность измерений концентрации CO_2 $\pm 0,005\%$ (об.) в диапазоне $0,04$ - $0,2\%$ (об.), $\pm 3\%$ показаний при концентрации более $0,2\%$ (об.), основная погрешность измерения давления ± 1 гПа во всем диапазоне измерений.

Для компенсации температурной погрешности датчиков разработан алгоритм коррекции показаний, основанный на по-

линомиальной аппроксимации калибровочных кривых:

$$T_k = T_{изм} + \alpha_1(T_{окр} - 23) + \alpha_2(T_{окр} - 23),$$

где T_k – откорректированное показание температуры; $T_{изм}$ – измеренное показание температуры; $T_{окр}$ – показание температуры окружающей среды, α_1 и α_2 – коэффициенты коррекции, определенные экспериментально для каждого типа датчика.

Испытания беспроводной связи проводились в типовом офисном здании площадью 2000 м^2 . Исследовалась зависимость качества связи от расстояния, наличия препятствий и электромагнитных помех.

Результаты тестирования WiFi-связи показали стабильную связь в прямой видимости до 50 м , связь через одну стену (кирпич 250 мм) до 25 м , через две стены до 15 м . Среднее время доставки пакета 45 мс , процент потерянных пакетов менее $0,1\%$.

Для LoRaWAN-связи стабильная связь в прямой видимости до 2 км , в условиях городской застройки до 500 м . Время доставки пакета 1 - 3 с , процент потерянных пакетов – менее $0,5\%$.

Измерения энергопотребления проводились при различных режимах работы измерительных узлов (табл. 1).

Таблица 1 – Энергопотребление ИИК при различных режимах работы

Режим работы	Потребляемый ток, мА	Время работы, с
Активный режим (WiFi)	120	2-3
Режим ожидания (WiFi)	25	57
Режим глубокого сна	0,01	297

При цикле измерений 5 минут (300 с) средний ток составил $12,1\text{ мА}$, что обеспечивает время автономной работы $10,4$ дня от батареи 3000 мАч . При увеличении интервала измерений до 1 часа время автономной работы возрастает до $14,2$ месяцев. Тестирование масштабируемости проводилось путем последовательного увеличения количества измерительных узлов в сети от 1 до 100 устройств.

Результаты показали линейный рост времени обработки данных на сервере.

Стабильная работа сети при количестве узлов до 50 на один концентратор при увеличении до 100 узлов время синхронизации сети составило 30 - 45 с при загрузке процессора сервера менее 15% при 100 активных узлах.

При проведении сравнительного анализа разработанного ИИК с тремя коммерческими системами мониторинга микроклимата были получены и приведены в табл. 2 следующие результаты:

Таблица 2 – Сравнительный анализ ИИК

Параметр	Разработанный ИИК	Honeywell EBI	Schneider Electric	Siemens Desigo
Стоимость развертывания (100 точек), тыс. руб.	180-220	650-800	550-700	600-750
Точность измерения температуры, °C	±0,3	±0,5	±0,5	±0,4
Точность измерения влажности, %	±2	±3	±3	±2,5
Время автономной работы, мес.	12-14	3-6	6-8	4-6
Открытые API	да	ограничено	частично	ограничено
Облачная интеграция	да	опционально	да	опционально

Таким образом, разработанный ИИК демонстрирует значительные преимущества по сравнению с существующими решениями. Основные достоинства системы:

- снижение стоимости развертывания в 2,5-3 раза достигается за счет использования открытых аппаратных платформ, стандартных протоколов связи и облачных сервисов с оплатой по факту использования;

- применение прецизионных датчиков и алгоритмов компенсации погрешностей, которые обеспечивают точность, превышающую требования действующих нормативных документов и сопоставимую с профессиональными измерительными системами;

- реализация энергосберегающих режимов работы позволяет достичь времени автономной работы более 12 месяцев, что в 2-3 раза превышает показатели аналогичных систем;

- модульная архитектура и поддержка множественных протоколов связи обеспечивают адаптацию системы к различным условиям эксплуатации и требованиям заказчика;

- использование открытых API и стандартных форматов данных упрощает интеграцию с существующими системами управления зданиями и платформами IoT.

К рискам работы разработанной системы можно отнести ограничения разработанной системы. Они связаны в основном с особенностями беспроводной связи:

- зависимость качества WiFi-связи от плотности застройки и электромагнитной обстановки;

- ограниченная пропускная способность LoRaWAN-каналов при большом количестве устройств;

- необходимость периодической калибровки датчиков CO₂ (рекомендуется ежегодно).

Для устранения выявленных рисков планируется:

- реализация алгоритмов адаптивного выбора частотных каналов;

- внедрение механизмов автоматической калибровки датчиков;

- разработка гибридных протоколов связи для критически важных применений.

Заключение

Разработан масштабируемый ИИК для мониторинга микроклимата офисных помещений, обеспечивающий контроль четырех основных параметров (температура, влажность, CO₂, давление) с точностью, соответствующей требованиям действующих нормативных документов.

Экспериментально подтверждены основные технические характеристики системы: точность измерения температуры ±0,3 °C, влажности ±2 %, CO₂ ± 0,005 % (об), давления ±1 ГПа при времени автономной работы измерительных узлов до 14 месяцев.

Разработана трехуровневая архитектура, которая обеспечивает горизонтальную масштабируемость системы от 1 до 100 измерительных точек без изменения базовой инфраструктуры.

Проведен сравнительный анализ, показавший снижение стоимости развертывания в 2,5-3 раза по сравнению с существующими коммерческими решениями при сопоставимых или лучших технических характеристиках. Практическая значимость работы заключается в создании готового к

внедрению технического решения, которое может быть использовано для автоматизации контроля микроклимата в офисных зданиях различного масштаба.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием алгоритмов машинного обучения для прогнозирования параметров микроклимата, интеграцией с системами управления HVAC и расширением функциональности за счет дополнительных типов датчиков (освещенность, шум, качество воздуха).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Hedge A., Mallory J.** Effects of office environment on productivity and health of office workers // *Journal of Environmental Psychology*. 2008. Vol. 28. № 2. P. 156-167.
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Москва: Роспотребнадзор, 2021.
3. **Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C.** A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. № 3. P. 394-398.
4. **Никифоров А.А., Киреев А.И., Дорошенко В.М.** Разработка пульта проверки плат адресных релейных модулей для автоматизации контрольных операций // *Вопросы электротехнологии*. 2025. № 1 (46). С. 43-49.
5. Building automation systems: Concepts and technology review / P. Domingues, P. Carreira, R. Vieira, W. Kastner // *Computer Standards & Interfaces*. 2016. Vol. 45. P. 1-12.
6. Agri-IoT: A semantic framework for Internet of Things-enabled smart farming applications / A. Kamilaris, F. Gao, F.X. Prenafeta-Boldú, M.I. Ali // *World Wide Web*. 2016. Vol. 19. № 6. P. 1041-1065.
7. **Minoli D., Sohraby K., Occhiogrosso B.** IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings // *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 4. № 1. P. 269-283.
8. Communication systems for building automation and control / W. Kastner, G. Neug-
- schwandtner, S. Soucek, H.M. Newman // *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93. № 6. P. 1178-1203.
9. Wireless sensor networks: a survey / I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci // *Computer networks*. 2002. Vol. 38. № 4. P. 393-422.
10. Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков / А.Р.Д. Ала-лван, П.А. Львов, М.С. Светлов и др. // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник научных работ X Всерос. науч. конф., пос. Нижний Архыз, 28 сентября – 02 2021 года. Ростов-на-Дону, Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. С. 273-280. DOI 10.18522/syssyn-2021-47.
11. Полумарковская модель телекоммуникационной сети с динамическим управлением / Д.А. Мищенко, А.А. Львов, М.С. Светлов и др. // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021. № 5 (222). С. 49-60. DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-49-60.
12. **Ahmad M.W., Mourshed M., Rezgui Y.** Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of building energy consumption // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 147. P. 77-89.
13. A review on optimized control systems for building energy and comfort management / P.H. Shaikh, N.B.M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, T. Ibrahim // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 34. P. 409-429.

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

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

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Никифорова Ольга Владимировна – аспирант, ассистент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksander A. Nikiforov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Elena M. Samoylova – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga V. Nikiforova – Postgraduate Student, Assistant Lecturer, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.07.25, принята к опубликованию 16.09.25

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621:365

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ В ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЕ НАГРЕВА НА ПРОМЫШЛЕННОЙ И СРЕДНИХ ЧАСТОТАХ

М.А. Федин, М.А. Булатенко, Я.В. Ареев, А.И. Василенко

MODELING OF STRUCTURAL STEEL HYSTERESIS FOR INDUCTIVE HEATING SYSTEMS AT INDUSTRIAL AND MEDIUM FREQUENCIES

M.A. Fedin, M.A. Bulatenko, Ya.V. Areev, A.I. Vasilenko

В статье приводятся результаты решения задачи расчёта магнитных потерь в ферромагнитной трубе индукционно-резистивной системы нагрева на промышленной и средних частотах в среде конечно-элементного анализа. В качестве исследуемых материалов индукционно-резистивного нагревателя используются конструкционные ферромагнитные стали: сталь 10, сталь 15, сталь 25. Исследование проводится с использованием модели гистерезиса Джилса – Атертона. Параметры используемой модели гистерезиса определены по экспериментальным данным. Рассмотрено распределение электромагнитного поля в стенке индукционно-резистивного нагревателя. Получены дифференциальные параметры расчёта индукционно-резистивной системы нагрева с учётом гистерезиса, разработана методика определения интегральных параметров. Произведено сравнение электрических и энергетических характеристик индукционно-резистивных нагревателей из низкоуглеродистой стали с разным содержанием процента углерода, полученных расчетным и экспериментальным методами. Исследовано влияние частоты на электрические и энергетические характеристики, в том числе, на объёмные по-

The article presents the results of solving the problem of calculating magnetic losses in a ferromagnetic tube of an inductive heating system at industrial and medium frequencies in the environment of finite element analysis. The Structural ferromagnetic steels are used for the studied materials of the inductive resistive heater, including steel 10, steel 15, steel 25, which are analogs of American steels Low Carbon Steel 1010, Low Carbon Steel 1018, Low Carbon Steel 1025, respectively. The study is conducted using the hysteresis model of Jiles-Atherton. The main formulas for calculating parameters in constructing the Jiles-Atherton model are provided. The limits of the parameters of the hysteresis model used are based on the experimental data. Distribution of the electromagnetic field in the wall of the inductive resistive heater is considered. Differential parameters for calculating the inductive resistive heating system, taking into account hysteresis, are obtained, and a methodology for determining the integral parameters is developed. A comparison of electrical and energy characteristics of inductive resistive heaters made of low-carbon steel with different carbon content, obtained by calculation and experiments, is carried out. The influence of the frequency on electrical and energy

тери на гистерезис и на объёмные потери от индуцированных токов в индукционно-резистивном нагревателе.

Ключевые слова: магнитные потери, петля гистерезиса, модель Джилса – Атертона, индукционно-резистивная система нагрева, ферромагнитная сталь

Введение

Существуют технологические процессы, в которых нагрев стальных изделий используется, главным образом, для компенсации тепловых потерь: обогрев трубопроводов, резервуаров, бункеров и т.д., для чего требуются малые удельные поверхностные мощности (до 5 кВт/м^2) и, соответственно, слабые магнитные поля напряженностью не выше $4\text{--}5 \text{ кА/м}$. Такой электронагрев применяется для термообработки изделий, подогрева перед сваркой, нагрева пресс-форм, обогрева сосудов и др. [1].

В связи с освоением новых и модернизацией действующих нефтяных и газовых месторождений в малообжитых местностях существует задача обеспечения устойчивой, безаварийной, эффективной работы систем транспортировки добываемой нефти, газа, газового конденсата, технологической воды. Для решения данной задачи используются индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН) или скин-системы, предназначенные для начального разогрева, обогрева и поддержания температуры, а также для защиты от замерзания протяжённых трубопроводов [2-4].

При разработке ИРСН возникает задача расчета параметров электромагнитного поля в ферромагнитной проводящей среде, при решении которой необходимо учитывать нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости материала μ от напряженности магнитного поля H [5]. Также в таких устройствах на распределение параметров электромагнитного поля значительное влияние оказывает явление магнитного гистерезиса (перемагничивание), что важно для проектирования ИРСН, в том числе, для расчёта их интегральных электрических и энергетических характеристик.

characteristics, including hysteresis losses and losses from eddy currents in the inductive resistive heater, is investigated.

Keywords: magnetic losses, hysteresis loop, Jiles-Atherton model, inductive resistive heating system, ferromagnetic steels

Проблема расчета магнитных потерь в индукционно-резистивных нагревателях из конструкционных ферромагнитных сталей обусловлена дефицитностью литературных данных по электрофизическим свойствам этих сталей. Существуют различные методики расчёта потерь на перемагничивание: использование электрических и магнитных схем замещения, метод конечных элементов и др.

Достоинством использования программ конечно-элементного анализа, по сравнению с использованием схем замещения, является возможность учёта частоты, намагниченности насыщения, а также формы и размеров петли гистерезиса.

Для описания основной кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса исследователями используются аналитические выражения, основывающиеся на реализации трех подходов: Прейзаха – Нееля – Красносельского (серьезный недостаток этой модели – наличие статистической функции плотности вероятности, характеризующей свойства материала) [6-7]; теории микромагнетиков Брауна и Ахарони (метод является теоретически корректным, но не позволяет получить явно простое уравнение состояния для ферромагнетика); модели Джилса – Атертона [8].

Кроме перечисленных, для описания магнитных свойств материала также используется модель Чана, для настройки которой необходимо знать только три справочных параметра: намагниченность насыщения, коэрцитивную силу, форму петли гистерезиса [9]. По сравнению с другими моделями, настройка которых осуществляется более сложным образом, это дает существенное преимущество. С помощью модели Чана можно моделировать частные петли гистерезиса, а также учитывать влияние частоты и температуры.

Однако, в некоторых случаях эта модель является менее точной по сравнению с моделью Джилса – Атертона, хотя качественно правильно описывает основные процессы намагничивания.

Более удобны для использования аналитические модели, которые учитывают как нелинейный характер магнитных свойств, так и предысторию намагничивания. Поскольку модель Джилса – Атертона обладает такими характеристиками, то воспользуемся ей.

Модель Джилса – Атертона является феноменологической моделью, представленной дифференциальным уравнением для намагниченности M как функции H [10]:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(M_{an} - M) \left[\delta k - \alpha(M_{an} - M) \right] + c \frac{dM_{an}}{dH_e}}{1 + c - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e}}, \quad (1)$$

где M_{an} – безгистерезисная намагниченность; c – коэффициент обратимости движения стенок доменов (постоянная упругого смещения границ доменов); α – коэффициент магнитной связи доменов; k – постоянная подвижности доменов;

$\delta = \text{sign}\left(\frac{dH}{dt}\right)$ – указывает знак изменения напряженности магнитного поля [11].

Безгистерезисная намагниченность определяется по уравнению Ланжевена:

$$M_{an}(H_e) = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right], \quad (2)$$

где M_s и a – намагниченность насыщения и коэффициент магнитной связи доменов (параметр форм безгистерезисной кривой намагничивания) соответственно, $H_e = H + \alpha M$ – эффективная напряженность магнитного поля Вейсса.

Учитывая (1) и (2), получаем уравнение в модели Джилса – Атертона, определяющее изменение общей намагниченности M , вызванное изменением магнитного поля:

$$dM = \max(\chi \cdot dH_e, 0) \frac{\chi}{|\chi|} + c_r dM_{an}, \quad (3)$$

где вспомогательный вектор χ определяется как:

$$\chi = k_p^{-1} \cdot (M_{an} - M). \quad (4)$$

Для каждого магнитного материала эти коэффициенты подбираются по имеющимся экспериментальным данным в соответствии с влиянием параметров модели Джилса – Атертона на петлю гистерезиса, которое в графическом виде представлена на рис. 1.

Таким образом, чтобы определить параметры модели Джилса – Атертона, нужно получить петлю магнитного гистерезиса конструкционной стали экспериментальным путем. При этом необходимо учитывать, что на магнитные свойства в целом и на форму, и размеры петли магнитного гистерезиса, в частности, оказывают влияние различные факторы, например, термообработка стали.

Экспериментальное определение петли гистерезиса материала ферромагнитной трубы ИРСН

Действительно, термообработка может существенно изменить магнитные характеристики ферромагнитной стали. Например, она может влиять на распределение магнитных доменов и, как следствие, на величину удельных объемных потерь на гистерезис.

Это обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований, направленных на определение формы и размеров петель магнитного гистерезиса для различных условий термообработки.

Для учета влияния термообработки ферромагнитной стали на ее магнитные свойства авторами статьи были проведены экспериментальное определение формы и размеров петель магнитного гистерезиса, а также произведена оценка удельных объемных потерь на гистерезис в зависимости от напряженности магнитного поля на промышленной частоте.

В качестве материала была взята ферромагнитная сталь 10. В эксперименте производился анализ форм петель гистерезиса

для двух образцов данной трубы (образец № 1 и образец № 2), используемые для изготовления индукционно-резистивного нагревателя. Образец № 1 отжигу не подвергался. Образец № 2 был подвергнут отжигу при температуре 750 °С в течении од-

ного часа с последующим охлаждением в течение шести часов. Измерения проводились на частоте 50 Гц осциллографическим методом, считающимся наиболее удобным для получения магнитных характеристик на переменном токе [12-16].

