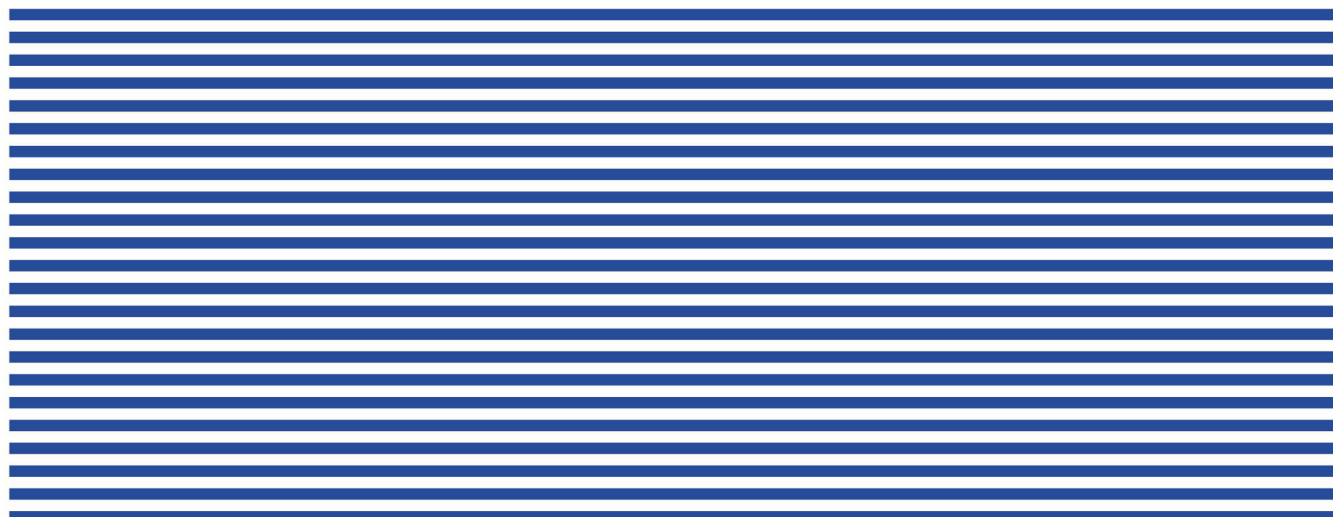




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2024

№ 2 (43)



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

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

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 2 (43)
Июнь 2024

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

Редакционная коллегия

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

Since November 2013
Published Quarterly

№ 2 (43)
June 2024

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

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

Editor-in-Chief

ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH

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

Assistant

to the Editor-in-Chief

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

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

Chief Executive Officer

MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA

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

Editorial Board Members

A.A. BAZAROV

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

V.V. VAKHNINA

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

V.G. GOLDSTEIN

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

Yu.V. GULYAEV

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

V.B. DEMIDOVICH

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

Yu.B. KAZAKOV

Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo

A.N. MAKAROV

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

G.A. MOROZOV

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

Yu.P. PERELIGIN

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

A.F. REZCHIKOV

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

I.V. RODIONOV

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

F.N. SARAPULOV

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

Yu.B. TOMASHEVSKY

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

A.A. FOMIN

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

V.N. KHMELEV

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

V.A. TSAREV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Боякова Т.А., Авдулов А.А. Проведение исследований на физической модели плавильной печи с использованием электромаг- нитных перемешивателей с поперечным и продольным магнитными потоками	5
Зоркин А.Я., Родионов И.В., Устинов П.Н. Тепловая модель и особенности формирования морфологии покрытия оксида алюминия при импульсной лазерной наплавке.....	14
Бекренев Н.В., Злобина И.В., Огурцов К.Н. Обоснование возможности ультразвукового распыления одоранта при магистральной транспортировке природного газа	24
Егоров И.С., Войко А.В., Фомин А.А. Численное моделирование процесса нагрева сварной сталь – титановой конструкции при термообработке ТВЧ.....	35

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Гармаш Ю.В., Пономарева И.И., Рассохин А.Е. Структура управляющей системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания	42
--	----

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)

Ибрагимов А.Р., Дворников С.В. Статистическая оценка результатов измерений номиналов сопротивлений металлопленочных резисторов МЛТ-0,25.....	51
---	----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Домахин Е.А., Попов Н.С., Аниброев В.И., Вильбергер М.Е. Разработка наблюдателя полного порядка для погружных асинхронных электродвигателей с адаптивным наблюдателем с эталонной моделью	61
Андреева О.А., Земцов А.И., Мигунова Л.Г. Имитационное моде- лирование системы питания электрон- ных устройств оптическим излучением	71
Чубаров К.М., Шуев В.С., Стариков А.В. Разработка вычисли- теля динамического уровня жидкости в скважине по сигналам датчиков электрических величин станции управления погружным насосом	76
Бутко В.П., Кузьмин Р.В. Анализ тепловых процессов в дуго- статорном индукторном генераторе.....	83
Дунаева Е.А., Дунаева Т.Ю. Исследование допустимых токовых нагрузок линий Балаковского энергоузла ...	89
К сведению авторов	97

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Boyakova T.A., Avdulov A.A. Research on a physical model of a melting furnace using electromagnetic mixers with transverse and longitudinal magnetic flows	5
Zorkin A.Ya., Rodionov I.V., Vavilina N.A., Ustinov P.N. A thermal model and morphological characterization of aluminum oxide coating under pulsed laser cladding	14
Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Ogurtsov K.N. A possibility of ultrasonic spraying of odorant at the trunk transit system of natural gas	24
Egorov I.S., Voiko A.V., Fomin A.A. Numerical simulation of the heating process of a welded steel – titanium structure during heat treatment of high-frequency currents.....	35

INFORMATION MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Garmash Yu.V., Ponomareva I.I., Rassokhin A.E. Structure of the internal combustion engine control cooling system.....	42
--	----

TYPES OF MEASURING METHODS AND INSTRUMENTS

Ibragimov A.R., Dvornikov S.V. Statistical evaluation of measurement results of resistance ratings of metal-film resistors MLT-0.25	51
---	----

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Domakhin E.A., Popov N.S., Anibroev V.I., Vilberger M.E. Development of a full-order observer for submersible induction electric motors with adaptive observer in the reference model.....	61
Andreeva O.A., Zemtsov A.I., Migunova L.G. Simulation of the power supply system of electronic devices with optical radiation	71
Chubarov K.M., Shuev V.S., Starikov A.V. Calculator development for the dynamic level of fluid in the well based on the signals of electrical sensors in the submersible pump control station	76
Butko V.P., Kuzmin R.V. Analysis of thermal processes in an arc-stator inductor generator	83
Dunaeva E.A., Dunaeva T.Yu. Investigation of permissible current load lines of Balakovo electrical generating system	89
Information for Authors	97

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.318

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ С ПОПЕРЕЧНЫМ И ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ

Т.А. Боякова, А.А. Авдулов

RESEARCH ON A PHYSICAL MODEL OF A MELTING FURNACE USING ELECTROMAGNETIC MIXERS WITH TRANSVERSE AND LONGITUDINAL MAGNETIC FLOWS

T.A. Boyakova, A.A. Avdulov

В статье представлены результаты физического моделирования плавильной печи при плавлении твердых алюминиевых слитков, с использованием магнитогидродинамических (МГД) перемешивателей с поперечным и продольным магнитными потоками. Технологический процесс расплавления твердых алюминиевых слитков происходит при малом уровне расплава. В ходе физического моделирования определялось время плавления слитков: без применения МГД-перемешивателей, с применением МГД-перемешивателя с поперечным магнитным потоком и с применением МГД-перемешивателя с продольным магнитным потоком. В ходе экспериментов установлено, что при плавлении слитков и малом уровне расплава целесообразно использовать МГД-перемешиватель с поперечным магнитным полем. Использование этого устройства позволит сократить время плавки на 15 %.