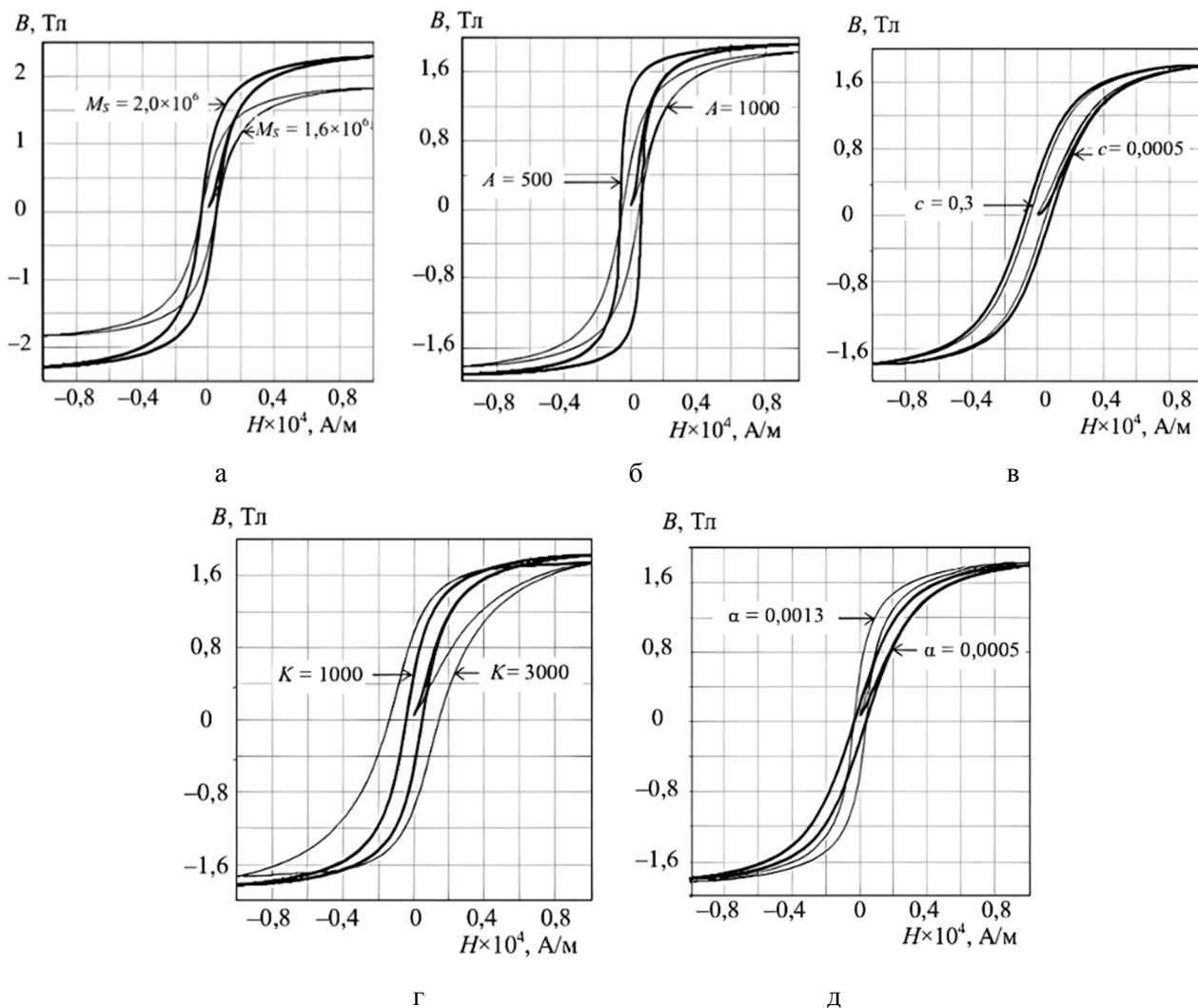


Рис. 1. Влияние параметров модели Джилса – Атертона на петлю гистерезиса:

а – влияние M_s на петлю гистерезиса; б – влияние A на петлю гистерезиса; в – влияние c на петлю гистерезиса; г – влияние k на петлю гистерезиса; д – влияние α на петлю гистерезиса

Для измерения применяется специальный прибор – феррограф (рис. 2), который позволяет визуально наблюдать динамические петли магнитного гистерезиса на экране электронного осциллографа.

Изображение гистерезисной петли образуется в результате воздействия на электронный луч двух переменных напряжений: U_0 и U_C . На горизонтальную пластину подается напряжение U_0 , про-

порциональное мгновенному значению напряженности поля H . К вертикально отклоняющим пластинам подводится напряжение U_C , пропорциональное мгновенному значению магнитной индукции в образце. По результатам эксперимента были получены петли гистерезиса и кривые намагничивания для двух исследуемых образцов, представленные на рис. 3 и 4 соответственно.

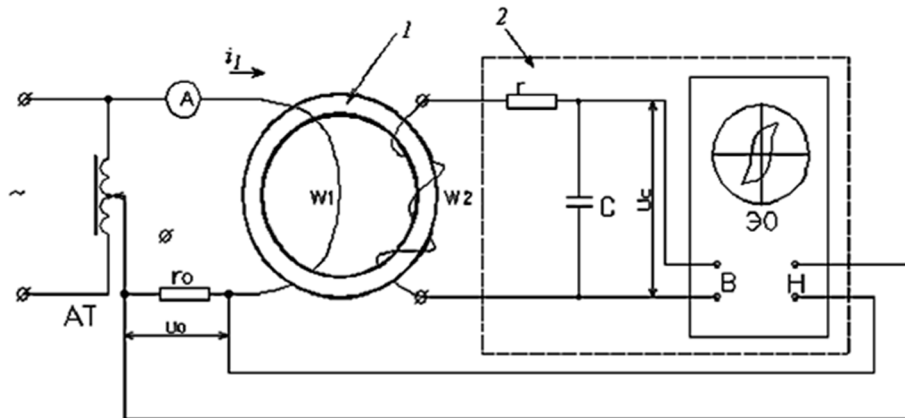


Рис. 2. Схема феррографа: 1 – исследуемый образец, 2 – феррограф

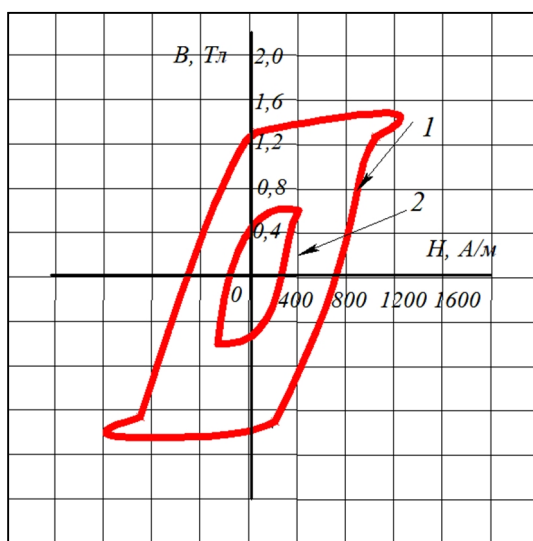


Рис. 3. Петли гистерезиса в ферромагнитной трубе из неотожженной стали 10, полученные в результате эксперимента в зависимости от значения напряжения U_0 и U_c :
1 – $U_0 = 14,1$ и $U_c = 168$ мВ, $B = 1,4$ Тл, $H = 1329,8$ А/м; 2 – для $U_0 = 4,71$ и $U_c = 73,8$ мВ, $B = 0,615$ Тл, $H = 444,2$ А/м

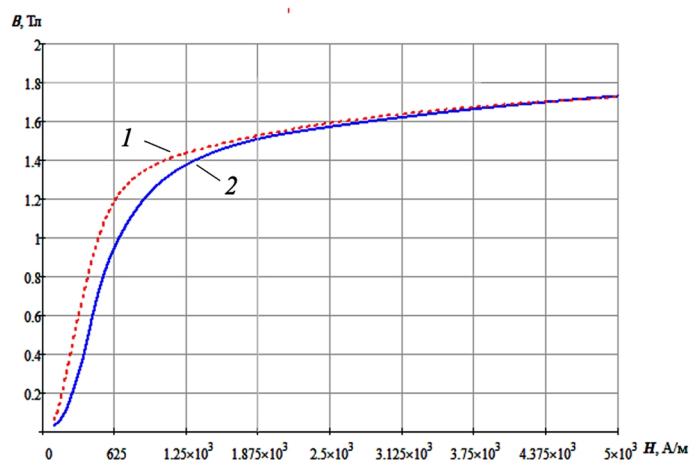


Рис. 4. Зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля для двух образцов из стали 10, полученная в результате эксперимента:
1 – для отожженной;
2 – для неотожженной

Результаты расчёта электрических и энергетических характеристик индукционно-резистивных нагревателей с учетом гистерезиса

С учётом описанных выше экспериментальных данных, представленных графически на рис. 3, 4, используем модель Джилса – Атертона для проведения расчетов ИРСН на промышленной и на средних частотах в программной среде с использованием метода конечных элементов.

Зададим основные параметры для модели Джилса – Атертона, чтобы форма и размеры

петли, полученной в программной среде, совпала с экспериментально полученными формой и размером петли (образец № 1): обратимость намагничивания: $cr = 0,02$; намагниченность насыщения: $M_s = 1500000$ А/м; плотность доменных границ: $a = 200$ А/м; потери на закрепление: $k_p = 700$ А/м; междоменная связь: $\alpha = 0,00001$.

Исходные данные для расчёта электрических и энергетических параметров по модели Джилса – Атертона: ток индуктора $I = 100$ А, частота 50 Гц. Размеры элементов в поперечном сечении представлены на

рис. 5: сечение медного центрального проводника (1) – $12,6 \text{ мм}^2$, внешний проводник (3) – труба 32×3 из стали 10. Свойства материала индуктора: относительная магнитная проницаемость $\mu = 1$, удельное электрическое сопротивление $\rho = 1,93 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,

удельная электрическая проводимость $\sigma = 5,18 \cdot 10^7 \text{ См/м}$. Свойства материалов загрузки: удельное электрическое сопротивление $\rho = 1,66 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, удельная электрическая проводимость $\sigma = 6 \cdot 10^6 \text{ См/м}$.

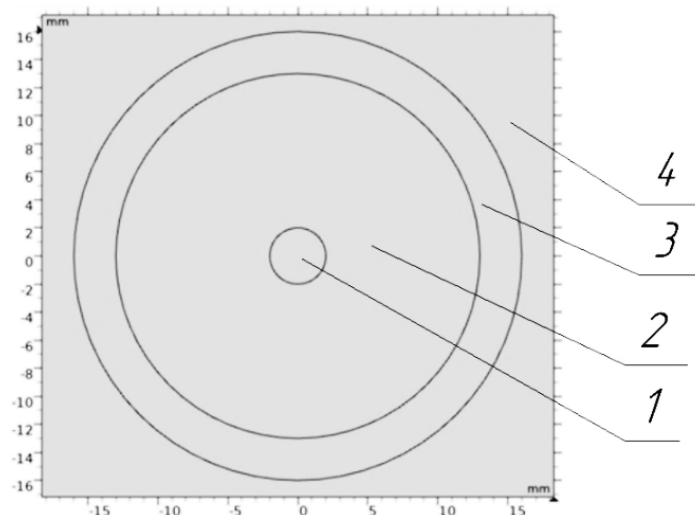


Рис. 5. Поперечное сечение ИРСН: 1 – индуктор; 2, 4 – воздух; 3 – ферромагнитная труба

В качестве граничного условия на внешней поверхности трубы задавалось значение напряженности магнитного поля $H = 0$, поскольку направления токов индуктора и трубы взаимно противоположны.

Построенная по модели Джилса – Атертона петля гистерезиса для стали 10, представленная на рис. 6, принимают форму схожую с экспериментально полученной на феррографе петлѐй. Полученная зависимость магнитной индукции от напряжѐнно-

сти магнитного поля для стали 10 представлена на рис. 7.

Из сравнения рис. 3 и 6, а также рис. 4 и 7 можно определить, что экспериментальная и теоретическая петли практически совпадают – отличие составляет не более 5-7 %.

На рис. 8 представлены дифференциальные результаты электромагнитного расчета – распределение плотности тока в стенке ферромагнитной трубы ИРСН.

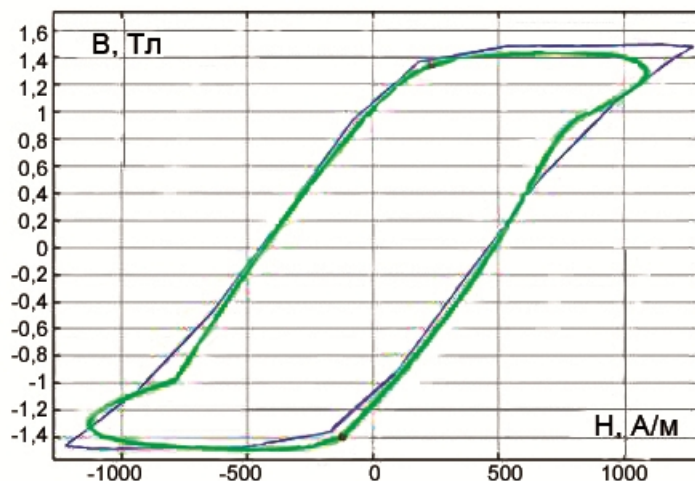


Рис. 6. Петля гистерезиса в ферромагнитной трубе и образца № 1 (неотожженной стали)

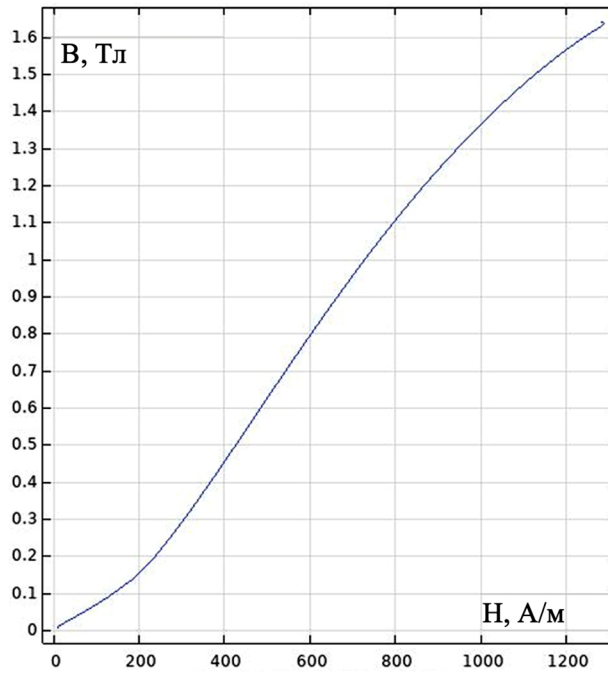


Рис. 7. Зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля для стали 10

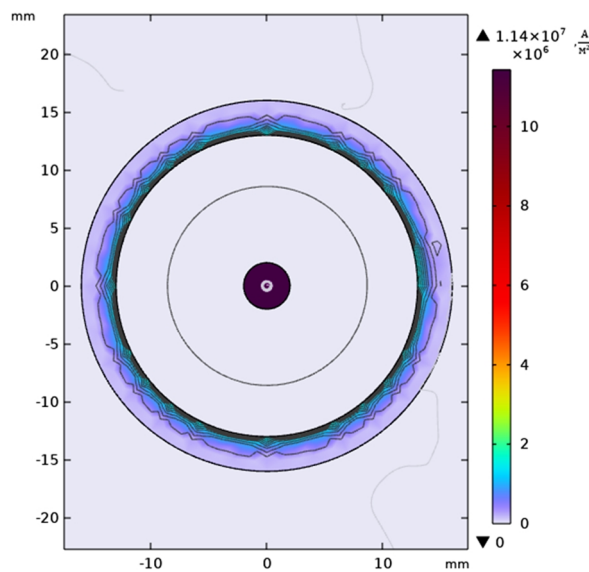


Рис. 8. Распределение плотности тока в стенке ферромагнитной трубы ИРСН

С помощью программы, использующей метод конечных элементов, можно решить одну из поставленных в данной работе задач – определить объёмные потери на перемагничивание в ферромагнитной трубе. Для этого с целью точного определения величин объёмных потерь на перемагничивание поперечный слой ферромагнитной трубы предлагается разделить на 20 слоёв.

Особенностью программы, использующей метод конечных элементов, является определение полных объёмных потерь

в ферромагнитной трубе. Для расчёта объёмных потерь на перемагничивание предлагается использование разработанного метода.

Полные объёмные потери активной мощности ($w_{полн}$, Вт/м³) в ферромагнитной трубе ИРСН складываются из объёмных потерь на индуцированные токи ($w_{инд}$, Вт/м³) и объёмных магнитных потерь на гистерезис ($w_{магн}$, Вт/м³):

$$w_{полн} = w_{магн} + w_{инд}. \quad (5)$$

Для определения объёмных потерь на индуцированные токи в слое ферромагнитной трубы воспользуемся интегралом:

$$w_{\text{инд}} = \int j^2 \cdot \rho dS = 2\pi j^2 \rho \cdot r \cdot \Delta r, \quad (6)$$

где j – плотность тока в слое, А/м²; ρ – удельное сопротивление слоя, Ом·м; r –

внутренний радиус слоя, м; Δr – толщина слоя, м.

По результатам моделирования и приведённых расчётов построены зависимости объёмных полных потерь мощности и объёмных потерь на перемагничивание от напряжённости магнитного поля, представленных на рис. 9 (кривые 1 и 2 соответственно).

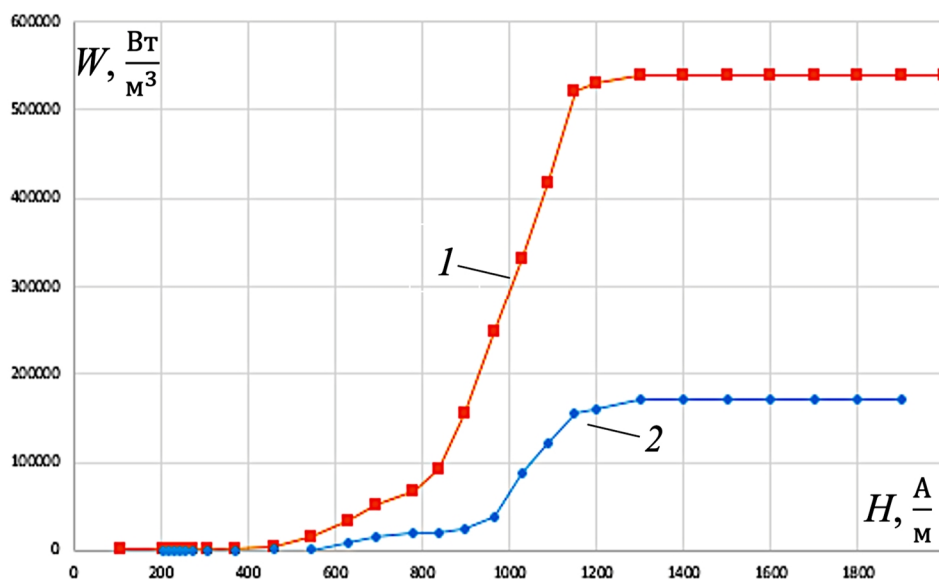


Рис. 9. Зависимость полных (1) и магнитных объёмных (2) потерь от напряжённости магнитного поля

Для расчета действующих значений напряжения индуктора и напряжения на поверхности ферромагнитной трубы воспользуемся кривыми мгновенных значений (рис. 10), полученными с использованием расчетной программы (ток индуктора 100 А, частота 50 Гц).

Из рис. 10 следует, что кривые являются существенно несинусоидальными. Для точного понимания несинусоидальности кривых были определены коэффициенты нелинейных искажений $K_{НИ}$ и гармоник K_G . Для кривой при токе в 100 А $K_{НИ} = 0,9724$, $K_G = 0,215$, что свидетельствует о наличии высших гармоник из-за нелинейного характера нагрузки. В данном случае, из-за магнитных свойств ферромагнитной трубы, которая при протекании через неё тока имеет существенные активные потери мощности из-за возникающих потерь на перемагничивание.

В табл. 1 приводятся результаты расчёта электрических и энергетических

характеристик в программе, использующей метод конечных элементов, для стали 10, 15, 25 по модели Джилса – Атертона. В том числе, приводится сравнение параметров для взятых сталей и параметров модели, ранее полученных при расчёте ИРСН при температуре окружающей среды 20 °С, для неотожжённой стали 10 в специализированной программе для ЭВМ – IRSN PRO [17].

Из табл. 1 видно, что с увеличением процента содержания углерода уменьшается площадь петли, поэтому объёмные потери на гистерезис снижаются. Сравнение параметров сталей с расчётными параметрами модели, рассчитанной в специализированной программе, даёт понимание, что использование модели Джилса – Атертона показывает значительную точность и эффективность при определении электрических и энергетических характеристик.

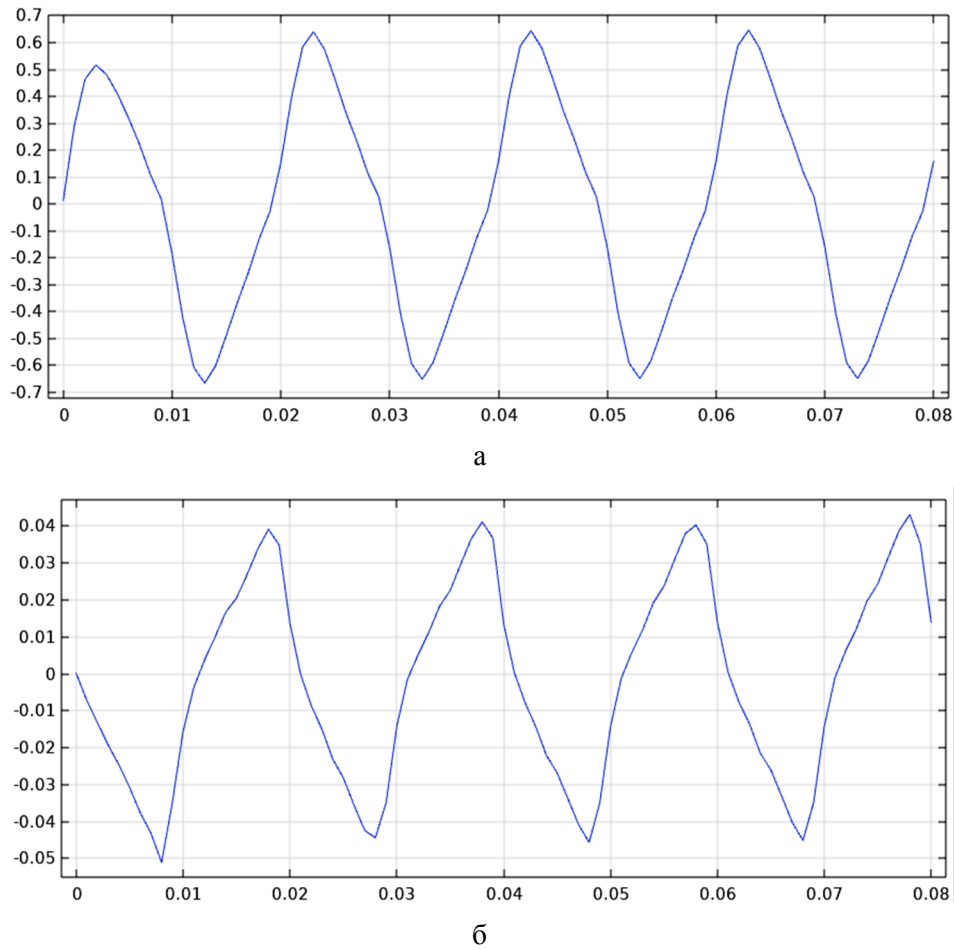


Рис. 10. Временные диаграммы напряжений индуктора (а) и на поверхности трубы (б)

Таблица 1 – Сравнение результатов расчёта электрических и энергетических характеристик

	Результаты расчёта			Расчётные параметры модели
	для стали 10	для стали 25	для стали 15	
U_1 , В	0,424	0,494	0,46	0,464
U_2 , В	0,028	0,03	0,035	0,01
P_1 , Вт	15,58	15,58	15,58	15,32
P_2 , Вт	24,63	23,65	23,54	25,992
P , Вт	40,21	39,23	39,11	41,31
Q_1 , ВАр	0	0	0	0
Q_2 , ВАр	18,33	18,9	19	20,05
Q_δ , ВАр	1,51	1,51	1,51	1,175
$Q_{сн}$, ВАр	0,0012	0,0013	0,0013	0,003
Q , ВАр	19,83	20,41	20,511	21,23
S , ВА	44,83	44,22	44,16	46,44
$\cos \varphi$	0,897	0,887	0,885	0,889
η	0,613	0,603	0,602	0,63

Обозначения: U_1 – напряжение на индукторе, В; U_2 – напряжение на поверхности трубы, В; P_1 – активная мощность в индукторе, Вт; P_2 – активная мощность в трубе, Вт; P – суммарная активная мощность, Вт; Q_1 – реактивная мощность в индукторе, ВАр; Q_2 – реактивная мощность в трубе, ВАр; Q_δ – реактивная мощность в зазоре, ВАр; $Q_{сн}$ – реактивная мощность снаружи трубы, ВАр; Q – суммарная реактивная мощность, ВАр; S – полная мощность системы, ВА.

При анализе влияния частоты сети на петлю гистерезиса, построенную на основе модели Джилса – Атертона, были получены результаты расчёта, представленные на рис. 11.

Анализ энергетических и электрических характеристик, приведённых в табл. 2,

полученных в результате моделирования на разных частотах, показывает, что модель Джилса – Атертона учитывает влияние повышенных частот на полные объёмные потери.

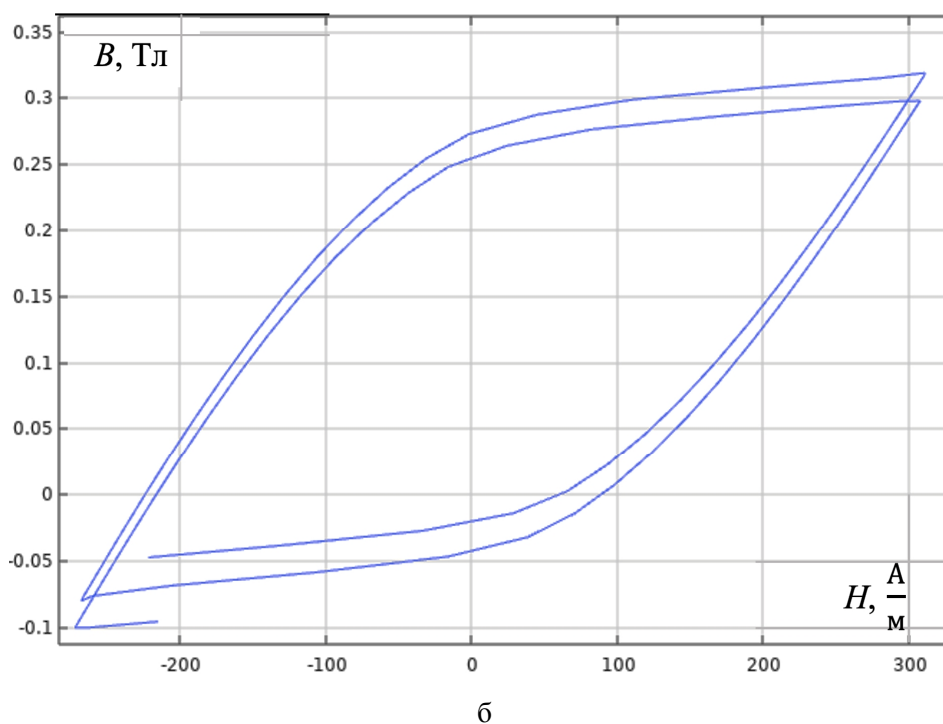
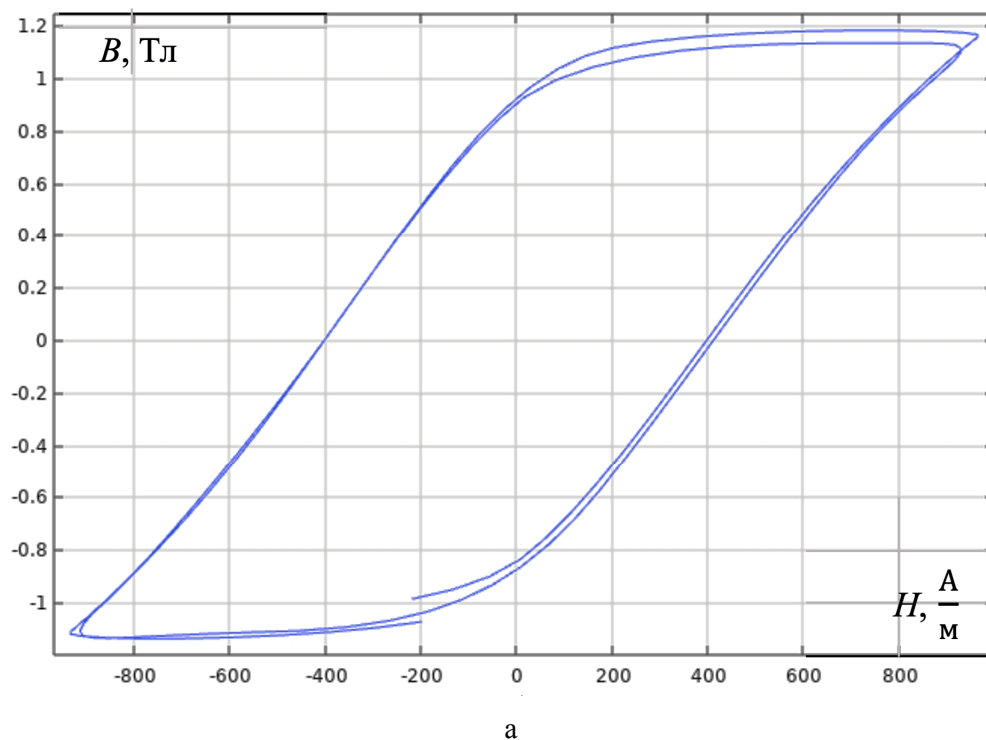


Рис. 11. Форма петель гистерезиса для стали 10 в зависимости от частоты питающего напряжения:
а – при частоте 150 Гц; б – при частоте 2400 Гц

Таблица 2 – Сравнение результатов расчёта электрических и энергетических характеристик при изменении частоты питающего напряжения

	При частоте 50 Гц	При частоте 150 Гц	При частоте 2400 Гц
U_1 , В	0,424	0,672	1,24
U_2 , В	0,028	0,014	0,041
P_1 , Вт	15,58	21,55	23,64
P_2 , Вт	24,63	47,74	276,72
P , Вт	40,21	69,29	300,35
Q_1 , ВАр	0	0	0
Q_2 , ВАр	18,33	37,9	96,32
Q_δ , ВАр	1,51	2,05	2,84
$Q_{сн}$, ВАр	0,0012	0,0021	0,0023
Q , ВАр	19,83	39,9	99,2
S , ВА	44,83	79,95	316,32
$\cos \varphi$	0,897	0,867	0,949
η	0,613	0,689	0,921

В результате построения петель гистерезиса на повышенных частотах было определено, что при увеличении частоты питающего напряжения уменьшаются размеры петли гистерезиса.

При исследовании размеров петель, представленных на рис. 11, полученных в результате моделирования ИРСН на повышенных частотах, было определено, что повышенная частота в ферромагнитных сталях уменьшает размеры петли [18]. Вихревые токи за счёт поверхностного эффекта с ростом частоты изменяют магнитную проницаемость ферромагнитной трубы в целом.

При определении объёмных потерь на перемагничивание на повышенных основным показателем является расчёт параметров для модели Джилса – Атертона. При этом идёт учёт нелинейных свойств ферромагнитной стали при расчёте по методике разбиения на 20 слоёв её поперечного сечения. Данные условия создают сложность при определении объёмных потерь на перемагничивание. Таким образом, использование расчётных петель гистерезиса, полученных при моделировании ИРСН с помощью модели Джилса – Атертона, позволяет упростить расчёт полных объёмных потерь мощности ИРСН.

Заключение

Экспериментально исследовано влияние термообработки на размеры и форму предельной петли магнитного гистерезиса стали 10, а также на основную кривую намагничивания.

Было произведено моделирование ИРСН в программе, использующей метод конечных элементов. Была получена петля гистерезиса для стали 10 с использованием модели Джилса – Атертона. Экспериментальная и теоретическая петли практически совпадают, отличие составляет не более 5-7 %.

Получена картина распределения плотности тока в стенке ферромагнитной трубы ИРСН, определены полные объёмные потери мощности, а также вычислены на индуцированные токи и объёмные магнитные потери (потери на перемагничивание) в зависимости от напряжённости магнитного поля.

При анализе временных диаграмм напряжений индуктора и на поверхности были определены коэффициенты (нелинейных искажений $K_{ни} = 0,9724$ и гармоник $K_H = 0,215$), что свидетельствует о необходимости учета несинусоидальности при расчете электрических и энергетических характеристик ИРСН.

Получены результаты расчёта электрических и энергетических характеристик в

программе, использующей метод конечных элементов, для стали 10, 15, 25 по модели Джилса – Атертона. С увеличением процента содержания углерода уменьшается площадь петли, поэтому потери на гистерезис снижаются.

Исследовано влияния частоты питающего напряжения на электрические и энергетические характеристики, в том числе, на объёмные потери на перемагничивание. По построенным петлям гистерезиса видно, что при увеличении частоты питающего напряжения уменьшаются размеры петли гистерезиса за счёт снижения значения магнитной индукции.

Модель Джилса – Атертона учитывает увеличение объёмных потерь на перемагничивание при повышении частоты, а также увеличение потерь на вихревые

токи за счёт поверхностного эффекта. В результате их сумма влечёт значительное увеличение полных объёмных потерь, что является главным фактором при определении суммарной активной мощности ИРСН. Рост частоты влияет, в том числе, на изменение значения напряжения на трубе, что влечёт за собой неизбежное сокращение длины плеча обогрева с ростом напряжения.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка современных разветвленных скин-кабельных систем электрообогрева с цифровым двойником и пространственной цифровой системой термоконтроля» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кувалдин А.Б.** Индукционный нагрев ферромагнитной стали. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 198 с.
2. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах / А.Б. Кувалдин, М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, В.А. Шатов // *Электричество*. 2005. № 11. С. 56-61.
3. **Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б.** Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. 2-е изд., перераб. и доп. Вологда: ООО «Инфра-Инженерия», 2023. 524 с.
4. **Птицын Д.В., Птицына Е.В., Кувалдин А.Б.** Эффективные режимы систем обогрева // *Фёдоровские чтения – 2020: L Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы*, Москва, 17-20 ноября 2020 года. Москва: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 91-98.
5. **Конесев С.Г., Хлюпин П.А.** Инновационные электротехнологические системы обеспечения температурных режимов технологических трубопроводов // *Силовое и энергетическое оборудование // Автоматизированные системы*. 2019. № 1. С. 29-39.
6. **Подберезная И.Б.** Алгоритмы моделирования магнитного гистерезиса // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2015. № 6. С. 5-13. DOI 10.17213/0136-3360-2015-6-5-13.
7. **Красносельский М.А., Покровский А.В.** Системы с гистерезисом. Москва: Наука, 1983. 271 с.
8. **Амелин С.А., Новиков А.А.** Экспериментальное определение параметров модели перемагничивания Джилса – Атертона // *Электричество*. 1995. № 9. С. 46-51.
9. **Абдулхаков И.Ю., Жданова Е.Н.** Численное моделирование переходного процесса в трансформаторе тока с учётом нелинейности магнитных свойств материала сердечника // *Электрические станции*. 2025. № 1 (1122). С. 48-55. DOI 10.71841/EP.ELST.2025.1122.1.05.
10. **Bergqvist A.J.** A Simple Vector Generalization of the Jiles-Atherton Model of Hysteresis // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1996. Vol. 32. № 5. P. 4213-4215.
11. **Денисов П.А.** Описание петли гистерезиса с использованием явных выражений для модели Джилса – Атертона первого уровня // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2018.

T. 61. № 2. С. 13-18. DOI 10.17213/0136-3360-2018-2-13-18.

12. **Cheng D.K.** Field and Wave Electromagnetics. 2nd ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1989. xiv, 713 p.

13. **Jin J.** The Finite Element Method in Electromagnetics. New York: John Wiley & Sons, 1993. 753 p.

14. **Popovic B.D.** Introductory Engineering Electromagnetics. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1971. 486 p.

15. **Brociek W., Wilanowicz R.** Influence of supplying voltage on deformation of current in transformer // Przegląd elektrotechniczny. 2013. Vol. 89. № 4. P. 269-271. ISSN 0033-2097.

16. **Valadkhan S., Morris K., Khajepour A.** Review and comparison of hysteresis models for magnetostrictive materials // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2009. Vol. 20. P. 131-142.

17. Патент № RU 2023619476. Программа для расчёта индукционно-резистивной системы нагрева IRSN PRO / Федин М.А., Зотов М.Л., Василенко А.И., Молостова А.В., Кувалдин А.Б., Федина С.А.; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»). Дата подачи заявки: 27.04.2023. Оpubл.: 11.05.2023

18. **Миронюк Н.Е., Саматов М.В.** Влияние частоты перемагничивания на динамический магнитный гистерезис для пластины из электротехнической стали // Физика металлов и металловедение. 2023. Т. 124. № 5. С. 369-376.