Ключевые слова: МГД-перемешивание, поперечный магнитный поток, продольный магнитный поток

The article presents the results of physical modeling of a melting furnace during melting solid aluminum ingots using magnetohydrodynamic (MHD) stirrers with transverse and longitudinal magnetic fluxes. The technological process of melting solid aluminum ingots occurs at a low melting level. In the course of physical modeling, the melting time of the ingots was determined: without application of MHD stirrers, with application of an MHD stirrer having a transverse magnetic flux, and with the use of an MHD stirrer having a longitudinal magnetic flux. The experiments show that in the process of melting ingots and at a low melting point it is advisable to use an MHD stirrer with a transverse magnetic field. This device will enable reducing the melting time by 15%.

Keywords: MHD mixing, transverse magnetic flux, longitudinal magnetic flux

Магнитные гидродинамические (МГД) перемешиватели широко используют

в алюминиевой промышленности. В частности, в плавильных печах. Большинство пла-

вильных печей работают на твердой шихте, поставляемой в виде чушки и/или слитков, которые плавятся внутри печи. Использование МГД перемешивателя, позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи между жидкой и твердой фазой металла, путём создания принудительной циркуляции жидкого металла в ванне. Благодаря этому сокращается время плавки и расход энергии. МГД перемешиватели в плавильных печах целесообразно включать сразу с момента появления жидкого металла, то есть когда уровень расплава в ванне мал.

Установка индуктора МГД перемешивателя под днищем печи позволяет эффективно перемешивать расплав, как при максимальной, так и при небольшой глубине расплава. Наиболее часто для плавильных печей, максимальная глубина расплава лежит в пределах от 0,3 до 1,1 м. Однако, в ряде случаев установка индукторов под днищем печи связана с экономическими и конструктивными трудностями. Это имеет место, когда необходимо оснастить МГД перемешивателями уже действующие стационарные печи. В таких агрегатах по экономическим соображениям целесообразно использовать электромагнитные перемешиватели с установкой индукторов у боковых стенок ванны. Современные МГД перемешиватели имеют низкую эффективность работы при их установке с боковой стороны печи или миксера, когда уровень металла в ванне составляет менее 0,3 метра [1]. Как правило, технологический цикл плавильных печей, подразумевает слив расплава из печи насухо, из-за этого на начальных этапах плавки МГД перемешивателю приходится работать с малым уровнем расплава в ванне, хотя именно на этом технологическом промежутке необходимо обеспечивать максимальную циркуляцию металла в ванне для ускорения процесса плавки.

Целью работы было определение возможности создания МГД перемешивателя с поперечным магнитным потоком, установленным с боковой стороны печи, обеспечивающим перемешивание при малом уровне расплава. Данное техническое предложение должно обеспечить ускорение

процесса плавления слитков в печах с целью энергосбережения. Электрические машины с поперечным магнитным потоком были широко исследованы в рамках работ по созданию транспорта на магнитной подушке [2]. В отличие от электрического транспорта, где немагнитный зазор между статором и ротором лежит в пределах 10 мм, немагнитный зазор в плавильной печи может достигать 500-700 мм. МГД-перемешиватель с поперечным магнитным потоком при математическом моделировании электромагнитных процессов показал свою эффективность именно при малом уровне расплава, менее 0,3 метра.

Задачей работы было зафиксировать эффект ускорения процесса плавления при применении МГД-перемешивателя с поперечным магнитным потоком. Ключевым требованием для сравнения двух МГД-перемешивателей было равенство их длин, так как это является ключевым параметром, определяющим размер немагнитной плиты в футеровке промышленной плавильной печи, куда устанавливается перемешиватель.

На этапе планирования работ было принято решение начать с физического моделирования данного процесса.

Для количественной оценки работы перемешивателя с поперечным магнитным потоком на ускорение процесса плавки было проведено физическое моделирование на моделирующем металле. Производилось сравнение скоростей плавления слитков при воздействии на них МГД-перемешивателей с поперечным и продольным магнитными потоками.

Для выявления преимуществ одного из устройств была создана физическая модель плавильной печи в уменьшенном варианте в масштабе, так как использование опытного образца материально затратно. К тому же физическое моделирование позволяет обойти многочисленные трудности, возникающие при исследовании на опытном образце. К таким трудностям относятся: высокие температуры в опытном образце, труднодоступность и неудобные размеры оригинала, большие затраты на испытание нескольких возможных вариантов устройства.

Для проведения комплексных исследований эффективности работы электромагнитного перемешивателя с поперечным

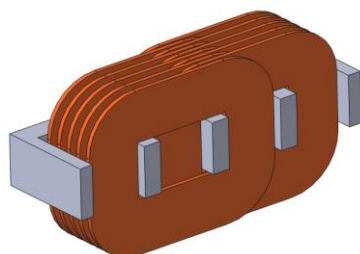
магнитным потоком физическая модель должна обеспечивать требованиям, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Требования к физической модели плавильной печи

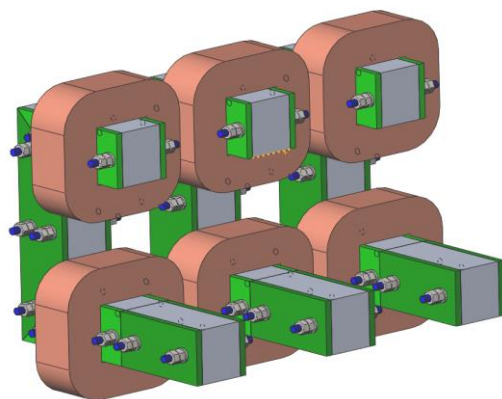
№	Требование к установке	Причина
1	Возможность установки на плавильной печи индукторов с поперечным и продольным магнитными потоками	Необходимость сравнения работы перемешивателей двух типов на скорость плавления слитка при разных уровнях расплава в печи
2	Установка на физической модели ванны прямоугольной формы	Использование в промышленности прямоугольной формы плавильной камеры.
3	Возможность установки индуктора по периметру плавильной печи	Определение, оптимального места расположения, обеспечивающего наилучшее воздействие на расплав для разной геометрии ванны и мест загрузки слитков
4	Регулировка уровня установки индуктора относительно печи	Определение оптимального положения индуктора по вертикали для разных уровней расплава в печи
5	Система нагрева установлена в своде печи	Создание в модели аналогичного с промышленной печью теплообмена
6	Герметичность внутripечного пространства в процессе плавки и возможность измерения температуры, визуального контроля уровня металла в печи и состояния слитка	Создание равных условий проведения экспериментов с и без электромагнитного воздействия
7	Равные массогабаритные и энергические параметры индукторов, с поперечным и продольным магнитными потоками	Создание равных условий проведения эксперимента по сравнению эффективности работы индукторов

Индуктор физической модели перемешивателя с продольным магнитным потоком выполнен в двухфазном исполнении с перекрещивающимися обмотками, состоящими из 10 однослойных катушек (рис. 1 а).

Индуктор физической модели перемешивателя с поперечным магнитным потоком собирается из П-образных элементов и может быть выполнен как в двухфазном, так и в трехфазном исполнении (рис. 1 б).



а



б

Рис. 1. Физические модели индукторов с продольным (а) и поперечным (б) магнитными потоками

Параметры индукторов физических моделей для продольного магнитного потока

представлены в таблице 2, а для поперечного потока в таблице 3.

Таблица 2 – Параметры индуктора с продольным магнитным потоком

Наименование параметра	Норма
Число фаз	2
Полная мощность индуктора, кВА	2,15
Активная мощность индуктора, кВт	0,5
Фазное напряжение, В	180
Фазный ток, А	10
Частота номинальная, Гц	50
Охлаждение блока катушек индуктора	Воздушное, принудительное
Расход воздуха, м ³ /час	100
Температура воздуха на входе (не выше), °С	40
Запылённость воздуха не более, мг/м ³	10
Линейная токовая нагрузка на поверхности, А/м	0,5·10 ⁶
Габаритные размеры, мм: длина – ширина – высота –	от 321 до 400 222/232/242/252 80/105
Масса расчетная, кг:	от 30 до 40
Режим работы	кратковременный

Таблица 3 – Параметры индуктора с поперечным магнитным потоком

Наименование параметра	Норма
Число фаз	3
Полная мощность индуктора, кВА	2,2
Активная мощность индуктора, кВт	0,5
Фазное напряжение, В	110
Фазный ток, А	20
Частота номинальная, Гц	50
Охлаждение блока катушек индуктора	Воздушное
Расход воздуха, м ³ /час	100
Температура воздуха на входе (не выше), °С	40
Запылённость воздуха не более, мг/м ³	10
Линейная токовая нагрузка на поверхности, А/м	0,5·10 ⁶
Габаритные размеры, мм: длина – ширина – высота –	347 105 252
Масса расчетная, кг:	100
Режим работы	кратковременный

Перемешиватели расположены на собственном каркасе, независимом от каркаса печи, позволяющим регулировать положение индуктора относительно печи в трех плоскостях. Магнитопроводы индукторов набраны из листов электротехнической стали. Для определения оптимальных параметров работы индуктора с поперечным магнитным потоком П-образные элементы индуктора выполнены сборными с возможностью изменения высоты ярем и зубцов. Подача напряжения на индукторы возможна от автотрансформаторов или от транзисторного источника питания.