Федин Максим Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры ЭППЭ, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Булатенко Мария Андреевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры ЭППЭ, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ареев Ярослав Вадимович – магистрант кафедры ЭМЭЭА, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Василенко Александра Ильинична – магистрант кафедры ЭППЭ, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Maxim A. Fedin – Dr. Sci. Tech., Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Maria A. Bulatenko – PhD in Economics, Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Yaroslav V. Areev – Master's Student, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses. National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Alexandra I. Vasilenko – Master's Student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Статья поступила в редакцию 17.07.25, принята к опубликованию 16.09.25

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.001.57

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А.П. Червоненко, Н.С. Попов, Е.А. Домахин

OPTIMIZING THE SIMULATION PROCESS OF ELECTRICAL COMPLEXES

A.P. Chervonenko, N.S. Popov, E.A. Domakhin

Разработан универсальный модульный подход к построению имитационных моделей электротехнических комплексов. Согласно предлагаемому подходу реализована имитационная модель для исследования в среде MATLAB – Simulink, которая представляет собой полновесную структурную схему, динамически реконфигурируемую под конкретный тип исследования. Для управления конфигурацией разработан графический интерфейс пользователя, который автоматически изменяет ключевые параметры, такие как время моделирования, период дискретизации, параметры силовой схемы модели. Алгоритмы управления реализованы на основе метода конечных автоматов, обеспечивающего однозначность состояний системы.

Ключевые слова: имитационное моделирование, электротехнический комплекс, модульный подход, графический интерфейс, автоматическая реконфигурация, конечный автомат, оптимизация проектирования

The paper considers a universal modular approach to designing simulation models of electrical engineering complexes. According to the proposed approach, a simulation model for research in the MATLAB – Simulink environment was used, which is a full-fledged structural diagram that is dynamically reconfigured for a specific type of research. A graphical user interface has been developed to manage the configuration, which automatically changes the key parameters, such as simulation time, detailing period, and parameters of the model power circuit. Control algorithms are implemented using a finite state machine method, ensuring a unique mechanism to the system.

Keywords: simulation modeling, electro-technical complex, modular approach, graphical user interface, automatic reconfiguration, finite-state machine, design optimization

Введение

Проектирование современных систем электропитания, характеризующихся высокой ответственностью и сложностью, таких как системы аварийного и бесперебойного

питания электроприводов, достаточно затруднительно реализовать без применения глубокого компьютерного моделирования. Традиционные способы решения предполагают разработку отдельных имитационных

моделей под каждую конкретную задачу: анализ переходных процессов, проверку логики управления, моделирование аварийных режимов. Такой подход порождает ряд существенных недостатков: увеличение трудоемкости из-за необходимости создания и поддержки множества моделей, высокую вероятность ошибок при ручном внесении изменений в топологию или параметры, а также сложности при сопоставлении результатов. В связи с этим актуальной является задача разработки унифицированного подхода, позволяющего интегрировать множество сценариев исследования в рамках единой полновесной модели, что позволит сократить временные затраты, повысить повторяемость экспериментов и снизить порог вхождения для исследователей [1].

1. Предлагаемый подход к разработке унифицированной имитационной модели электротехнического комплекса

В качестве методологической основы был предложен модульный принцип построения имитационной модели электротехнического комплекса [2]. Модель, структурная схема которой представлена на рис. 1, включает взаимозаменяемые подструктуры силовой части и системы управления.

Ключевым элементом, обеспечивающим гибкость подхода, является подсистема выбора опыта (рис. 2), позволяющая активировать один из четырех сценариев: АВР, опыт выбега асинхронного двигателя, БАВР на основе выбега, БАВР с накопителем энергии.

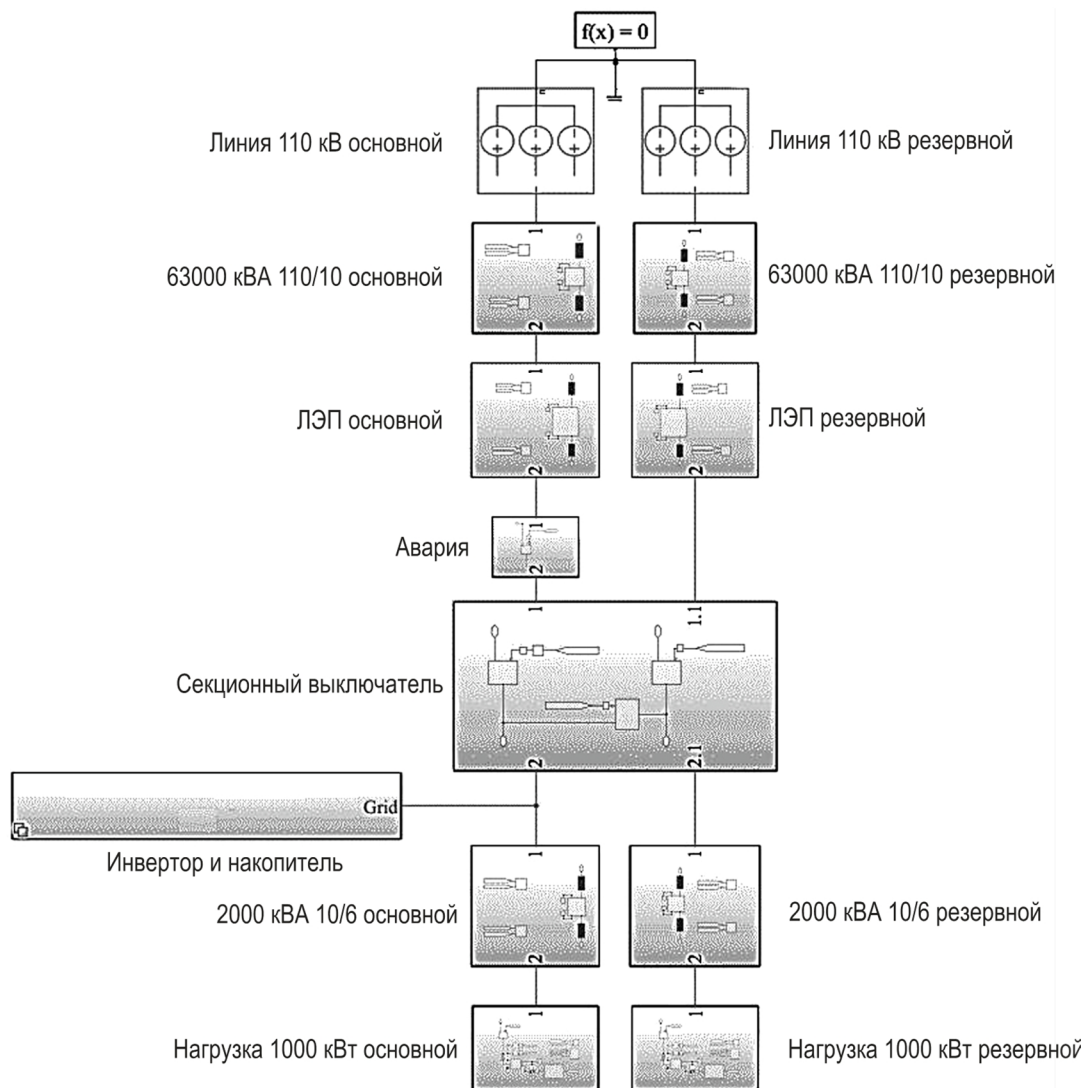


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели

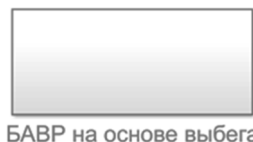


Рис. 2. Подсистемы выбора опыта исследуемой системы

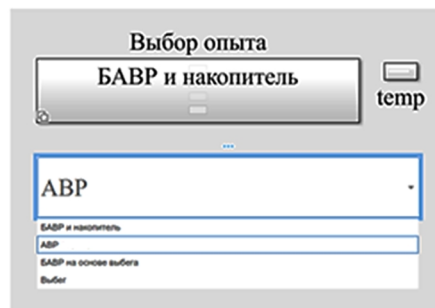
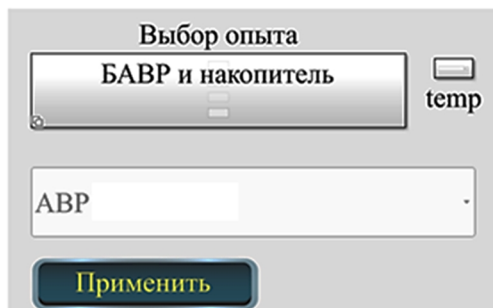


Рис. 3. Графический интерфейс пользователя

```

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20

if mode == 0%ABP
    flag_invertor =0;
    t_sim = 8;
    Ts = 5e-5;
end
if mode == 1%Выбег
    flag_invertor =0;
    t_sim = 8;
    Ts = 5e-5;
end
if mode == 2%БАРП на основе выбега
    flag_invertor =0;
    t_sim = 8;
    Ts = 5e-5;
end
if mode == 3 %БАРП и накопитель
    t_sim = 8;
    Ts = 5e-5;
    flag_invertor =1;
end

```

Рис. 4. Программный код, определяющий работу кнопки «Применить»

Для управления конфигурацией модели и ее параметрами разработан специализированный графический интерфейс, аналог которого показан на рис. 3. Его использование позволяет избежать ручного редактирования модели, исключая человеческий фактор. Код, связанный, например, с кнопкой «Применить» (рис. 4), автоматически устанавливает такие параметры, как *flag_invertor* (включение/выключение инвертора и накопителя), время моделирования *t_sim* и период дискретизации *T_s*, который оптимизирован для работы ШИМ-

контроллера. Алгоритмы управления для каждого из опытов реализованы на основе теории конечных автоматов, что обеспечивает четкую детерминированность и легкую читаемость логики [3]. Для примера на рис. 5 приведена реализация алгоритма АВР с применением метода конечных автоматов. Параметры модели (сопротивления, индуктивности, моменты инерции и пр.) рассчитываются в отдельном файле конструкторского расчета [4], что обеспечивает их адекватность и согласованность с имитационной моделью.

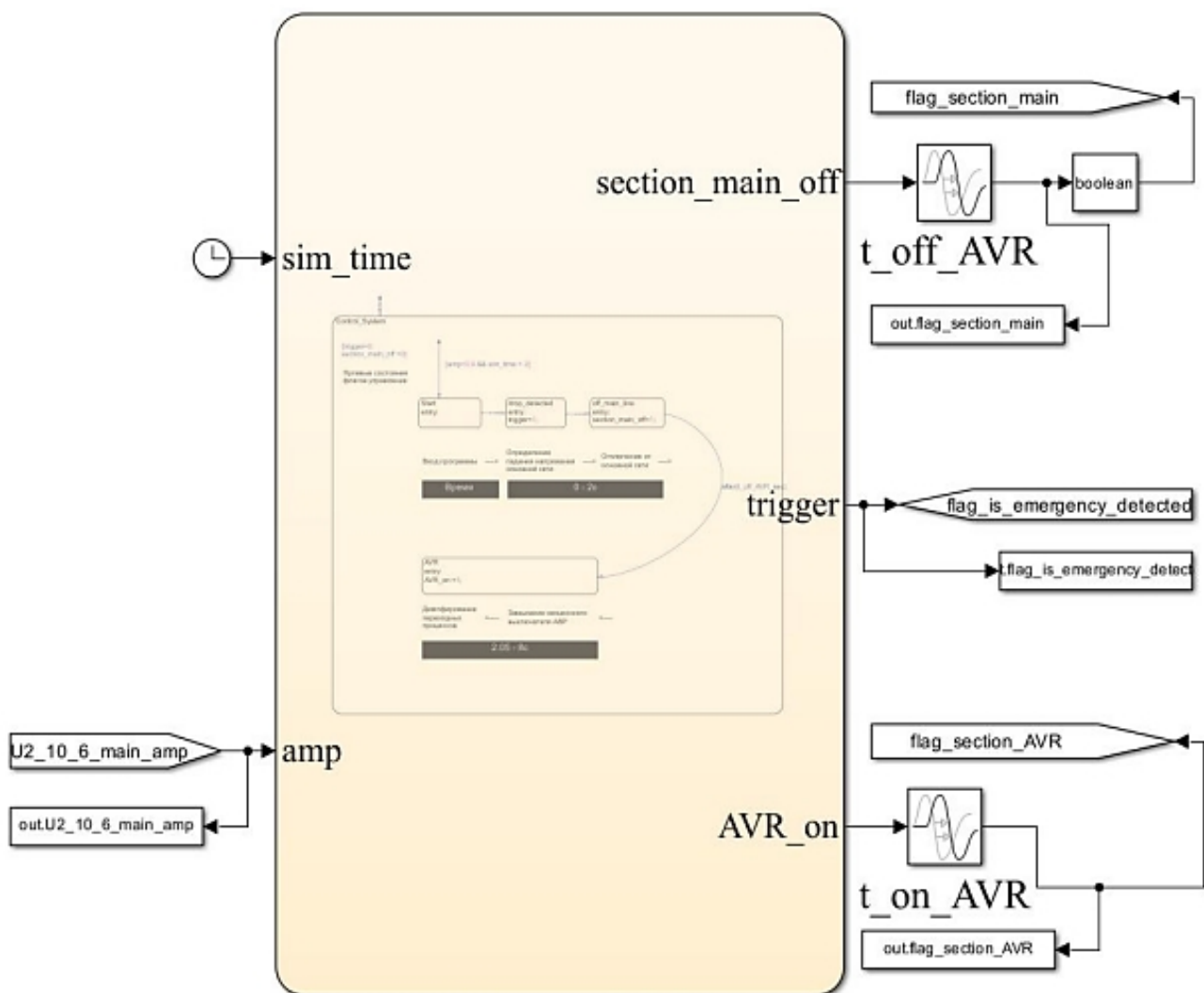


Рис. 5. Структурная схема управляющей части АВР

2. Результаты исследования

В результате работы была создана и апробирована универсальная имитационная модель электротехнического комплекса. Основным полученным результа-

том является не просто модель, а целостный подход, позволяющий в рамках одной вычислительной среды проводить комплекс взаимосвязанных исследований.

Главным практическим результатом стало значительное сокращение времени на проведение вычислительных экспериментов. Объединение различных видов исследований в одну модель устранило необходимость многократной настройки, а автоматизация через графический интерфейс свела к минимуму рутинные операции. Это позволяет проектировщику сосредоточиться на анализе результатов, а не на управлении моделированием.

Научная новизна работы подтверждается реализацией двух ключевых принципов: динамической настройки силовой топологии и алгоритмов управления по запросу пользователя и применения модульного принципа построения имитационной модели электротехнического комплекса, что позволяет гибко модифицировать комплекс без угрозы для целостности всей модели.

Все переходные процессы, полученные в ходе моделирования, автоматически группируются и передаются в единую среду анализа, что обеспечивает удобство и наглядность их сравнения для всех четырех типов опытов.

Выводы

1. Разработан и успешно реализован новый модульный подход к построению имитационных моделей электротехнических

комплексов, позволяющий интегрировать несколько различных типов исследований (АВР, БАВР, опыт выбега) в единую динамически настраиваемую структуру.

2. Внедрение графического интерфейса пользователя и автоматизация настройки параметров модели позволили оптимизировать вычислительный процесс, сократить время на проведение исследований и минимизировать влияние человеческого фактора, что повышает достоверность результатов.

3. Использование метода конечных автоматов для реализации алгоритмов управления обеспечило их надежность, детерминированность и простоту модификации.

4. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента, ускоряющего процесс проектирования и анализа систем электропитания ответственных потребителей. Предложенный подход может быть применен для моделирования широкого класса электротехнических систем.

5. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение библиотеки стандартных модулей модели, углубленная параметрическая оптимизация системы с использованием методов машинного обучения и адаптация подхода для работы в реальном времени (HIL-симуляция).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Червоненко А.П., Котин Д.А.** Моделирование тиристорных преобразователей в среде Matlab с учетом особенностей их практической реализации // Вестник Чувашского университета. 2020. № 3. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-150-165.

2. **Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р.** Моделирование электротехнических комплексов промышленных

предприятий: учеб. пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 240 с.

3. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург: КОРОНА – Век, 2008.

4. MATLAB. Документация. URL: <https://docs.exponenta.ru/matlab/index.html> (дата обращения: 01.08.2025).

Червоненко Андрей Павлович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета

Andrey P. Chervonenko – PhD (Technical Sciences), Assistant Professor, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Plants, Novosibirsk State Technical University

Попов Никита Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета

Домахин Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета

Nikita S. Popov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Plants, Novosibirsk State Technical University

Evgeny A. Domakhin – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Plants, Novosibirsk State Technical University

Статья поступила в редакцию 21.08.25, принята к опубликованию 16.09.25

УДК 621.314

ВЫБОР АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГРУППЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Н.А. Кучменко, С.В. Молот

SELECTING AN ACTIVE FILTER FOR THE POWER SUPPLY SYSTEM TO A GROUP OF VARIABLE FREQUENCY DRIVES

N.A. Kuchmenko, S.V. Molot

В статье рассмотрены проблемы качества электроэнергии в системе электроснабжения с частотно-регулируемым электроприводом. В качестве конкретного примера рассмотрена система электроснабжения, нагрузкой которой являются группа преобразователей частоты для управления вентиляторами установки охлаждения газа. С применением имитационной модели исследовано влияние электроприводов на сеть. Получены данные для выбора активного фильтра гармоник.

Ключевые слова: *система электроснабжения, активный фильтр гармоник, гармонические искажения, ток высших гармоник, моделирование*

Частотно-регулируемый электропривод находит применение на объектах промышленного назначения и в бытовой технике. Такой электропривод имеет ряд достоинств, среди которых основными являются экономия электроэнергии, плавный пуск и реверс двигателей. Однако уже на первых этапах применения частотно-регулируемого электропривода возникла проблема негативного влияния на питающую сеть. Это объясняется тем, что в большинстве случаев преобразователи частоты (ПЧ) для управления электродвигателями до 1000 В собирают по схеме с промежуточным звеном постоянного тока, которая представлена на рис. 1.

The article examines the issues of power quality in an electrical supply system with variable-frequency drives. As a specific example, the power supply system for a group of frequency converters controlling gas cooling plant fans is considered. Using a simulation model, the impact of the electric drives on the grid was investigated. The data was obtained to inform the selection of an active harmonic filter.

Keywords: *power supply system, active harmonic filter, harmonic distortion, harmonic current, simulation*

Основными элементами силовой части схемы являются диодный выпрямитель, сглаживающий фильтр и автономный инвертор напряжения на IGBT-модулях.

Трехфазный мостовой выпрямитель потребляет из сети несинусоидальные токи, в спектре которых наряду с основной гармоникой присутствуют все нечетные гармоники, кроме третьей и кратной ей.

Несинусоидальные токи, протекая по внутренним сопротивлениям источника питания, создают на них падения напряжения несинусоидальной формы [1]. В результате форма напряжения на входе ПЧ искажается.

Для снижения уровня гармоник в потребляемом из сети токе изготовители ПЧ рекомендуют устанавливать входные (сетевые) дроссели. Эти дроссели выполняют также дополнительную функцию

по уменьшению токов короткого замыкания во входной цепи ПЧ. Индуктивность выбирается такой, чтобы при рабочей частоте и номинальном рабочем токе падение напряжения на дросселе составляло 3-5 %.

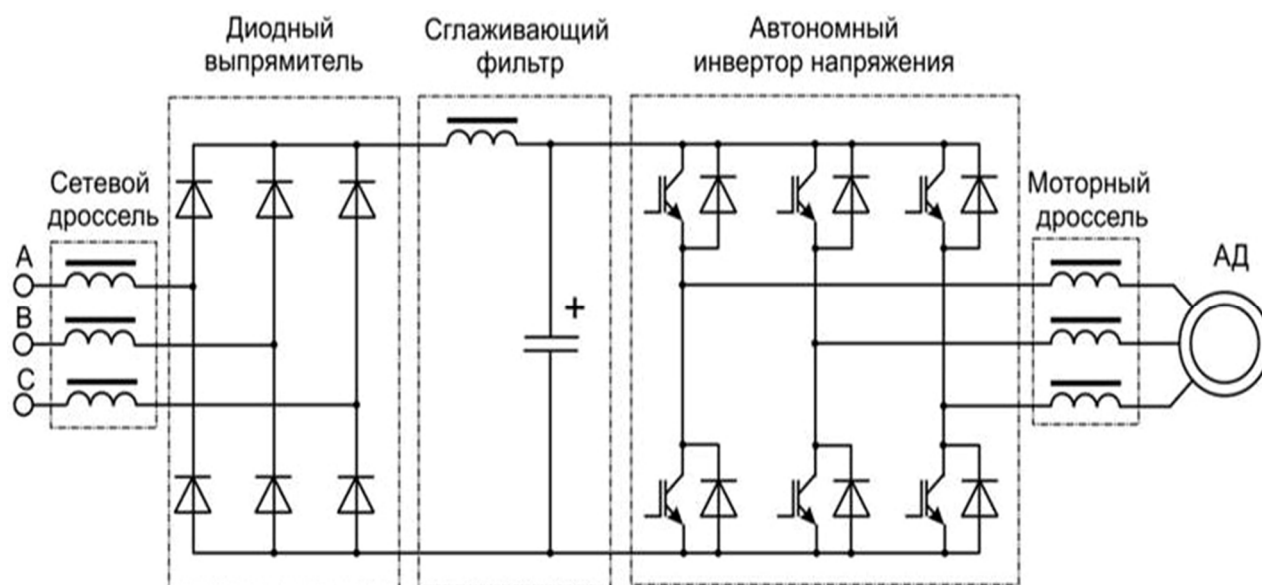


Рис. 1. Схема преобразователя частоты для управления асинхронным двигателем

На схеме ПЧ (рис. 1) показаны также выходные (моторные) дроссели, которые включают между выходом ПЧ и электродвигателем при достаточно большой длине кабеля (более 50 метров). Они обеспечивают сглаживание фронтов и уменьшение выбросов напряжения на зажимах электродвигателя. Кроме того, они защищают силовые выходные цепи преобразователя от перегрузки в случае возникновения токов короткого замыкания в электродвигателе или кабеле.

Для уменьшения стоимости и улучшения массогабаритных показателей ПЧ, многие производители ограничиваются установкой конденсаторов в сглаживающем фильтре. Дроссель предлагается как опция для конкретных применений ПЧ. Также опционально ПЧ может быть оснащен внешним тормозным прерывателем и тормозным резистором.

Частота выходного напряжения ПЧ задается системой управления инвертором. Регулирование величины напряжения осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции выходного напряжения инвертора.

Имеются объекты, на которых в технологическом процессе применяются большие группы частотно-регулируемых электроприводов. В качестве примера можно привести газокompрессорную станцию, на которой установлены аппараты воздушного охлаждения (АВО). Примерно двадцать лет назад начали активно проводиться работы по усовершенствованию АВО газа с целью повышения их энергоэффективности. Исследования показали, что из-за несовершенства конструкции и алгоритмов управления АВО газа затраты электроэнергии на их работу составляют до 50-60 % затрат на электроэнергию всей компрессорной

станции [2]. Одним из радикальных решений этой проблемы стало оснащение двигателей для привода вентиляторов преобразователями частоты [3,4]. Однако опыт применения частотного регулирования вентиляторов обозначил его негативное влияние на систему электроснабжения [5, 6].

Известны различные методы и технические решения для уменьшения негативного влияния преобразователей на систему электроснабжения [7]. Для компенсации высших гармоник могут быть применены, в частности, пассивные фильтры [8-10]. Недостаток этого решения проявляется в том случае, когда объект получает электроэнергию от автономного источника. Согласно ГОСТ 32144-2013 [11], в таких сетях допускается изменение частоты напряжения от 45 до 55 Гц, а это может привести к нарушению работы пассивного фильтра.

Современным решением проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с нелинейными электроприемниками является применение

активных фильтров гармоник (АФГ). АФГ анализирует ток основной частоты и токи высших гармоник с помощью IGBT-модулей, после чего генерирует компенсирующий ток в противоположной фазе. Установка АФГ позволяет снизить уровень искажений и улучшить форму волны тока.

Рассмотрим на конкретном примере выбор типа и параметров активного фильтра. Моделирование и расчет проведем для подстанции 10/0,4 кВ с трансформаторами мощностью 1000 кВА. Нагрузкой каждой секции шин 0,4 кВ являются 12 частотно-регулируемых электроприводов. Мощность асинхронных двигателей составляет 37 кВт.

Для проведения исследования построена имитационная модель системы электроснабжения комплекса частотно-регулируемых электроприводов (рис. 2). В этой модели электроприводы заменены эквивалентным сопротивлением и емкостью RC [12].

Результаты моделирования представлены на рис. 3-5.

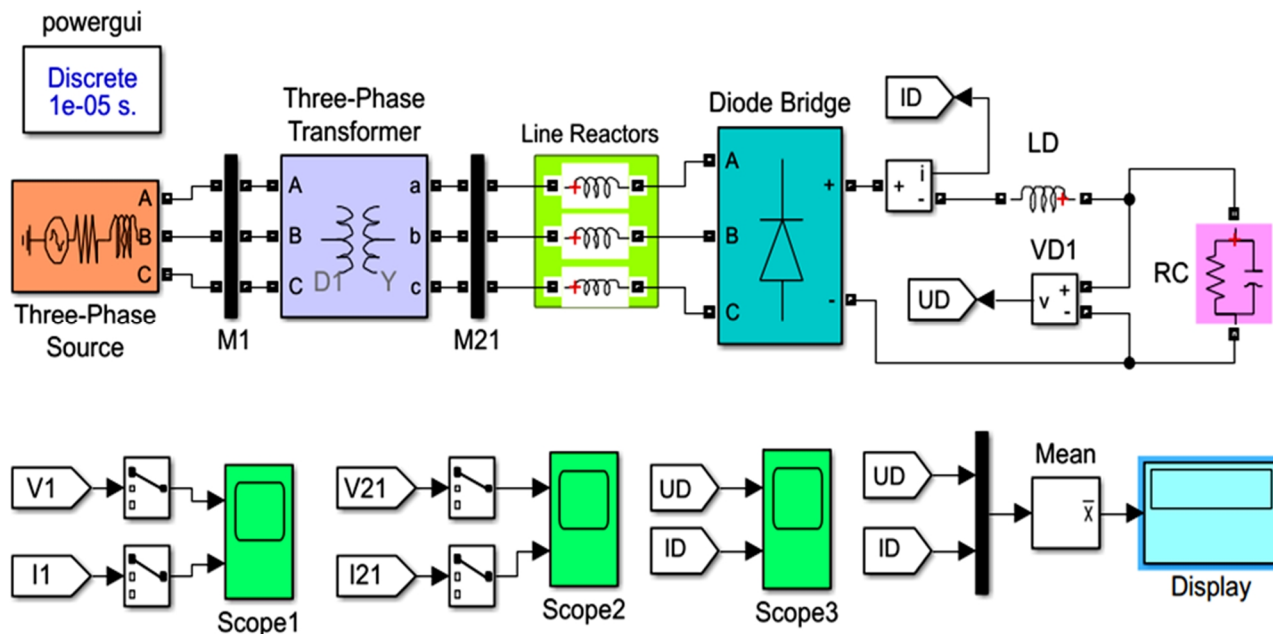


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения группы частотно-регулируемых электроприводов

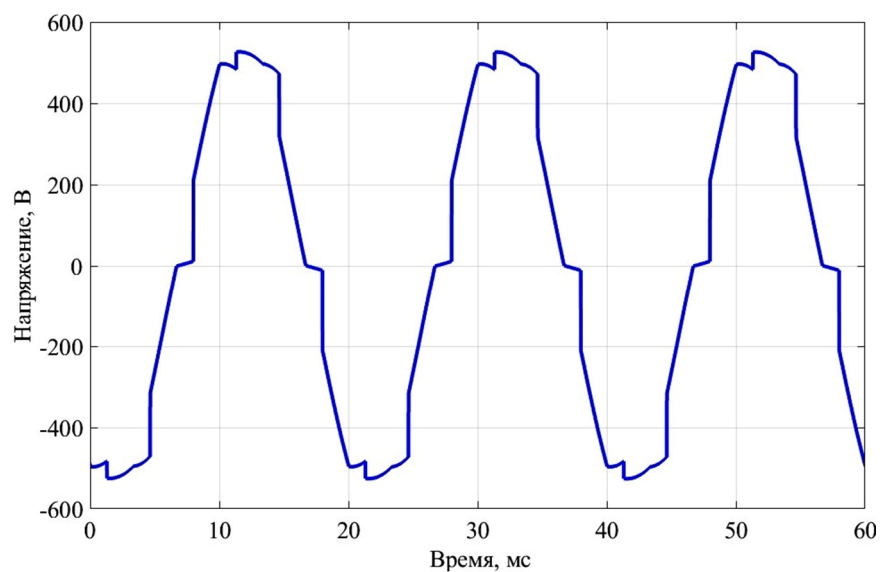


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на вторичной обмотке трансформатора

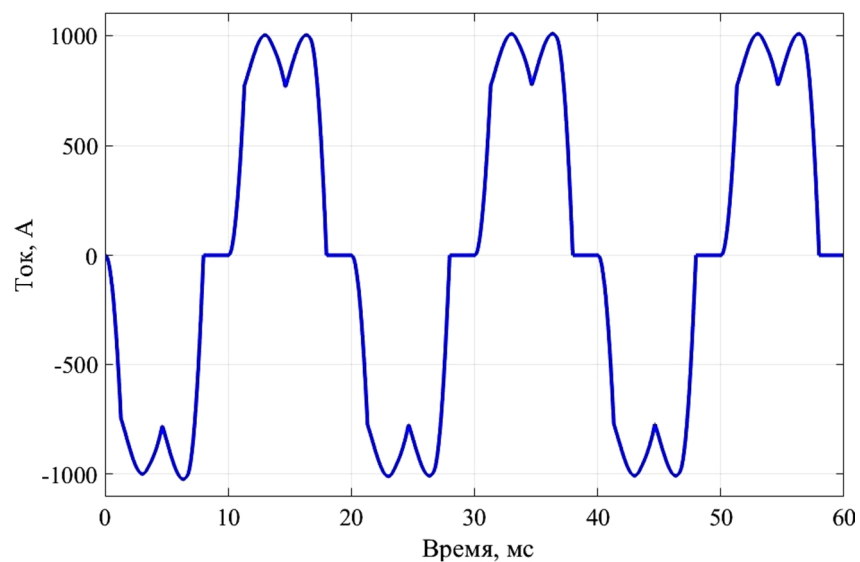


Рис. 4. Осциллограмма тока на вторичной обмотке трансформатора

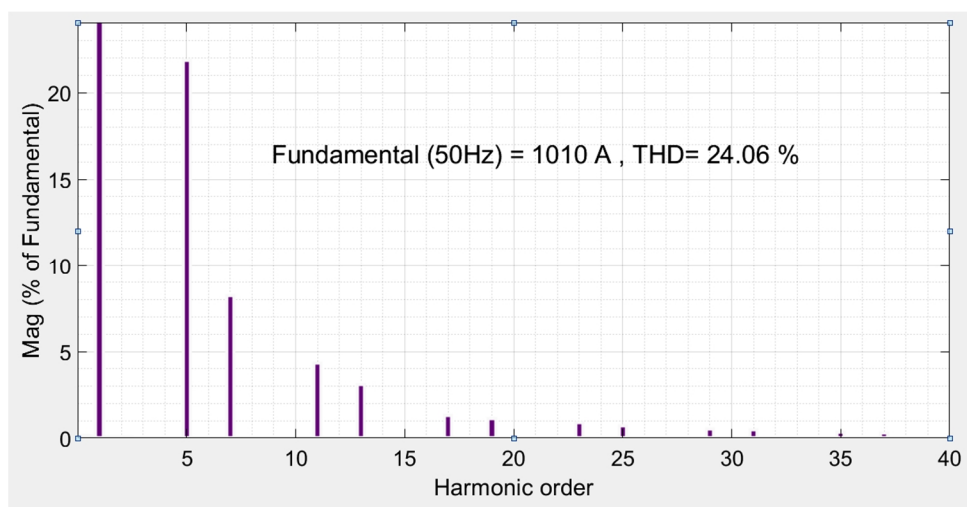


Рис. 5. Спектр тока вторичной обмотки трансформатора

Амплитудное значение 1-й гармоники тока вторичной обмотки составляет 1010 А. Суммарный коэффициент высших гармоник – 26,06 %. В результате получаем, что действующее значение тока высших гармоник составляет

$$I_{BG} = \frac{1010}{\sqrt{2}} \cdot \frac{24,06}{100} = 171,73 \text{ А.}$$

На основании полученного результата выбираем АФГ с компенсирующим током до 200 А [13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
2. **Аршакян И.И., Артюхов И.И.** Динамические режимы в системах электроснабжения установок охлаждения газа. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. 120 с.
3. **Аршакян И.И., Тримбач А.А.** Повышение эффективности работы установок охлаждения газа // Газовая промышленность. 2006. № 12. С. 52-55.
4. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, Р.Ш. Тарисов и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 3 (54). С. 25-32.
5. **Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А.** Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 2 (60). С. 165-170.
6. **Artyukhov I.I., Bochkareva I.I., Molot S.V.** Assurance of electromagnetic compatibility of group frequency controlled electro drives with power supply sources // Conference Proceedings – 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2014. С. 11-17.
7. Управление качеством электроэнергии: учеб. пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. под ред. Ю.В. Шарова, 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд. дом МЭИ, 2019. 347 с.
8. Пассивные фильтры для компенсации гармоник в линиях электропередачи высокого напряжения / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, А.Ф. Синяговский // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1 (57). С. 144-151.
9. Анализ эффективности пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для систем тягового электроснабжения / Д.А. Шандрыгин, Д.Э. Егоров, В.В. Новиков, В.П. Довгун // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2019. № 1 (42). С. 91-103.
10. Гибридные широкополосные фильтры для систем регулируемого электропривода / В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, Н.П. Боярская, Е.В. Блинов // Электричество. 2024. № 7. С. 67-80.
11. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 16 с.
12. **Артюхов И.И., Молот С.В.** Имитационная модель для анализа электромагнитной совместимости многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с питающей сетью // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 33-38.
13. Активный фильтр гармоник АФГ на 200 А. URL: <https://www.energozapad.ru/catalog/aktivnyj-filtr-garmonik-afg/aktivnyj-filtr-garmonik-afg-na-200a/> (дата обращения 08.09.25).

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

Nikita A. Kuchmenko – Postgraduate, Department of Electrical Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Молот Светлана Викторовна – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana V. Molot – Senior Lecturer, Department of Electrical Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.09.25, принята к опубликованию 16.09.25

УДК 621.314

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ СВОЕВРЕМЕННОЙ ОЧИСТКИ

Ю.Г. Щербаков, В.Д. Мишекин

INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS BY TIMELY CLEANING

Yu.G. Scherbakov, V.D. Mishekin

В статье рассмотрена проблема снижения эффективности солнечных панелей при загрязнении поверхности и увеличения ее при своевременной очистке. Для демонстрации этой проблемы проводится построение графика вольт-амперной характеристики солнечной панели с разными уровнями загрязнения. Также в статье рассмотрены основные методы очистки солнечных панелей и приведены стоимости и эффективность каждого из методов. Результатом является увеличение мощности солнечной панели.

Ключевые слова: система электропитания, солнечные панели, эффективность, загрязнение поверхности, методы очистки

Солнечные электростанции за последнее десятилетие стали ключевым компонентом мировой выработки электроэнергии. Стремительный рост установленной мощности солнечной энергетики сопровождается повышенными требованиями к их надёжности и выработке.

Загрязнение поверхности солнечных панелей – одна из важных проблем, снижающих их эффективность и срок службы. В современной литературе данное явление называют soiling. Основными загрязнителями солнечных панелей и, как следствие, причинами снижения их производительности являются пыль, соль, органика, продукты сгорания снег и т. п. Современные научные исследования показывают, что потери

The article examines the problem related with reduction of efficiency of solar panels under surface contamination and an increase of efficiency due to timely cleaning. To illustrate this problem, a graph of the volt-ampere characteristic of a solar panel with various contamination levels is constructed. The article also discusses the main methods for cleaning solar panels and provides the cost and efficiency of each method. The result is an increase in the solar panel efficiency.