Печь физической модели предназначена для плавления слитков из сплава Вуда. Физическая модель плавильной печи выполнена в масштабе 1 к 2400 по массе расплава. Полная емкость печи по сплаву Вуда составляет 101 кг, что в масштабе получается эквиваленту 60 тонн по алюминию. С боковой стороны печи возможна установка перемешивателей с поперечным или продольным магнитными потоками. Физическая модель плавильной печи выполнена с ванной прямоугольной формы (рис. 2). Ванна и свод физической модели плавильной печи выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т со слоем теплоизоляции разной толщины. Ос-

новной слой теплоизоляции имеет толщину 30 мм и выполнен из асбестового картона. В зоне установки физических моделей перемешивателей толщина теплоизоляции уменьшена до 10 мм. Полный уровень расплава в печи составляет 70 мм для ванн обоих типов. Максимальная рабочая температура в печи 250 °С. Температура на внешней поверхности печи 60 °С. Нагревательная система установлена под сводом печи. В качестве нагревателя использовался ТЭН общей мощностью 2 кВт, подобранный под размер свода печи и запитываемый от однофазного автотрансформатора. Для защиты от температурной деформации свод печи обшит теплоизоляцией с внешней и внутренней стороны. Свод печи выполнен съемным для возможности слива металла после проведения экспериментов. Контроль температуры обеспечивается установкой термодатчика внутри печи и измерением с помощью ТРМ1. На форкамере устанавливается дверца со смотровым окном для наблюдения процесса плавления. Регулирование перемешивателя по высоте относительно печи выполняется путем подкладывания под каркас перемешивателя досок разной толщины.

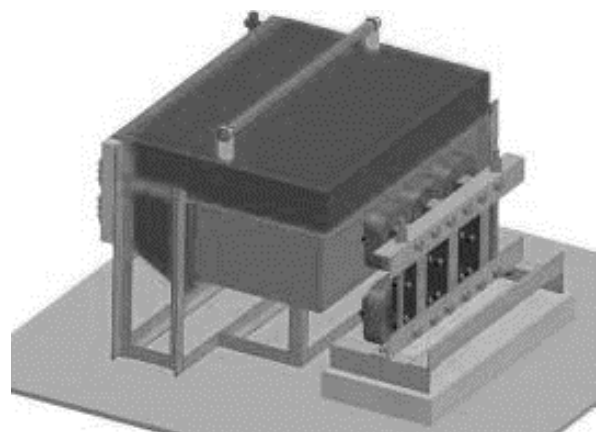
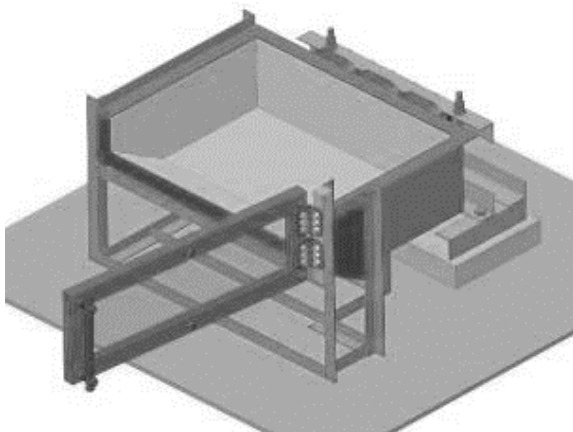


Рис. 2. Физическая модель плавильной печи с ванной прямоугольной формы с электромагнитным перемешивателем с поперечным магнитным потоком

При исследовании процессов в расплаве алюминия использовался моделирующий металл с более низкой температурой плавления и близкими значениями удельных электропроводностей. Это позволило добиться

подобия электромагнитных процессов при силовом воздействии на жидкий алюминий [3]. Для моделирования использовался легкоплавкий сплав Вуда с $t_{пл} = 69\text{ °C}$, в то время как температура плавления алюминия

$t_{nl} = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$. Физические свойства жидкого алюминия в диапазоне температур от 660 до 800 $^{\circ}\text{C}$ и сплава Вуда в диапазоне температур от 125 до 150 $^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 4. Параметры физических моделей с электромагнитным воздействием на расплав, подбира-

ются так, чтобы на промышленной частоте $f = 50\text{ Гц}$ выполнялось условие:

$$\varepsilon_0 = \frac{\omega_0 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_0}{\pi^2} \tau_0^2 = \varepsilon_i = \frac{\omega_i \cdot \mu_0 \cdot \gamma_i}{\pi^2} \tau_i^2, \quad (1)$$

где 0 – индекс оригинала; i – индекс модели.

Таблица 4 – Физические свойства жидкого алюминия и сплава Вуда

Металл	Температура плавления	Диапазон рабочих температур	Плотность	Теплопроводность	Кинематическая вязкость	Удельная теплоемкость	Удельная электрическая проводимость
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \cdot 10^{-7}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\text{См}}{\text{м}} \cdot 10^6$
Алюминий	660	660-800	2361	103,5-122	12,2-6	1083	3,7
Сплав Вуда	69 (80)	125-150	9430	18,8	4,5	172	1

Реальная физическая модель печи с поперечным магнитным потоком для плавления слитков из сплава Вуда представлена на рис. 3.

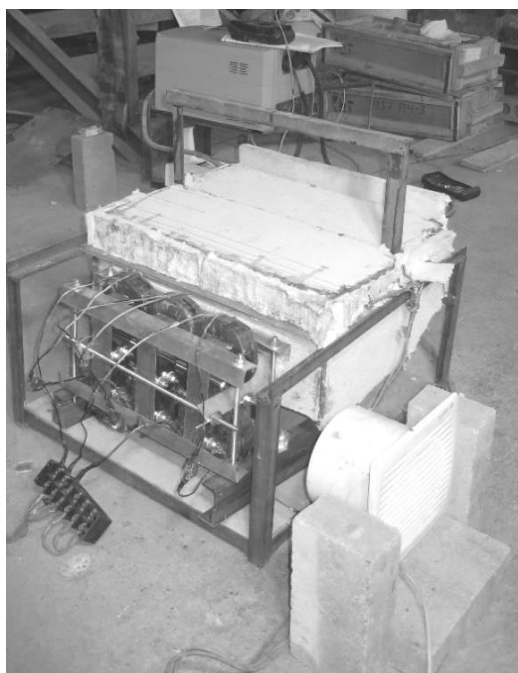


Рис. 3. Физическая модель плавильной печи и трехфазного индуктора с П-образными элементами установленных с боковой стороны

Эффективность работы МГД-перемешивателя с поперечным магнитным потоком, производилась в сравнении с МГД-

перемешивателем с продольным магнитным потоком.

Для проведения экспериментальных исследований были отлиты из сплава Вуда слитки цилиндрической формы массой 10 кг. Помещались слитки в центр ванны печи (рис. 4). Расплавление каждого слитка обеспечивало поднятие уровня расплава в печи в среднем на 5 мм.



Рис. 4. Процесс загрузки слитка

Начальными условиями для проведения экспериментов был принят уровень металла равный 5 мм (расплавлен 1 слиток) и доведенный до температуры 100 $^{\circ}\text{C}$. После рас-

плавления 1 слитка и прогрева печи до температуры 200 °С, в не помещался один из заранее приготовленных слитков металла, цилиндрической формы. Затем через частотный источник питания «Веспер» включался МГД-перемешиватель. Засекалось время плавления, температура в печи

и интенсивность течения металла в ванне. Цикл повторялся до достижения уровня расплава в печи 20 мм (расплавлены 4 слитка). В табл. 5 приводятся сравнения скоростей плавления слитков из сплава Вуда в печи без перемешивателя и с МГД-перемешивателями разного типа.