Keywords: power supply system, solar panels, efficiency, surface contamination, cleaning methods

выработки из-за загрязнения существенно зависят от климата и могут достигать двузначных величин в годовом балансе [1-8]. Для поддержания эффективности требуется регулярная очистка, что влечет дополнительные расходы на воду, моющие средства и рабочую силу.

Механизм потерь прост: слой пыли уменьшает поток падающего излучения, поэтому мощность солнечной панели снижается почти пропорционально степени загрязнения. Системный эффект запыления выражается в снижении тока короткого замыкания (I_{sc}) и максимальной мощности (P_{max}).

Потери зависят от климата и условий эксплуатации.

- В сухих и пыльных районах (например, в пустынях) загрязнение может снижать выработку на 10-25 % и более.

- В умеренных зонах с частыми дождями снижение обычно меньше – 2-5 %, так как дожди частично смывают грязь.

Неравномерное загрязнение может вызывать локальные «горячие точки»: часть панели нагревается сильнее, что ускоряет деградацию элементов.

Современные исследования фиксируют значительное различие темпов накопления загрязнений: от 0,02-0,1 %/сутки в умеренных широтах до 0,2-0,6 %/сутки в пустынных зонах.

Наглядно загрязнение панели продемонстрировано на рис. 1.

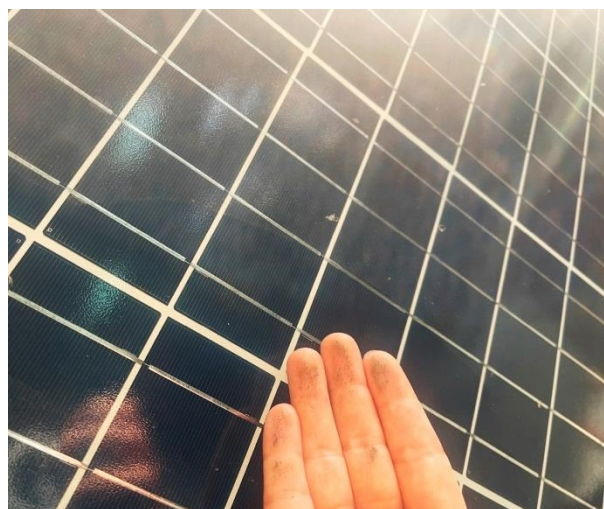


Рис. 1. Накопление пыли на поверхности солнечных панелей [9]

Таблица 1 – Климаты, характер загрязнений и рекомендации по обслуживанию

Климатический район	Доминирующие загрязнители	Скорость загрязнения, %/сутки	Потеря энергии/год (без очистки)	Рекомендуемая периодичность обслуживания
Пустынные	минеральная пыль, песок, соль	0,2-0,6	10-30 %	1-2 недели
Средиземноморские / субтропики	пыль + соляной аэрозоль	0,1-0,3	5-15 %	2-4 недели
Умеренные континентальные	пыль, органика, листва	0,02-0,1	1-5 %	1-3 месяца
Влажные тропики	биообрастание, сажа	0,05-0,2	3-10 %	2-6 недель
Прибрежные / промышленные	соль, SO _x /NO _x , сажа	0,1-0,4	5-20 %	2-4 недели

Наглядный пример того, как загрязнение поверхности влияет на мощность солнечной панели, можно увидеть на вольт-амперной характеристике (ВАХ) солнечной панели – это зависимость выходного тока (I) от выходного напряжения (V) при постоянном уровне освещённости и температуре. Она описывает, как панель ведёт себя при разных нагрузках, и позволяет понять, какую мощность можно получить.

Пример воздействия загрязнения на мощность солнечной панели отобразим на панели LONGi LR5-54HPH-410M [9]. Для наглядности ниже для данной панели отобразим на вольт-амперной характеристике (рис. 2) четыре значения загрязнения

с указанием точек максимальной мощности на графике. Также для наглядности потерь мощности отобразим мощность на рис. 2.

Решением проблемы загрязнения является обычная очистка. Выбор метода зависит от климата, доступности воды, масштаба станции, трудовых ресурсов и требований по безопасности.

Ручная мойка (рис. 4) остаётся базовым методом для малых и средних объектов. Ручная мойка солнечных панелей – это способ очистки солнечных панелей от пыли, грязи, листьев и других загрязнений с помощью воды, мягких щёток или губок. Она применяется для поддержания высокой эффективности солнечных электростанций.

Эффективность очистки панели достигает 80-90 % после сильного загрязнения, однако метод требует воды и квалифицированного доступа [10]. Преимущества ручной

мойки: доступный и безопасный способ ухода; не требует дорогого оборудования; позволяет визуально проверить состояние панелей и заметить повреждения.

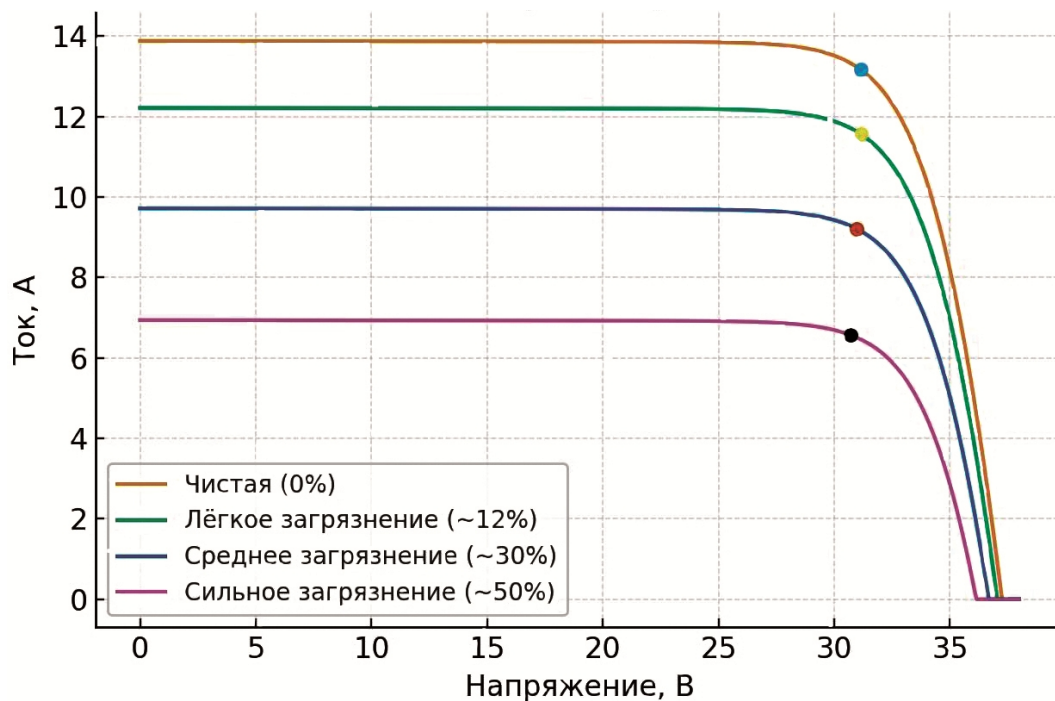


Рис. 2. ВАХ панели при разных уровнях загрязнения поверхности

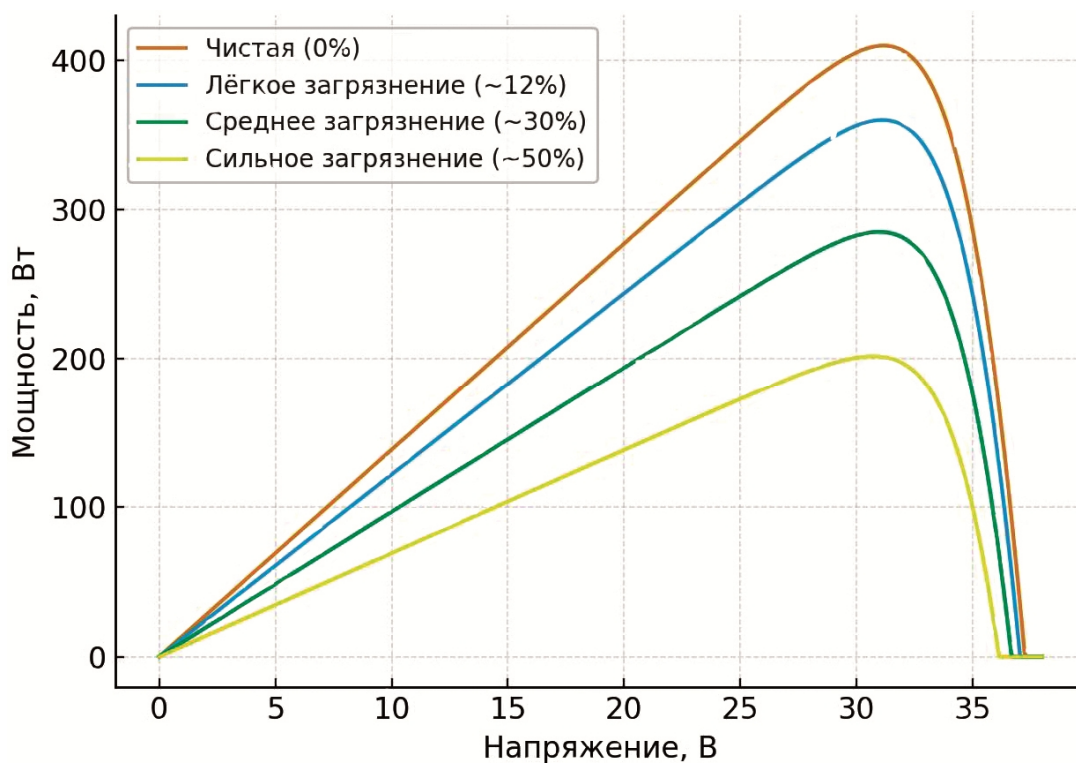


Рис. 3. P-V характеристики панели при загрязнении



Рис. 4. Ручной метод очистки

Очистка солнечных панелей роботами (рис. 5) – это один из современных способов поддержания их эффективности за счёт автоматизированного удаления пыли, грязи, песка и других загрязнений с поверхности модулей.

Роботы могут быть:

- автономные – двигаются по рядам панелей самостоятельно, часто с использованием искусственного интеллекта или датчиков для навигации;
- стационарные – монтируются на рядах панелей и запускаются по расписанию;
- портативные – управляются человеком или по команде через приложение.

Преимущества мойки роботом: сокращаются расходы на ручную уборку; работают ночью или в часы низкой генерации, не снижая продуктивность станции; могут работать в труднодоступных или опасных для человека местах.



Рис. 5. Метод очистки с помощью робота

Электростатические методы очистки солнечных панелей (рис. 6) – это технологии, использующие электрические поля для удаления пыли и других загрязнений с поверхности фотоэлектрических модулей без применения воды или механического контакта. По данным исследований, эффективность очистки достигает 95-98 % и снижение потерь – до ~2-5 %. Они считаются перспективным решением для поддержания высокой эффективности солнечных электростанций, особенно в регионах с ограниченными водными ресурсами и высокой запылённостью [6, 11-14].

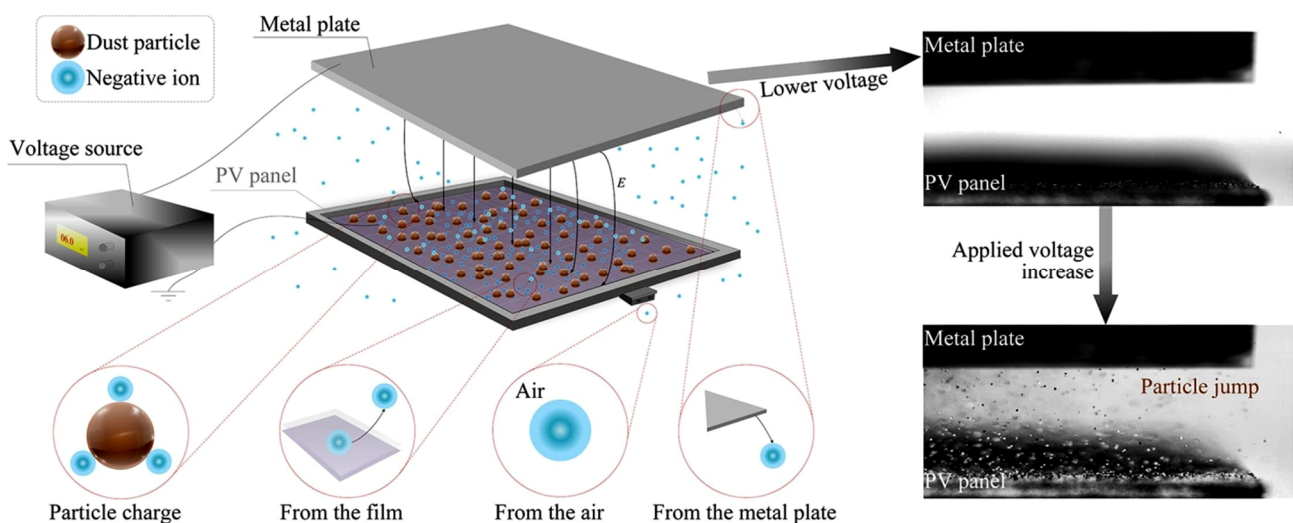


Рис. 6. Электростатический метод очистки [14]

Принцип работы следующий:

- на поверхность панели или на прозрачный электрод, расположенный над ней, подаётся переменное или импульсное электрическое напряжение;

- электрическое поле заряжает частицы пыли или создаёт силу, заставляющую их отрываться от поверхности;

- загрязнения перемещаются в сторону электрода с противоположным зарядом или просто сдуваются под действием электростатических сил и гравитации.

Электростатический метод обладает следующими преимуществами: безводная очистка – особенно актуально в засушливых районах; отсутствие механического контакта – не повреждает стеклянную поверхность панели и антибликовые покрытия; автоматизация – такие системы можно интегрировать с датчиками и запускать по расписанию или при снижении производительности панели.

Наноструктурированные гидрофобные покрытия для солнечных панелей – это тонкие слои, созданные на основе нанотехнологий, которые придают поверхности панели особые свойства отталкивать воду и загрязнения. Их цель – снизить потери выработки электроэнергии из-за пыли, грязи и влаги,

а также уменьшить необходимость частой очистки панелей. Современные исследования показывают долговечность и оптическую совместимость покрытий [5-7, 15-17].

Принцип работы следующий:

- Гидрофобное покрытие формирует на поверхности панели наноструктуры (например, микроконусы), которые увеличивают угол смачивания воды (часто $>150^\circ$, так называемая сверхгидрофобность).

- Вода, попадая на такую поверхность, скатывается в виде капель, унося с собой пыль и частицы грязи – эффект «лотоса».

- Некоторые покрытия обладают также олеофобными свойствами, препятствуя прилипанию органических загрязнений.

Преимущества: снижение потерь эффективности – панели дольше остаются чистыми, обеспечивая более стабильную выработку; защита от влаги и коррозии – продлевает срок службы оборудования; меньше затрат на обслуживание – сокращается частота очистки.

Основные способы очистки панелей сведены в табл. 2. Также в данной таблице отображена информация по стоимости каждого из способов.

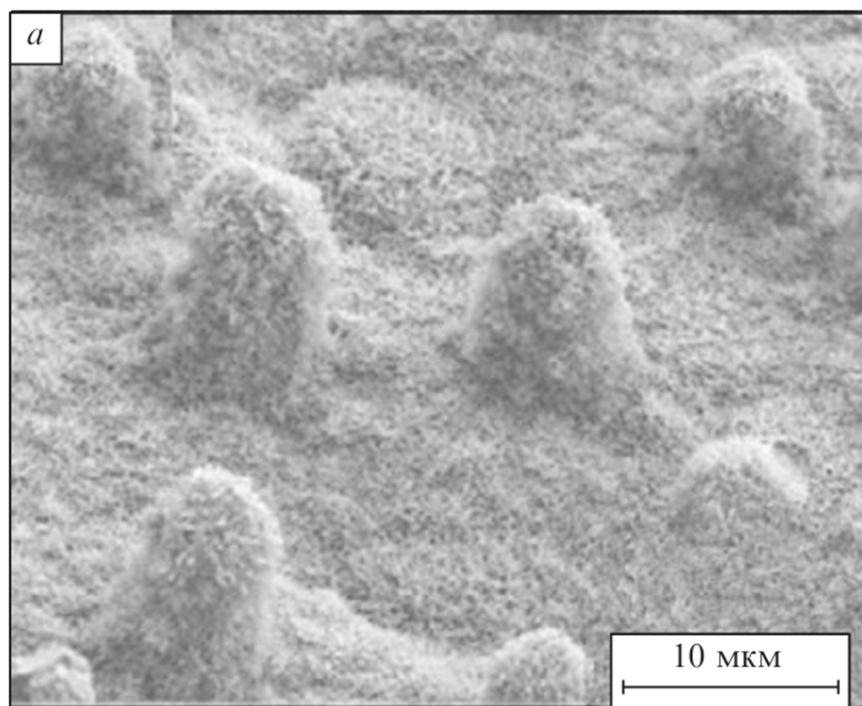


Рис. 6. Текстура гидрофобного покрытия при увеличении 10 мкм [19]

Таблица 2 – Эффективность современных методов очистк

Метод	Краткое описание	Эффективность метода очистки	Стоимость очистки/устройства
Ручная мойка водой	Очистка водой с помощью чистящих средств	~85 %	1 055 Р за м ²
Робот	Самоходный модуль с аккумулятором и щётчным валом	~90 %	219 387 Р – 232 044 Р за робот
Электростатическая очистка (СЭО)	Система прозрачных электродов, создающих электрическое поле для удаления пыли	95-98 %	2531 Р за м ²
Нанопокрытие самоочищающееся (гидрофобное / супергидрофобное)	Прозрачная плёнка/гель, снижающие смачивание и адгезию пыли. Возможен антиобледенительный и антибликовый эффект	до ~70 % и снижение частоты мойки	Материал: ~330 Р за м ² ; нанесение: ~1000 Р за м ²

Загрязнение поверхности модулей – один из наиболее существенных и при этом управляемых источников потерь выработки солнечных панелей. Оно проявляется падением тока короткого замыкания панели и смещением точки максимальной мощности, что подтверждается графиками, приведенными в статье. В климатах с высоким запы-

лением (пустынные, прибрежные) годовые потери без обслуживания достигают 10-30 %, тогда как в умеренных зонах – обычно 1-5 %. Экономически оптимальная стратегия включает комбинацию методов. Выбор метода должен учитывать стоимость цикла жизни на м², доступ к поверхности и требуемую частоту обслуживания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. IEA PVPS. Soiling Losses – Impact on the Performance of PV Plants [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/01/IEA-PVPS-T13-21-2022-REPORT-Soiling-Losses-PV-Plants.pdf> (дата обращения: 13.09.2023).
2. Impact of soiling on Si and CdTe PV modules under varying conditions / S.S. Costa, L. Micheli, M.G. Deceglie et al. // NREL/CP-5K00-79253. 2021.
3. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives / J.G. Bessa, E.A. Pereira, F.G. Guimarães et al. // iScience. 2021. Vol. 24. Art. 102165.
4. Soiling loss in solar systems: a review of its effect on solar energy efficiency and mitigation techniques / M.L. Adekanbi, A.H. Elsheikh, S. Al-Dahidi et al. // Cleaner Energy Systems. 2023. Vol. 7. Art. 100055.
5. **Borah P., Misra L., Saha N.** Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches // Sustainability. 2023. Vol. 15. № 24. Art. 16669.
6. Empowering Photovoltaic Panel Anti-Icing: Superhydrophobic Organic Composite Coating with In Situ Photothermal and Transparency / W. Tong, Y. Zhao, J. Wang et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. 2024.
7. Effects of soiling on solar technologies: review / M.D. Islam, M.N. Khan, M.I. Hossain et al. // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2024. Vol. 60. Art. 103516.
8. Performance analysis of solar PV: a review / M. Mashuk, A. Siddiky, M. Thohid et al. // Cleaner Energy Systems. 2025. Vol. 7. Art. 100097.
9. **Najmi N., Rachid A.A.** A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques // Energies. 2023. Vol. 16. № 24. Art. 7960.
10. Солнечные панели LONGi. URL: <https://www.longi.com/en/products/> (дата обращения: 14.09.2023).
11. Multifunctional coating for PV with anti-icing effect / J. Hong, S. Park, H. Kim

et al. // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 463. Art. 132255.

12. Electrostatic cleaning effect on PV performance in Jordan / A.S. Al-Salaymeh, N.N. Al-Mansi, I.M. Muslih et al. // Cleaner Engineering and Technology. 2023. Vol. 13. Art. 100606.

13. Enhanced electrostatic dust removal from solar panels / F.J. Dickhardt, J.W. Gerlach, F. Frost et al. // Small. 2025. Vol. 21. Art. 2408645.

14. Evaluation of self-cleaning mechanisms for improving performance of roof-mounted solar PV panels: a comparative study / D. Hameed, Y. Tadesse, A. Tesfaye et al. // PLOS ONE. 2024. Vol. 19. № 10.

15. A new electrostatic dust removal method using carbon nanotubes transparent conductive film for sustainable operation of solar photovoltaic panels/ Y. Liu, H. Li, L. Li et al // Energy Conversion and Management. 2024. Vol. 300. Art. 117923.

16. Experimental investigation of a nano coating efficiency for dust mitigation on photovoltaic panels in harsh climatic conditions / A. Ahmed, S. Ali, M. Shaban et al. // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 23013.

17. High-performance multi-functional solar panel coatings: recent advances, challenges, strategies and industrial aspects / A.K. Padhan, V. Singh, S. Ray et al. // RSC Applied Polymers. 2025. Vol. 3. P. 317-335.

18. Optimizing Photovoltaic Soiling Loss Predictions in Louisiana: A Comparative Study of Measured and Modeled Data Using a Novel Approach / D.J.V. Kumar, A. Kenneth, J.R. Raush et al. // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2025. Vol. 33. № 1. P. 120-132.

19. **Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М.** Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. 2008. Т. 77/ № 7. С. 619-638.

Щербаков Юрий Геннадьевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мишекин Виталий Дмитриевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri G. Scherbakov – Postgraduate, Department of Electrical Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vitaliy D. Mishekin – Postgraduate, Department of Electrical Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.08.25, принята к опубликованию 16.09.25

УДК 621.314

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ НА РЕЖИМ РАБОТЫ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

И.И. Артюхов, М.Д. Николаев

INFLUENCE OF THE SUPPLY NETWORK VOLTAGE FREQUENCY ON THE OPERATION MODE OF A MAGNETRON GENERATOR

I.I. Artyukhov, M.D. Nikolaev

Сегодня СВЧ-установки имеют широкий диапазон применения как для нагрева продуктов питания в бытовых условиях, так и при реализации промышленных технологических процессов различного назначения. Генератором СВЧ-колебаний является магнетрон преимущественно пакетированного типа, режим работы которого зависит от параметров качества питающей сети. В данной работе приводятся результаты исследования о влиянии колебаний частоты питающей сети на режим работы СВЧ-установок различного назначения.

Ключевые слова: магнетронный генератор, СВЧ-установка, система электропитания, девиация частоты

Качество электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения общего назначения характеризуется рядом показателей. В Российской Федерации и ряде других стран эти показатели нормируются ГОСТ 32144-2013 [1]. В соответствии с этим документом отклонение частоты от номинального значения 50 Гц в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю. При этом для изолированных систем электроснабжения с автономными генераторами, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, отклонение частоты не должно превышать ± 1 Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100 %

Today, microwave installations have a wide range of applications, from heating food in domestic conditions to the implementation of various industrial technological processes. The generator of microwave oscillations is a magnetron, predominantly of the packaged type, where the operating mode depends on the quality parameters of the power supply network. This paper presents the results of research into the influence of power supply frequency fluctuations on the operating mode of microwave installations used universally.

Keywords: magnetron generator, microwave installation, power supply system, frequency deviation

времени интервала в одну неделю. Таким образом, ГОСТ 32144-2013 допускает, что частота напряжения в автономной системе электроснабжения может находиться, хотя и непродолжительное время, в пределах от 45 до 55 Гц.

Согласно Европейскому стандарту EN 50160-2010, в изолированных системах электроснабжения отклонение частоты от номинального значения 50 Гц может быть в пределах ± 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ± 15 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Таким образом, допустимый диапазон изменения частоты питающего напряжения находится в пределах от 42,5 до 57,5 Гц. Фактические изменения частоты в ряде случаев выходят за указанные пределы [2].

Известно большое количество публикаций, которые содержат результаты исследований о влиянии частоты питающей сети на различные виды электрооборудования. В основном объектами исследования являются трансформаторы и электрические машины, например [3-6]. Результаты исследований о влиянии частоты питающей сети на функционирование СВЧ-установок практически отсутствуют. В опубликованных ранее работах по тематике СВЧ-установок с пакетированными магнетронами предполагалось, что частота питающего напряжения является стабильной величиной [7, 8]. Факт возможного изменения частоты не рассматривался.

В последнее время получают развитие мобильные СВЧ-установки. Они применяются при строительстве автомобильных дорог высокого качества, для размораживания и таяния льда на дорожных покрытиях аэропортов [9, 10]. Под воздействием СВЧ-излучения дорожное покрытие нагревается, что приводит к легкому удалению слоя льда [11]. Технология микроволнового нагрева и оттаивания имеет экологические и энергосберегающие преимущества, преодолевает недостатки механического оттаивания, которое зависит от значительного количества человеческих и материальных ресурсов и имеет значительно более высокую эффективность, чем механический метод.

Заслуживает внимания идея о сезонной эксплуатации мобильных СВЧ-установок агропромышленного назначения непосредственно в местах сбора урожая. Реализация этой идеи позволяет снизить потери урожая при его хранении и транспортировке [12].

Перспективным направлением является использование электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона в медицине. В частности, актуальной задачей является разработка устройств для сверхбыстрой деконтаминации патогенной микрофлоры при стерилизации медицинских инструментов в полевых и походных условиях [13]. Известные в настоящее время методы стерилизации инструментов основаны на термическом воздействии, поэтому процесс их реализации занимает длительное время. Суще-

ствующее оборудование имеет большие габариты и вес. Технологии с применением СВЧ-колебаний позволяют создать компактные стерилизаторы, удобные при транспортировке, соответствующие требованиям высокой мобильности [14].

Для электроснабжения мобильных СВЧ-установок могут быть использованы автономные источники энергии, например дизельные или бензиновые генераторы. Качество выходного напряжения таких источников энергии зачастую не соответствует нормативным документам. Кроме того, улучшение эксплуатационных характеристик дизельных и бензиновых генераторов может производиться изменением частоты их выходного напряжения в соответствии с нагрузкой [15-17]. Поэтому проведение исследования о влиянии частоты питающего напряжения на режим работы СВЧ-установок на пакетированных магнетронах является актуальной задачей. Полученная информация необходима при выборе схемных решений и проведении расчетов параметров элементов источников питания СВЧ-установок, которые предназначены для стабильной работы в широком диапазоне условий эксплуатации.

На рис. 1 показана схема электропитания магнетронного генератора (МГ), в которой напряжение между анодом и катодом магнетрона VL формируется высоковольтным диодным выпрямителем D1-D4. Вход выпрямителя подключен к вторичной обмотке анодного трансформатора ТА. Накал катода осуществляется трансформатором ТН, который подключен к питающей сети через регулятор напряжения РН.

Рис. 2 представляет схему электропитания МГ с удвоителем напряжения, который содержит высоковольтные диоды D1, D2 и конденсаторы C1, C2. Удвоитель напряжения запитан от вторичной обмотки анодного трансформатора ТА. Питание накальной цепи осуществляется так же, как в схеме на рис. 1. Регуляторы напряжения выполняют функции безопасного запуска магнетронов и управления накальным напряжением при изменении режима работы МГ.

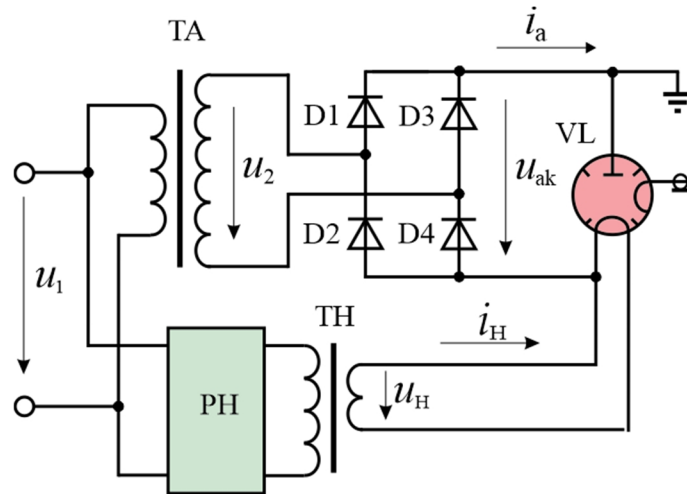


Рис. 1. Схема магнетронного генератора с двухполупериодным диодным выпрямителем

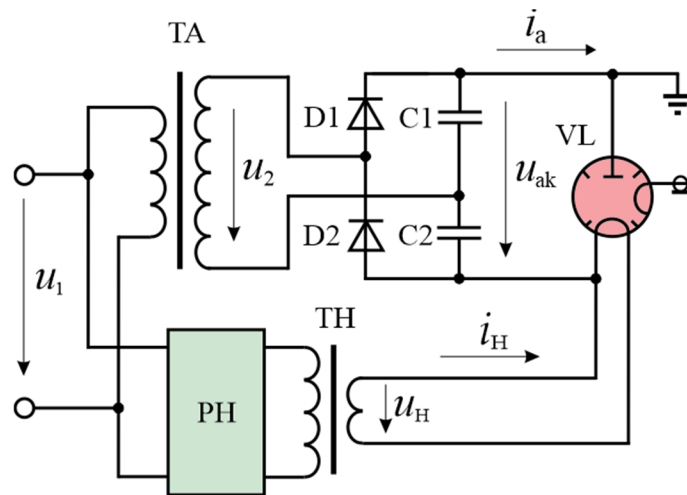


Рис. 2. Схема магнетронного генератора с удвоителем напряжения

Для получения информации о влиянии частоты напряжения в питающей сети на режим работы МГ разработана имитационная модель в среде MATLAB+Simulink [18]. Схема модели представлена на рис. 3. Система электроснабжения с базовой частотой 50 Гц представлена подсистемой *Power Source* в виде источника ЭДС (блок *AC Voltage*) и активно-индуктивного сопротивления (блок *RL Branch*). В окне настройки можно изменять частоту переменного напряжения. При проведении виртуальных экспериментов частота варьировалась в диапазоне от 45 до 55 Гц.

Индуктивность и активное сопротивление в блоке *RL Branch* составляют 5,5 мГн и 1 Ом соответственно.

Для моделирования электромагнитных процессов в цепях питания анодов ис-

пользованы блоки *Transformer* и *HV Module*. В настройках блока *Transformer* записывают значения параметров повышающего трансформатора. Блок *HV Module* имеет различные конфигурации в зависимости от схемы электропитания высоковольтных цепей. Блоки *HV Module* для схем на рис. 1 и 2 показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

Магнетрон имеет нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ). При моделировании магнетрона использован подход об идеализации его ВАХ в виде двух участков [18]. Сопряжение участков происходит в точке, соответствующей пороговому напряжению U_0 магнетрона. Режим работы МГ определяется точкой пересечения ВАХ магнетрона и внешней характеристики источника анодного питания. Если

напряжение u_{ak} между анодом и катодом меньше порогового напряжения U_0 магнетрона, то генерации колебаний не происходит. При $u_{ak} > U_0$ происходит возбуждение СВЧ-колебаний, и начинает протекать анодный ток i_a колоколообразной формы.

При $u_{ak} > U_0$ происходит возбуждение СВЧ-колебаний, и начинает протекать анодный ток i_a колоколообразной формы.