Таблица 5 – Результаты экспериментов

Тип МГДП	Номер эксперимента	Уровень металла, мм		t, мин	Параметры ИП			
		до	после		I, А	U, В	P, ВА	f, Гц
Без перемешивания	1	5	10	27	–	–	–	–
	2	10	15	23				
	3	15	20	21				
		Общее время		71				
Продольный перемешиватель	4	5	10	27	19	112	6400	30
	5	10	15	22				
	6	15	20	18				
		Общее время		67				
Поперечный перемешиватель	7	5	10	22	12	183	4950	30
	8	10	15	18				
	9	15	20	14				
		Общее время		54				

Как видно из табл. 5, время плавления слитка без электромагнитного перемешивателя с уровня 5 мм до уровня 20 мм составляет 71 мин. При использовании МГД-перемешивателя с продольным магнитным потоком время плавления 67 мин, что на 5,6 % меньше. При этом основное сокращение времени плавки приходится при плавлении третьего слитка (18 мин против 21 мин). При уровне расплава 15 мм продольный МГД-перемешиватель начинает развивать электромагнитное усилие в расплаве способное привести расплав в движение. При использовании МГД-перемешивателя с поперечным магнитным потоком скорость плавления резко увеличилась. Время плавления составило 54 мин (ускорение плавки на 23,9 %). При этом ускорение плавления фиксируется начиная с плавления слитка при уровне 5 мм.

На рис. 5 а представлены снимки слитков в процессе плавления. Как видно из рис. 5 б, без электромагнитного перемешивания разрушение слитка происходит по его контуру, при этом визуально видно оплавление поверхности слитка, что позволяет сделать вывод о достижении температуры плавления всего объема слитка. В отличие от этого, при электромагнитном перемешивании (рис. 5 в) плавление слитка осуществляется со стороны набегающего потока расплава (в данном случае с левой стороны). При этом визуально видно, что оплавление поверхности слитка нет, что позволяет заключить о преобладании теплопередачи энергии слитку через границу раздела фаз от перегретого расплава.

Электромагнитный перемешиватель с поперечным магнитным потоком целесообразно использовать в плавильных пе-

чах, где по технологии процесс плавки слитка происходит в пустой печи, либо в печи при уровне расплава менее 0,3 метра. Его использование позволит увеличить производительность и сократить время плавки в стационарных плавильных печах, работающих на твердом сырье. По-

сле процесса плавки электромагнитный перемешиватель должен также обеспечить однородность температуры и химического состава по всему объему ванны печи и ускорить процесс растворения твердой шихты и тяжелых металлических компонентов в расплаве.



а



б



в

Рис. 5. Состояния слитков в печи при уровне расплава 5мм: слиток, только загруженный в печь (а), плавление слитка без электромагнитного перемешивания (б); плавление слитка с электромагнитным перемешиванием (в)

По результатам работы был зафиксирован эффект ускорения плавления при применении МГД-перемешивателя с поперечным магнитным потоком и подтверждена возможность реализации данного технического решения. Использование данного устройства позволит сократить время плавки в плавильной печи на 15 %. Следующим шагом является разработка математической модели электромагнитных, тепловых и

гидродинамических процессов, для количественной оценки процесса перемешивания и дальнейшего масштабирования на промышленную печь.

В перспективе оснащение данным типом устройств большого количества отечественных стационарных плавильных печей, работающих на твердом сырье, даст существенный экономический эффект для алюминиевой промышленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Боякова Т.А., Авдулов А.А., Авдулова Ю.С.** Эффективное перемешивание металла при малом уровне расплава в печи или миксере // *Электротехника*. 2020. № 4. С. 56-61.

2. **Кальнин Т.К.** Линейные индукционные машины с поперечным

магнитным потоком. Рига: Зинатье, 1980. 170 с.

3. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV / Э. Бааке, Д. Барглик, С. Лупи и др. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 250 с.

Боякова Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Авдулов Антон Андреевич – кандидат технических наук, заместитель директора дирекции развития нефтегазохимических производств АНЦ «Инновационный инжиниринговый центр», Москва.

Tatyana A. Boyakova – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics, Bauman Moscow University

Anton A. Avdulov – PhD (Technical Sciences), Deputy Director, Directorate for Petrochemical Productions Development of the ANC Innovative Engineering Center, Moscow

Статья поступила в редакцию 18.04.24, принята к опубликованию 29.05.24

УДК 621.78

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОКРЫТИЯ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, П.Н. Устинов

A THERMAL MODEL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF ALUMINUM OXIDE COATING UNDER PULSED LASER CLADDING

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

Проведены теоретико-экспериментальные исследования процесса формирования алюмооксидного покрытия воздействием лазерного излучения, генерируемого в импульсном режиме. Обработка образцов проводилась путем наплавки мелкодисперсного порошка Al_2O_3 при осуществлении линейной схемы сканирования поверхности. Рассмотрена модель наплавки порошка корунда с размером зерен 20...80 мкм на подложку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т импульсным лазерным излучением мощностью 800 Вт, диаметром пучка 0,5 мм, длительностью импульса 0,5 мс и скважностью 100. Установлено, что, нагрев зерен выше температуры кипения 3400 К происходит за 1...2 импульса с охлаждением расплава в паузе между импульсами до 800 К со скоростью 10^5 К/с. Образование пористой структуры покрытия обусловлено выплеском расплава из лунок и образованием твердых стенок пор с высоким коэффициентом отражения торцов. Прочность сцепления получаемого покрытия с подложкой обусловлена обволакиванием расплавом материала подложки зерен образующихся алюминатов, оксидов и нитридов хрома и титана.

Ключевые слова: лазерное импульсное спекание, корундовый порошок, тепловая модель, фазовые и структурные превращения, пористое покрытие, микротвердость

Theoretical and experimental studies of the process relating formation of aluminum oxide coating under the influence of laser radiation generated in a pulsed mode were carried out. The samples were processed by cladding finely dispersed Al_2O_3 powder using a linear surface scanning scheme. A model of cladding the corundum powder with a grain size of 20...80 microns onto a stainless steel 12Cr18Ni10Ti substrate by pulsed laser radiation with the power of 800 W, the beam diameter of 0,5 mm, the pulse duration of 0,5 ms and the borehole of 100 is considered. Heating of the grains above the boiling point of 3400 K occurs within 1-2 pulses with cooling the melt during the pause between the pulses up to 800 K at the rate of 10^5 K/s. Formation of the porous structure is caused by the melt splash the wells and formation of solid walls with a high reflection coefficient of the ends. The adhesion strength of the coating to the substrate is due to the coating grains of the resulting aluminates, oxides and nitrides of chromium and titanium by the melt substrate.

Keywords: laser pulse sintering, corundum powder, thermal model, phase and structural transformations, porous coating, microhardness

Введение

В настоящее время лазерная обработка широко используется в технологических процессах модификации поверхности, термообработки, легирования, наплавки, спекания, сварки, резки, сверления, фрезерования и т. д. [1-13]. Среди множества различных способов обработки лазерным излучением наиболее часто применяется лазерная наплавка разных присадочных материалов, позволяющая создавать как исходные функциональные структуры поверхностного слоя, так и восстанавливать рабочие поверхности изделий. В качестве присадочных материалов могут использоваться металлические и керамические порошки, проволока, фольга, мелкодисперсная стружка, гранулы, порезанные на фрагменты тонкослойные листовые и ленточные материалы, волокна, различные измельченные твердофазные составы и т. п. С помощью наплавки могут создаваться многослойные композиты, сочетающие в своем компонентном составе как металлы и сплавы, так и керамические материалы. Лазерная наплавка, как правило, представляет многопроходный процесс с послойным нанесением присадочного материала. Обработка проводится чаще всего в режиме непрерывного излучения. Однако для получения тонкослойных наплавленных структур может применяться импульсное воздействие с возможностью реализации различных схем сканирования поверхности. При импульсном облучении целесообразно использовать мелкодисперсные присадки, предварительно наносимые на модифицируемую поверхность в виде специально приготовленных легирующих обмазок. Такие обмазки включают непосредственно сам присадочный компонент и вязкотекучее связующее вещество для закрепления и удержания обмазочного состава на поверхности в процессе обработки [4-6]. В настоящее время промышленно выпускаемых обмазок для технологии лазерной наплавки нет. Их состав для каждого конкретного случая разрабатывается экспериментальным путем с учетом задаваемых

функциональных характеристик поверхности – коррозионной стойкости, износостойчивости, жаропрочности, стойкости к кавитационно-эрозионному разрушению и т. п. Использование легирующих обмазок позволяет минимизировать применение сложных вспомогательных устройств, например, устройств регулируемой подачи присадочных материалов (порошка, ленты, проволоки) в зону лазерного воздействия при обработке. Однако после 1-2 технологических проходов (сканирований) требуется нанесение на поверхность нового слоя обмазочного состава для наращивания наплавленного покрытия по толщине. Количество проходов при импульсной наплавке зачастую определяется концентрацией присадочного компонента в вязкотекучем связующем, которая регулируется простым соотношением компонентов, например, 1:2, 1:3.

Режимы обработки для лазерного нанесения того или иного присадочного материала подбираются, как правило, эмпирически. Отсутствие адекватных моделей ограничивает возможности управления структурой, фазовым составом и морфологией наплавленных покрытий, которые определяют эксплуатационные свойства изделий. Целью данной работы является построение моделей термических циклов при импульсной наплавке порошка корунда на подложку из нержавеющей стали, а также определение механизма формирования пористой структуры, фазового состава и прочности покрытий на основе алюмооксидной керамики.

Методика и техника выполнения эксперимента

Для изготовления экспериментальных образцов использовалась хромоникелевая сталь аустенитного класса 12X18H10T. Образцы изготавливались в виде квадратных пластин с габаритным размером 15×15×2 мм. Поверхность пластин проходила предварительные операции обработки, включающие ультразвуковую очистку

в ультразвуковой ванне «Кристалл-2,5» со спиртовым раствором, промывку в дистиллированной воде и сушку в лабораторном термощкафу. После этого воздействием лазерного импульсного излучения с использованием лазерной автоматизированной установки LRS-50A на подготовленной поверхности формировалась исходная выраженная микротекстура. Микротекстурированная поверхность обеспечивала лучшее удержание наносимого слоя экспериментальной обмазки из корундового порошка Al_2O_3 зернистостью 20-80 мкм и глицерина, который служил связующим веществом. Обмазка приготавливалась при соотношении компонентов 1 (порошок корунда) : 2 (глицерин). Полученный обмазочный состав равномерно тонким слоем ($\approx 350-400$ мкм) наносился на поверхность образцов и подвергался лазерному облучению на установке LRS-50A в импульсно-периодическом режиме генерации с колоколообразной формой импульсов. Данная установка основана на применении твердотельного лазера на алюмоиттриевом гранате, активированном неодимом, с длиной волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм.

Обработка наплавкой проводилась при частоте импульсов 20 Гц, шаге следования 0,1 мм, длительности импульсов 0,5 мс, диаметре пятна фокусировки 0,5 мм и мощности излучения, задаваемой в диапазоне 400-1500 Вт. В эксперименте применялась линейная схема лазерного сканирования поверхности. Формирование покрытий реализовывалось за 4 технологических прохода, где после каждого прохода на подложку наносился новый обмазочный слой для наращивания покрытия в толщину.

Исследование морфологии полученных Al_2O_3 покрытий осуществлялось методом растровой электронной микроскопии с применением сканирующего микроскопа с полевой эмиссией JSM-7100F производства JEOL (Япония) при различных увеличениях. Растровое сканирование поверхности проводилось с помощью катода Шоттки, благодаря которому мик-

роскоп позволял получать высокую разрешающую способность при визуализации анализируемых структур в поле больших увеличений.

Толщина покрытий определялась опико-микроскопическим методом на поперечных микрошлифах образцов, изготавливаемых по стандартной методике. Для таких измерений использовался микроскоп Levenhuk D50L NG с размерной микрометрической сеткой окуляра. Для сравнительного анализа толщины дополнительно применялся цифровой контактный толщиномер VOGEL (Германия).

Микротвердость поверхности после лазерной наплавки определялась по методу Виккерса с помощью микротвердомера ПМТ-3М с проведением индентирования не менее чем на трех участках поверхности каждого образца. После этого рассчитывалось среднеарифметическое значение микротвердости и выявлялась экспериментальная зависимость данной механической характеристики от режимов лазерного воздействия.

Результаты теоретико-экспериментальных исследований и их обсуждение

Тепловая модель влияния энергетических параметров лазерного импульсного излучения на физическое состояние порошка Al_2O_3 при наплавке

Наплавка порошка оксида алюминия с зернистостью 20-80 мкм на подложку из нержавеющей стали проводилась импульсным лазерным излучением с частотой следования импульсов 20 Гц, длительностью импульса 0,5 мс, шагом 0,1 мм при диаметре пятна 0,5 мм и мощностью 400-1500 Вт. Таким образом, при прохождении пятна излучения зерно Al_2O_3 облучается 4 импульсами со скважностью 100 и импульсной мощностью на зерне:

$$P_g(P_L, a_Z, d_L, R) := P_L \cdot \frac{a_Z^2}{d_L^2} \cdot (1 - R),$$

где P_L – мощность лазера, Вт; d_L – диаметр лазерного пятна, м; a_Z – размер зерна, м; R – коэффициент пропускания оксида алю-

миния, включающий коэффициент отражения и коэффициент прохождения, т. е. $1-R$ является коэффициентом диссипации. Коэффициент пропускания оксида алюминия при длине волны 1 мкм, температуре 300 К и толщине наплавленного слоя 1 мм составляет 0,81 [1].

Дифференциальное уравнение баланса энергии в алюмооксидном зерне состав-

$$f(t, T) = \frac{P_{gu}(P_L, a_Z, d_L, R, t, \tau - S_Z(a_Z) \cdot [\varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot (T - T_{n0})^4 - \alpha_T(T) \cdot (T - T_{n0}) - \lambda(T) \cdot \frac{(T - T_{n0})}{L}])}{c(T) \cdot m_Z(a_Z)},$$

где α_T – коэффициент теплопередачи; λ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость; ε – спектральный коэффициент теплового излучения (степень черноты); L – характерный размер теплопроводности; σ – постоянная Стефана – Больцмана; $S_Z(a_Z) = a_Z^2$ – площадь зерна; $m_Z(a_Z) = \rho_a a_Z^3$ – масса зерна; ρ_a – плотность зерна; T_{n0} – средняя температура среды; τ – длительность импульса; t – время.

Первый член соответствует поступающей мощности, второй – тепловому излучению, третий – теплоотдаче, четвертый – теплопроводности.

Тепловые и оптические параметры оксида алюминия существенно зависят от температуры в диапазоне 300...3000 К. Коэффициент поглощения увеличивается с 0,07 до 7 см^{-1} , теплоемкость увеличивается с 762 до 1345 Дж/(кг·К), теплопроводность уменьшается с 27 до 3 Вт/(м·К), спектральный коэффициент теплового излучения увеличивается с 0,14 до 0,31. При расчете принималась линейная зависимость этих параметров от температуры. Удельное сопротивление уменьшается с 10^{15} до 10^3 Ом·см , соответственно механизм потерь изменяется от диэлектрических до омических величин. Уточнение модели связано с учетом многократного отражения излучения в системе «покрытие-подложка» при мощности 800 Вт, которая в ходе предварительных лабораторных экспериментов оказалась наиболее целесообразной для процесса импульсной наплавки.