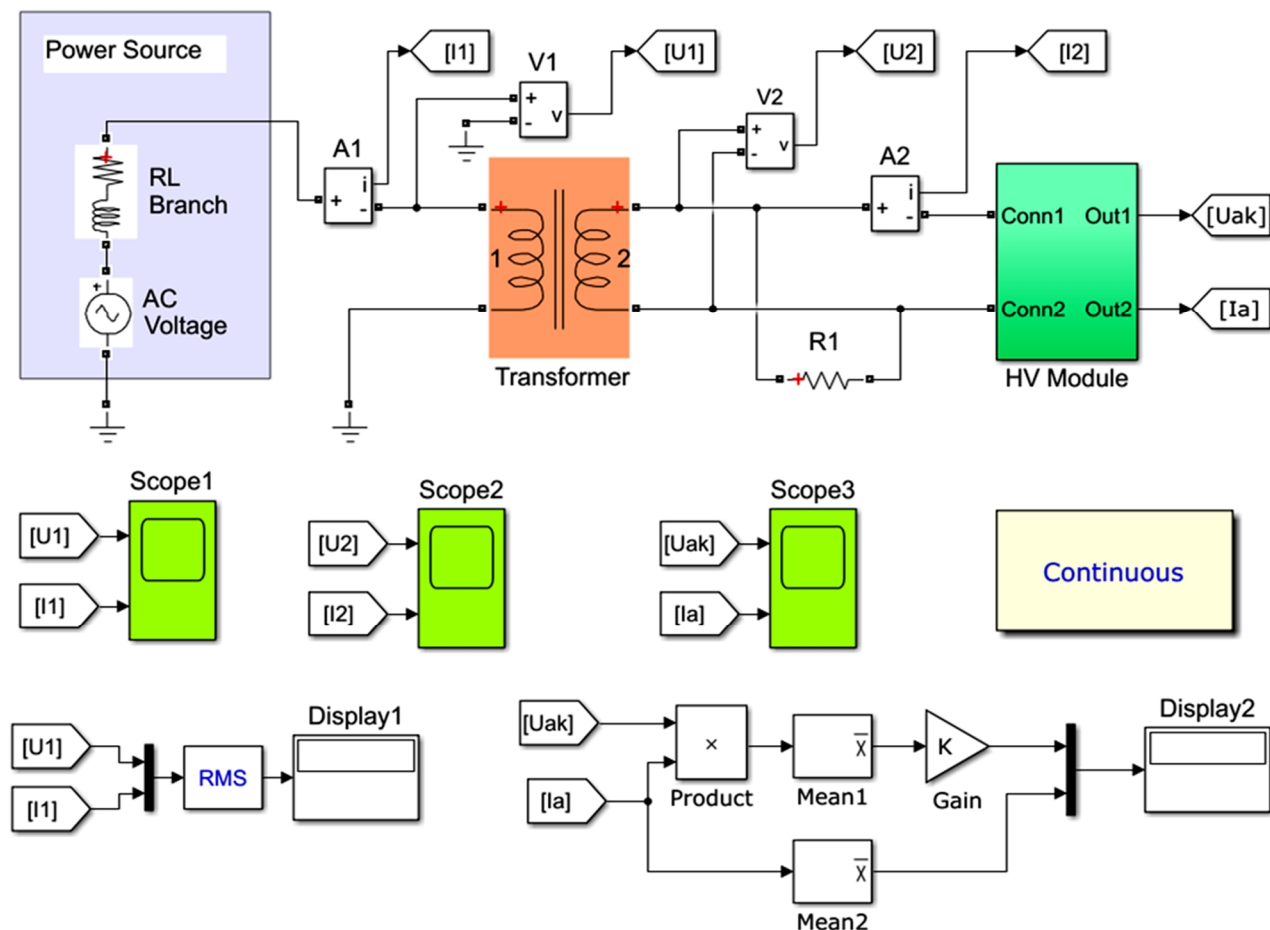


Рис. 3. Схема имитационной модели

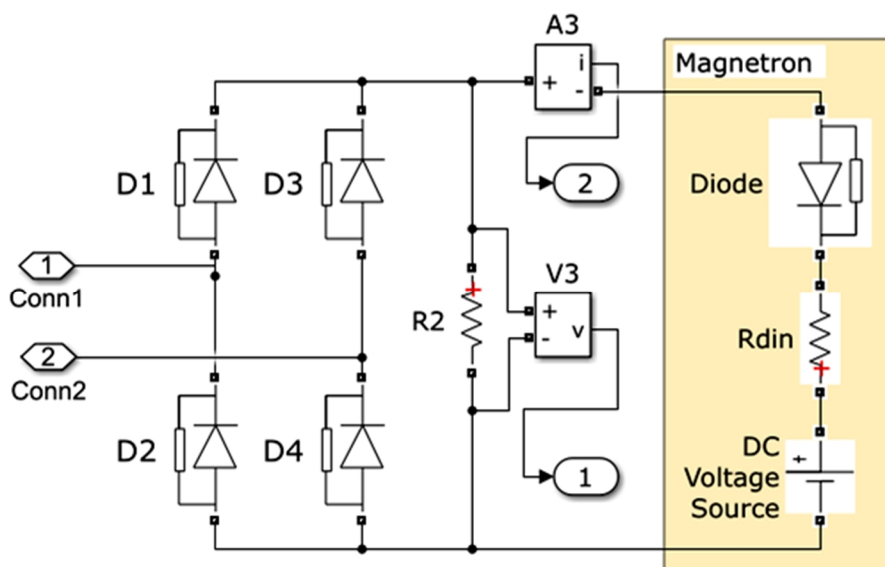


Рис. 4. Блок HV Module для схемы с мостовым диодным выпрямителем

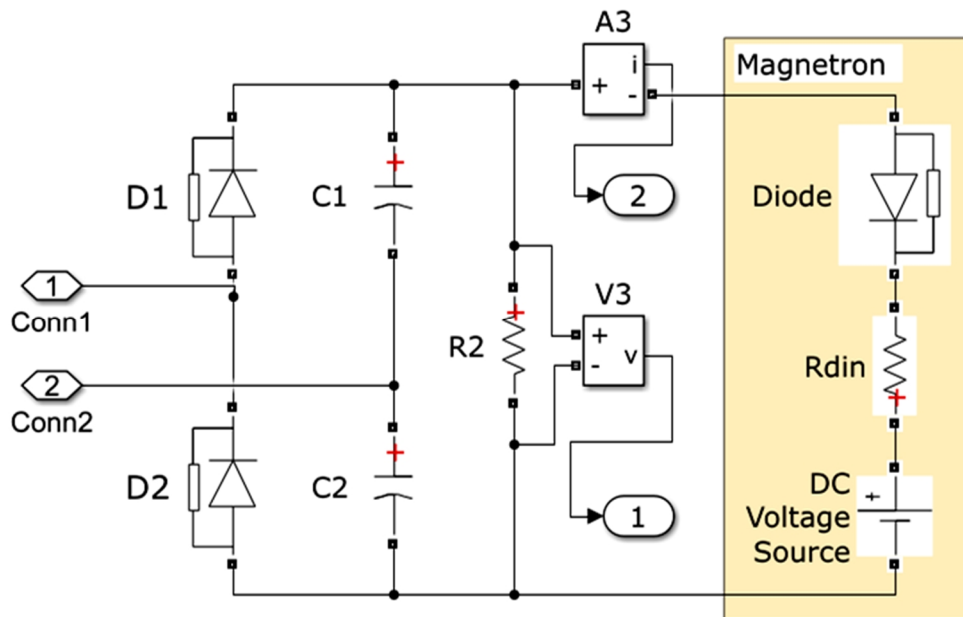


Рис. 5. Блок *HV Module* для схемы с умножителем напряжения

При проведении виртуальных экспериментов были приняты характеристики магнетрона 2M164 [19], у которого напряжение U_0 составляет 3100 В, динамическое сопротивление – 700 Ом.

Также предполагается, что трансформатор ТА имеет мощность 1600 ВА. Падение напряжения на высоковольтных диодах составляет 15 В. Емкости конденсаторов C1 и C2 в схеме с умножителем напряжения (рис. 2) приняты равными 0,7 мкФ.

Напряжение сети и потребляемый из сети ток можно наблюдать на экране виртуального осциллографа *Scope1*.

Действующие значения указанных переменных отображает блок *Display1*. Осциллограф *Scope2* показывает кривые напряжения и тока на вторичной стороне анодного трансформатора ТА. Анодный ток и напряжение магнетрона отображаются на экране виртуального осциллографа *Scope3*. Расчет выходной мощности магнетрона осуществляется по формуле

$$P_m = \eta \cdot T^{-1} \int_0^T u_{ak} i_a dt,$$

где η – КПД магнетрона, который на основании паспортных данных принят равным 0,7; T – период сетевого напряжения.

Вычисления производят блоки *Product*, *Mean1* и *Gain*. С помощью блока *Mean2* получаем информацию о среднем значении

анодного тока. Результаты вычислений отображает блок *Display2*.

На рис. 6 и 7 приведены результаты моделирования процессов в системах электропитания МГ. Здесь показаны графики зависимостей СВЧ-мощности и анодного тока магнетрона при изменении частоты напряжения в питающей сети.

Результаты моделирования показали, что схемы электропитания МГ различно реагируют на изменение частоты питающего напряжения. Это обстоятельство надо учитывать при создании систем автоматического управления режимами работы СВЧ-установок.

В схеме электропитания МГ с мостовым диодным выпрямителем (рис. 1) при увеличении частоты сетевого напряжения анодный ток и СВЧ-мощность уменьшаются. Это можно объяснить тем, что в этом случае происходит увеличение сопротивления индуктивности рассеяния, вследствие чего напряжение на вторичной обмотке анодного трансформатора уменьшается. Соответственно уменьшается амплитуда анодного тока.

В схеме электропитания МГ с умножителем напряжения (рис. 2) такой факт также имеет место быть. Однако в этой схеме количество витков вторичной обмотки анодного трансформатора меньше,

поэтому индуктивность рассеяния также меньше. При этом за счет конденсаторов С1 и С2 улучшаются фильтрующие свойства схемы. Амплитуда анодного тока увеличивается. Из графиков на рис. 7

видно, что при увеличении частоты сети от 45 до 55 Гц среднее значение анодного тока возрастает от 0,22 до 0,38 А. Выходная мощность СВЧ-генератора при этом увеличивается от 730 до 920 Вт.

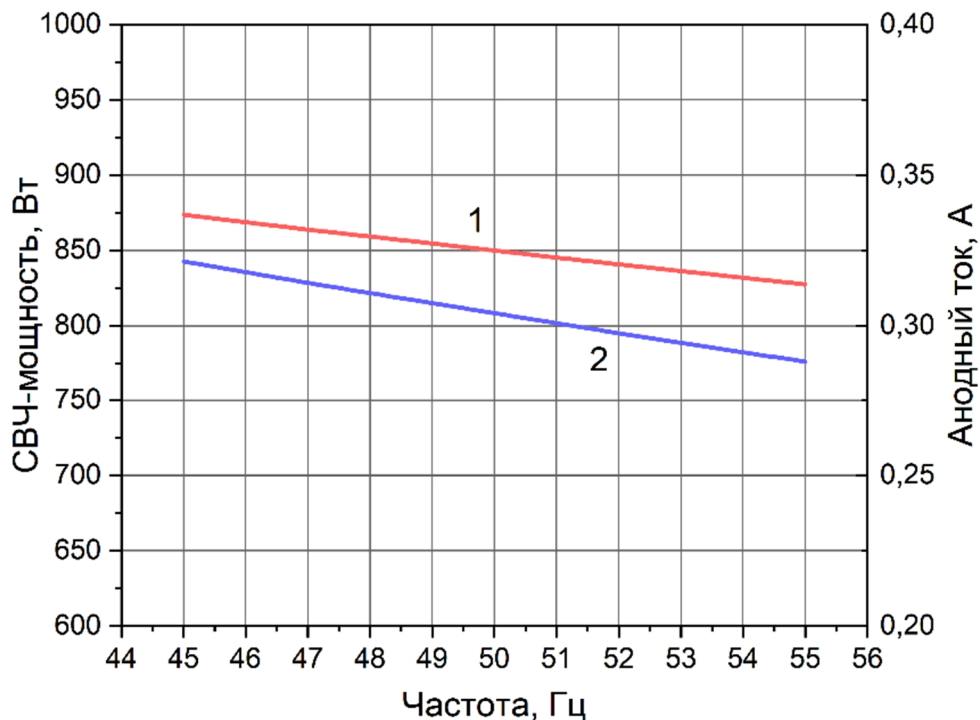


Рис. 6. Зависимости СВЧ-мощности (1) и анодного тока (2) магнетрона от частоты напряжения в питающей сети для схемы с мостовым выпрямителем

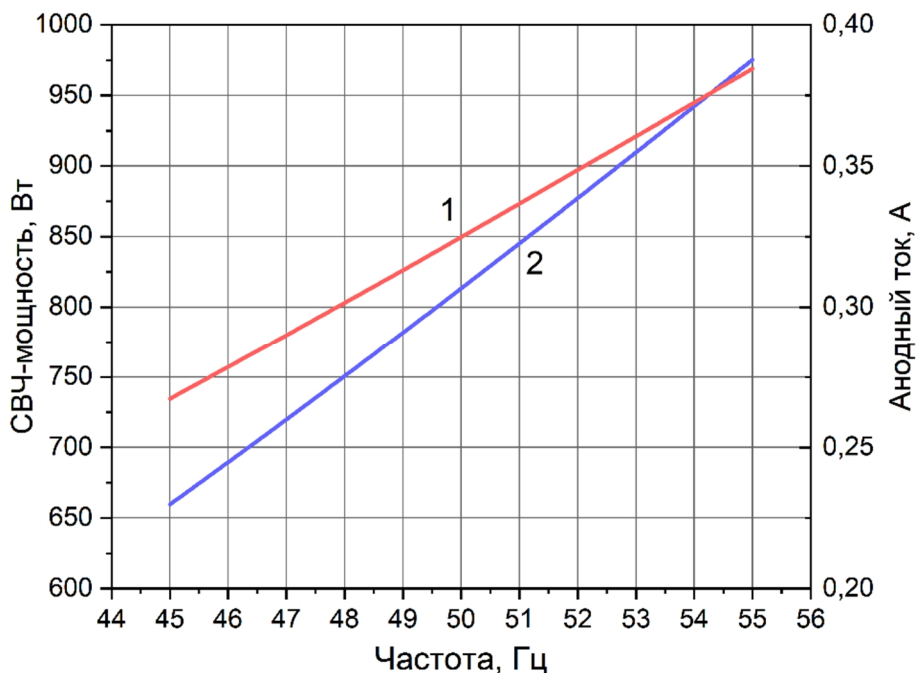


Рис. 7. Зависимости СВЧ-мощности (1) и анодного тока (2) магнетрона от частоты напряжения в питающей сети для схемы с умножителем напряжения

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. **Masetti C.** Revision of European Standard EN 50160 on power quality: Reasons and solutions // Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP 2010. Bergamo, Italy, 2010. P. 1-7, doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625472.
3. **Nömm J., Rönnberg S.K., Bollen M.H.J.** An Analysis of Frequency Variations and its Implications on Connected Equipment for a Nanogrid during Islanded Operation // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 9. № 2456.
4. Research on the Influence of Frequency Deviation on Transformer Differential Protection / X. Sun, P. Li, X. Lin, Y. Xiao // 2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST). Kunming, China, 2023. P. 345-350, doi: 10.1109/ICPST56889.2023.10165183.
5. **Jaber Q., Naman Q., Shamaseen M.** Effects of Low Frequencies on Three Phase Induction Motor Performance Operating in Close Proximity to Rated Speed // American Journal of Applied Sciences. 2007. № 4 (5). P. 284-293.
6. **Nour M., Thirugnanam P.** Investigation of Voltage and Frequency Variation on Induction Motor Core and Copper Losses // 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization. Sharjah, United Arab Emirates, 2017. P. 1-5, doi: 10.1109/ICMSAO.2017.7934894.
7. **Osepchuk J.M.** Microwave power applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50. № 3. P. 975-985.
8. **Okress E.** Microwave power engineering. Vol. 1. New York, Acad. Press, 1968.
9. Anti-freezing asphalt concrete: ice-adhesion performance / H. Chen, Y. Wu, H. Xia et al. // Journal of Materials Science. 2018. Vol. 53. P. 4781-4795.
10. A Study on the Heating and Deicing Performance of Microwave-Absorbing Asphalt Mixtures / Y. Deng, X. Wang, L. Chen et al. // Materials. 2023. Vol. 16. Iss. 3. № 1051.
11. Microwave Induction Heating of Polymer-Modified Asphalt Materials for Self-Healing and Deicing / M. Fakhri, S. Javadi, R. Sedghi et al. // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 18. № 10129.
12. **Ербаев Е.Т.** Применение возобновляемых источников энергии для электроснабжения СВЧ-установок агропромышленного назначения // Вопросы электротехнологии. 2022. № 3 (36). С. 62-66.
13. Результаты и перспективы применения сверхвысокочастотного излучения в задачах стерилизации биомедицинских объектов / В.Б. Байбурин, А.И. Тома, В.П. Мещанов и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 25-32.
14. 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.
15. **Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б.** Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 139.
16. Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, Д.А. Бочкарев и др. // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 58-64.
17. **Mobarra M., Rezkallah M., Ilincă A.** Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 2. № 592.
18. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB,

SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК Пресс; Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.

19. **Артюхов И.И., Земцов А.И., Сошинов А.Г.** О подходе к моделированию магнетронного генератора малой мощно-

сти // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 2. № 2 (66). С. 20-27.

20. TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164. URL: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf.

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.

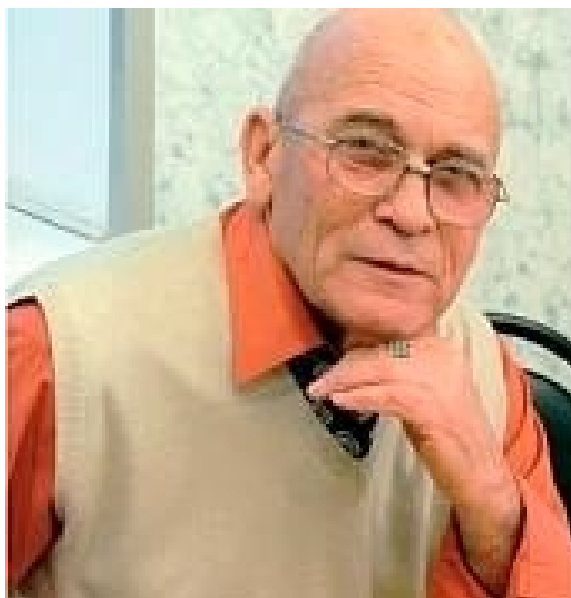
Ivan I. Artyukhov – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electrical Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 25.08.25, принята к опубликованию 16.09.25

ВИЛ БАРИЕВИЧ БАЙБУРИН

К 90-летию со дня рождения



Заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН, член-корреспондент Международной академии наук РФ и Академии инженерных наук РФ, Почетный работник высшей школы Вил Бариевич Байбурин родился 2 июля 1935 года в г. Оренбурге. В 1957 году окончил физический факультет Саратовского государственного университета. Затем работал инженером ОКБ на саратовском заводе «Тантал», далее – в Саратовском государственном университете.

В 1969 году защитил кандидатскую диссертацию, в 1984 – докторскую.

Профессиональный путь Вила Бариевича неразрывно связан с Саратовским государственным техническим университетом имени Гагарина Ю.А., где он работает с 1980 года.

В 1991 году при его непосредственном участии в вузе создана кафедра «Программное обеспечение вычислительной

техники и автоматизированных систем» (преобразована в кафедру «Информационная безопасность автоматизированных систем»), которую он возглавлял на протяжении 30 лет.

Являясь блестящим учёным и организатором научной деятельности, Вил Байбурин инициировал открытие в вузе востребованных специальностей и направлений подготовки: «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», «Информатика и вычислительная техника», «Информационная безопасность автоматизированных систем».

Вил Бариевич сформировал коллектив высококвалифицированных преподавателей, под его руководством и при непосредственном участии разрабатывались образовательные программы по указанным специальностям и направлениям подготовки, а

также программы дополнительного профессионального образования.

Неизменно Вил Бариевич уделяет внимание всестороннему развитию студентов. Они ежегодно принимают участие в конкурсах, олимпиадах, соревнованиях по профилю обучения, становятся их победителями и призерами. Его выпускники работают специалистами по защите информации и разработчиками защищенного программного обеспечения в Саратовской области, на территории других регионов России и в странах дальнего зарубежья.

Под его руководством защищены 30 кандидатских и 8 докторских диссертаций, выполнено несколько десятков дипломных работ. Более 60 раз он привлекался в качестве официального оппонента к работе ученых советов университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Волгограда и других городов.

Научная деятельность Вила Бариевича представлена сотнями работ в ведущих научных журналах, 10 монографиями, 11 учебными пособиями. Кроме того, выдающийся исследователь имеет более 20 патентов и авторских свидетельств.

В научном плане Вил Байбурун является специалистом, работающим на стыке научных областей электроники сверхвысоких частот, радиофизики, компьютерного моделирования и зондовой микроскопии атомарного разрешения. Учёный разработал нелинейную теорию взаимодействия электронных потоков с электромагнитными волнами в скрещенных полях, включая

анализ усилителей и генераторов. Создал новые технологические процессы и устройства на основе использования эффектов взаимодействия СВЧ-излучения с дискретными и непрерывными средами (медицина, электроника, промышленность, полиграфия, биология, 1990-1997). Разработал аналитико-измерительные комплексы на базе сканирующей зондовой микроскопии атомарного разрешения (с 1990 года), применение которых позволило обнаружить новые эффекты в области физики твердого тела и молекулярной биологии.

Значимый вклад Вила Бариевича Байбурина в развитие науки и подготовку высококвалифицированных специалистов и научных кадров отмечен многочисленными наградами.

Многолетним трудом Вил Бариевич навсегда вписал своё имя в летопись Саратовского государственного технического университета, и его вклад в развитие н вуза переоценить невозможно.

Являя собой пример честности, профессиональной ответственности, целеустремленности и глубокой увлеченности своим делом, Вил Байбурун оставил неизгладимый след в жизни каждого студента и коллеги!

Поздравляем юбиляра со славной датой!!! Желаем новых проектов и успехов в научной и педагогической деятельности. Пусть Ваша мудрость и опыт будут востребованы ещё долгие годы! Желаем Вам крепкого здоровья, бодрости духа, благополучия!

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 22.09.2025 Дата выхода в свет 29.09.2025

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 9,75 Уч. изд. л. 4,0

Тираж 500 экз. Заказ 31 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 2-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 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 22.09.2025 Date of publication: 29.09.2025

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 9,75 Publication base sheet 4,0

Circulation: 500 printed copies. Order 31 Subscription and individual copies: open rates

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

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: PI No. *FS77-54621* Issued by Roscomnadzor
01.07.2013