ляется по закону сохранения энергии: мощность нагрева зерна равна поступающей мощности за вычетом мощности потерь. Мощность потерь определяется тепловым излучением, теплопередачей и теплопроводностью. Правая часть уравнения имеет вид (в левой части уравнения стоит производная температуры по времени):

Уравнение решалось с помощью оператора MathCAD с шагом по времени 10^{-7} с на интервале от 0 до 0,2 с:

$$\text{Given } T'(t) = f(t, T(t)) \quad T(t_0) = T_{n0} \\ T_u := \text{Odesolve}(t, t_k, 1000000)$$

Зависимости поступающей в зерно Al_2O_3 мощности лазерных импульсов от времени при разных размерах зерна показаны на рис. 1, 2. Поглощенная в зерне мощность определяется дивергенцией падающего потока Пойнтинга, усредненного по времени и пропорциональна мнимой части диэлектрической функции. Эта часть определяет диэлектрические и омические потери. Последние существенно возрастают при повышении температуры вследствие увеличения электрической проводимости. Общая поглощенная мощность возрастает также пропорционально размеру зерна. Принятые коэффициенты пропускания соответствуют общим средним коэффициентам диссипации энергии 0,13 и 0,05 в интервале температур 1000...3000 К. Такие коэффициенты диссипации соответствуют высокой прозрачности кристаллов оксида алюминия.

Зависимость температуры алюмооксидного зерна от времени при разных размерах зерна показана на рис. 3 и 4.

Зерно размером менее 40 мкм нагревается выше температуры кипения (3400 К) за 1 импульс, а размером 80 мкм – за 2 импульса при коэффициенте отражения 0,87. При коэффициенте отражения более 0,95 зерна всех размеров нагреваются ниже

температуры плавления (2300 К). Коэффициент отражения от лунок меньше, чем от торцов стенок, что обеспечивает образование пористой структуры. В паузе между

импульсами расплав охлаждается до температуры около 500 °С со скоростью порядка 10^5 К/с, что приводит к растрескиванию образующихся структур.

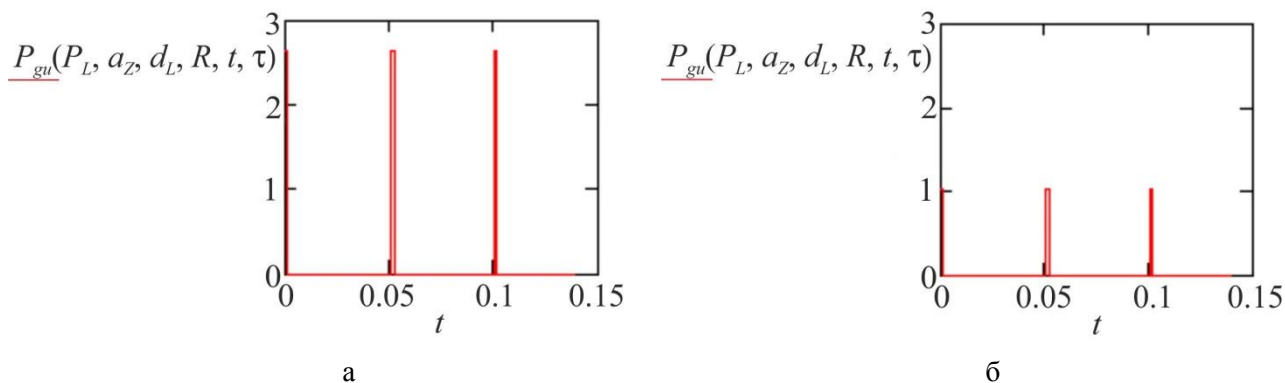


Рис. 1. Зависимость мощности лазерных импульсов (Вт), поступающей в зерно размером 80 мкм, от времени (с) при мощности излучения 800 Вт: *a* – коэффициент пропускания 0,87; *б* – коэффициент пропускания 0,95

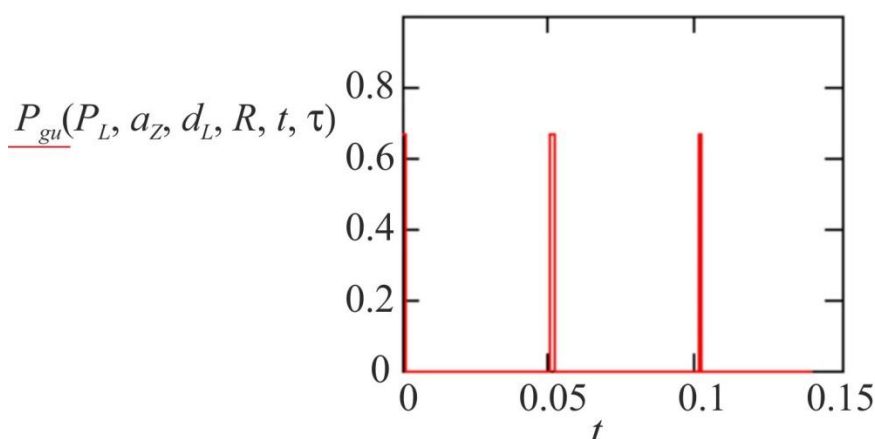


Рис. 2. Зависимость мощности лазерных импульсов (Вт), поступающей в зерно размером 40 мкм, от времени (с) при мощности излучения 800 Вт (коэффициент пропускания 0,87)

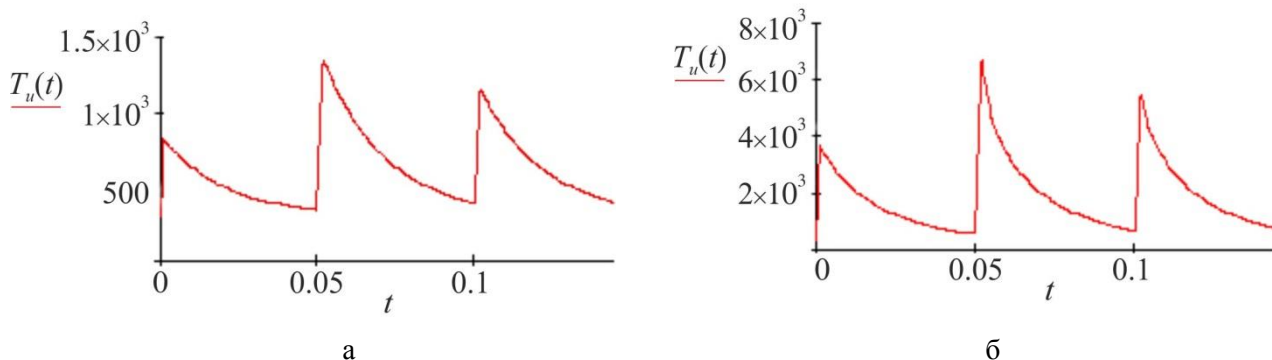


Рис. 3. Зависимость температуры зерна оксида алюминия T (К) от времени t (с) при размере зерна 40 мкм и мощности излучения 800 Вт: *a* – коэффициент пропускания 0,95; *б* – коэффициент пропускания 0,87

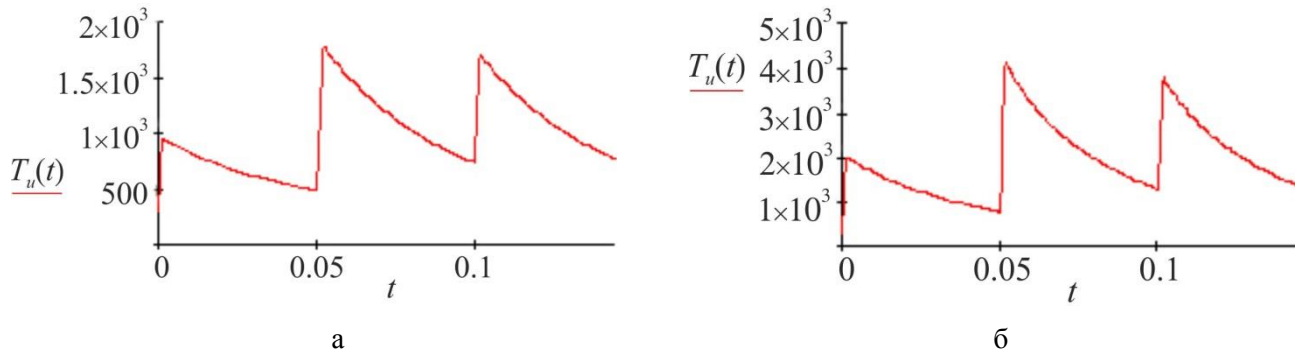


Рис. 4. Зависимость температуры зерна оксида алюминия T (К) от времени t (с) при размере зерна 80 мкм и мощности излучения 800 Вт:
 а – коэффициент пропускания 0,95; б – коэффициент пропускания 0,87

Механизм формирования морфологии наплавленного Al_2O_3 покрытия

Электронно-микроскопический анализ показал, что создаваемый импульсным облучением наплавленный слой имеет мор-

фологически развитую структуру с наличием множества открытых микропор (рис. 5). Высокая пористость покрытия характеризует его как пеноподобный материал с механически прочной матрицей.

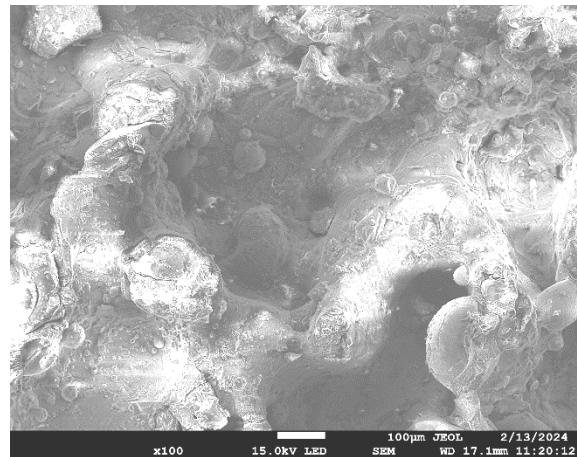
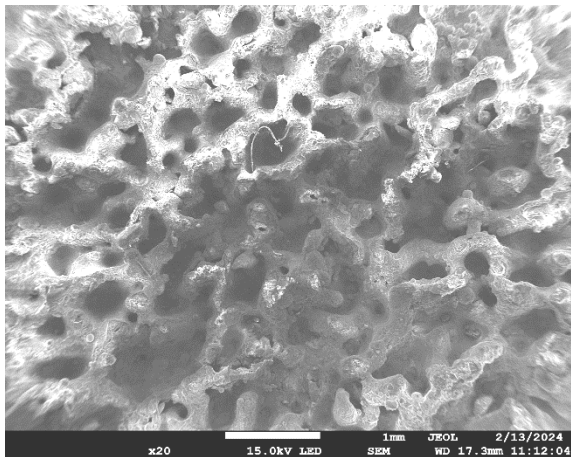


Рис. 5. Морфология алюмооксидного покрытия при мощности лазерного излучения 800 Вт

Плотность мощности при диаметре лазерного пучка 0,5 мм составляет $4 \cdot 10^5$ Вт/см², что характерно для режимов лазерной сварки. Образуются кратеры глубиной 0,5 мм, диаметром 0,5 мм со стенками толщиной 0,1 мм, что соответствует диаметру луча и шагу следования импульсов. Температура нагрева зерен оксида алюминия диаметром 20-80 мкм превышает температуру кипения (3400 К) в течение 1-2 импульсов (рис. 3, 4). Давление паров при такой температуре превышает атмосферное давление, и расплав выдавливается из лунки. Длительность импульса для выплеска расплава оценивается по формуле [1]:

$$\tau_V := \frac{\pi}{4a_a} \cdot \left(\frac{\lambda_a \cdot T_k}{I_L} \right)^2,$$

где T_k – температура кипения;
 $a_a = \frac{\lambda_a}{c_a \cdot \rho_a}$ – коэффициент температуро-

проводности; $I_L = \frac{P_L \cdot 4}{\pi \cdot d_L^2}$ – плотность мощности лазерного пучка.

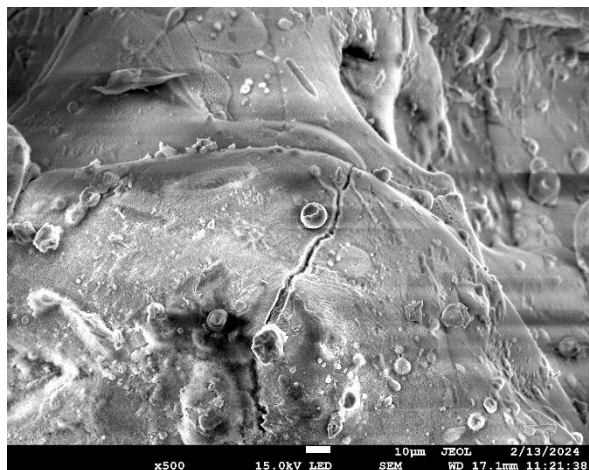
При $\lambda_a = 20$ Вт/(м·К); $c_a = 1000$ Дж/(кг·К); $\rho_a = 3,9 \cdot 10^3$ кг/м³ и плотности мощности $I_L = 4 \cdot 10^9$ Вт/м² длительность импульса для выплеска расплава составляет $\tau_V = 5 \cdot 10^{-5}$ с,

что меньше длительности импульса в эксперименте ($0,5 \cdot 10^{-3}$ с).

Глубина лунки оценивается по формуле [1]:

$$h_v := \frac{E_u}{\pi \cdot d_L \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot T_k \cdot \sqrt{a_a \cdot \tau_u}},$$

где $E_u = P_L \cdot \tau_u$ – энергия импульса, Дж;
 $\tau_u = 0,5 \cdot 10^{-3}$ – длительность импульса, с.



При мощности излучения 800 Вт и длительности импульса 0,5 мс энергия импульса равна 0,4 Дж и глубина лунки составляет 0,34 мм, что согласуется с экспериментом.

Выплески расплава образуют стенки толщиной 0,1 мм с высоким коэффициентом отражения, что затрудняет их дальнейшее тепловое разрушение (рис. 6).

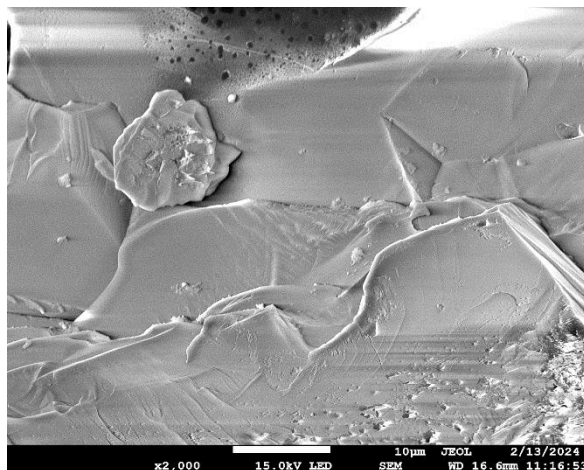


Рис. 6. Морфология стенок лунок при мощности излучения 800 Вт

Высокий коэффициент поглощения в лунках способствует их дальнейшему углублению в процессе воздействия излучения. Таким образом, стенки состоят из зерен оксида алюминия, покрытых расплавом алюминатов железа, хрома и никеля, входящих в состав материала подложки. Это подтверждается тем, что экспериментальное значение микротвердости стенок составляет 10-14 ГПа, что существенно ниже микротвердости корунда (20 ГПа). За период следования импульсов 0,05 с расплав охлаждается до температуры 800 К со скоростью 10^5 К/с и следующая лунка образуется с шагом 0,1 мм, что создает пористость структуры. Охлаждение расплава в период между импульсами не позволяет обеспечить режим непрерывного оплавления. Для непрерывного оплавления необходимо увеличивать частоту следования импульсов до значений более 100 Гц при сохранении длительности импульса и скорости наплавки 2 мм/с. Высокая скорость охлаждения способствует образованию мелкозернистой структуры и аморфизации, что увеличивает твердость. Согласно

методике выполнения эксперимента толщина исходного присадочного слоя порошка оксида алюминия составляла порядка 0,4 мм с коэффициентом заполнения 0,4. Поэтому происходит частичное оплавление подложки на глубину порядка 0,1 мм и выплеск расплава материала подложки (12X18H9T), что обеспечивает механическое сцепление алюминатов с подложкой. Прочность взаимодействия алюминатов со сталью незначительна [14]. При увеличении числа технологических проходов торцы стенок лунок не расплавляются из-за высокого коэффициента отражения, а лунки углубляются. Увеличение количества выплеснутого расплава подложки способствует повышению прочности сцепления наплавляемого порошкового покрытия с поверхностью образца.

Так как обработка проходит на воздухе, то при охлаждении расплава от температуры кипения образуются стойкие алюминаты, оксиды и нитриды. При таких температурах устойчивы оксиды и нитриды хрома и титана. При температурах ниже температуры плавления (2100 К) устойчивы алюминаты

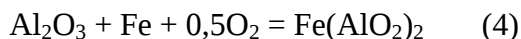
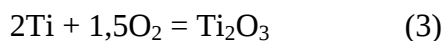
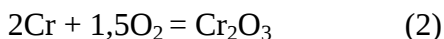
железа, хрома и никеля. Устойчивость соединений определяется температурой и парциальными давлениями кислорода и азота. Реакции направлены вправо, если давления газов превышают равновесные [15]:

$$p_g(T, i) = \left(\frac{a_c}{a_M^{n_{Mi}} \cdot K_r(T, i)} \right)^{\frac{1}{n_{gi}}},$$

где a_c – активности соединений в расплаве; a_M – активности металлов в расплаве; n_g – стехиометрические коэффициенты при газовом реагенте; n_M – стехиометрические коэффициенты при металлическом реагенте; i – индекс соединения;

$K_r(T, i) = \exp\left(-\frac{\Delta G_r(T, i)}{RT}\right)$ – константа равновесия; $\Delta G_r(T, i) := \Delta H_{r_i} - T \cdot \Delta S_{r_i}$ – стандартная энергия Гиббса реакции; ΔH_r – стандартные энтальпии реакций; ΔS_r – стандартные энтропии реакций; R – универсальная газовая постоянная.

На рис. 7 показана зависимость равновесных давлений газов от температуры при активности соединений и металлов равной единице для реакций:



Термодинамические данные брались из работ [16, 17]. Энергия образования алюмината железа по реакции (4) равна сумме энергий Гиббса образования алюмината из оксидов и энергии Гиббса образования оксида железа из простых веществ. При $T < 3000$ К и атмосферном давлении устойчивы оксиды и нитриды титана и хрома. Алюминат железа устойчив при $T < 2000$ К. Скорости реакций образования новых фаз в расплаве и в твердой фазе при температурах 2000...3000 К достаточны для образования соединений за время нескольких долей мс при степени превращения более 50 % [18].

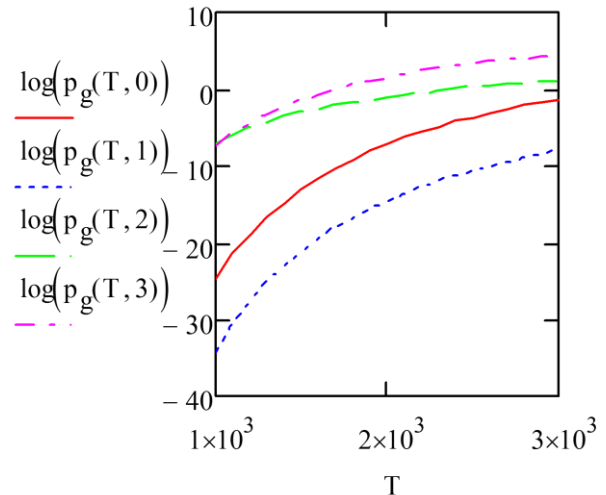


Рис. 7. Зависимость равновесных давлений газов (атм) от температуры T (К) для реакций (1)...(4)

Экспериментальным путем установлено, что толщина покрытия составляет 240–300 мкм, что характеризует исследуемый процесс наплавки как тонкопленочную технологию упрочнения и позволяет применять ее в качестве способа модифицирования поверхностей, где требуется соблюдение высокой точности размеров изделий и повышенное качество поверхностного слоя.

Заключение

Лазерная наплавка порошка корунда с зернистостью 20...80 мкм на подложку из нержавеющей стали при мощности излучения 800 Вт, длительности импульсов 0,5 мс, диаметре пучка 0,5 мм и частоте следования 20 Гц на воздухе обеспечивает получение пористой структуры покрытия толщиной 0,2...0,3 мм с высокой прочностью сцепления с подложкой и микротвердостью до 14 ГПа. Зерна размером 20...80 мкм нагреваются до температуры выше температуры кипения оксида алюминия за 1...2 импульса и в период между импульсами охлаждаются до 800 К со скоростью более 10^5 К/с. Механическая прочность сцепления покрытия с подложкой обеспечивается выплескиванием расплава подложки из лунок и его взаимодействием с частицами оксида алюминия, а формирование стенок – высоким коэффициентом отражения излучения от их торцов. Фазовый состав вклю-

чает стойкие оксиды и нитриды титана, хрома и алюминаты железа, хрома и никеля. Микротвердость наплавленного алюмоок-

сидного покрытия обеспечивается фазовым составом и ниже микротвердости исходного корунда на 40-50 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технологические лазеры: справочник. Т. 1 / Под ред. Г.А. Абельснитова. Москва: Машиностроение, 1991. 442 с.

2. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. Москва: Энергоатомиздат, 2015. 208 с.

3. Родионов И.В., Проскуряков В.И. Лазерная модификация поверхности нержавеющей хромоникелевой стали 12X18H10T в слое смеси графитовой пасты и нанодисперсного порошка анатаза // Вестник СГТУ. № 2 (85). 2020. С. 79-84.

4. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Исследование влияния состава легирующей обмазки на изменение структуры и микротвердости нержавеющей стали 12X18H10T // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 2 (249). С. 88-92.

5. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Исследование изменения износостойкости поверхности нержавеющей стали, полученной лазерным импульсным легированием в слое обмазки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 6 (253). С. 61-65.

6. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Разработка технологии тонкослойного лазерного модифицирования хромоникелевой стали 12X18H10T // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 85-96.

7. Сперанский С.К., Родионов И.В. Лазерные технологии в науке и производстве (обзор). 1. Технологические особенности лазерной сварки и пайки различных материалов // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4 (25). С. 18-37.

8. Proskuryakov V., Rodionov I., Borodina S. The effect of graphite coating on the composition, structure and microhardness of the surface of structural chromiumnickel steel during laser pulse processing // Journal of

Physics: Conference Series: 7, Saint Petersburg, 27-30 апреля 2020 года. Saint Petersburg, 2020. P. 012069.

9. Obeidi M.A. Laser surface texturing of stainless steel 316L cylindrical pins for interference fit applications // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Т. 252. С. 58-68.

10. Laroudie F., Tassin C., Pons M. Hardening of 316L stainless steel by laser surface alloying // J. Mater. Sci. 1995. № 30. P. 3652-3657.

11. Improving tribological properties of stainless steel surfaces by femtosecond laser irradiation / S.P. Murzin, V.B. Balyakin, G. Liedl, A.A. Melnikov // Coatings. 2020. Т. 10. № 7. P. 606.

12. Влияние режимов лазерной наплавки порошка карбида вольфрама на характеристики поверхности стали 12X18H10T / И.В. Родионов, П.Н. Устинов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 2 (285). С. 41-46.

13. Лазерная наплавка порошка титанового сплава ВТ6 на нержавеющую сталь 08X18H10T при импульсном воздействии излучения / И.В. Родионов, П.Н. Устинов, И.В. Перинская, Л.Е. Куц // Вопросы электротехнологии. 2023. № 4 (41). С. 40-50.

14. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка в вакууме. Москва: Машиностроение, 1980. 304 с.

15. Зоркин А.Я., Конюшков Г.В. Откачка электронных приборов. Саратов, 2006. 287 с.

16. Смитлз К. Металлы. Москва: Машиностроение, 1980. 304 с.

17. Третьяков Ю.Д. Термодинамика ферритов. Ленинград: Химия, 1967. 304с.

18. Левин Б.Е., Третьяков Ю.Д., Лютюк Л.М. Физико-химические основы получения, свойства и применение ферритов. Москва: Металлургия, 1979. 491с.

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

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

Устинов Павел Николаевич – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

Pavel N. Ustinov – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.04.24, принята к опубликованию 29.05.24

УДК 621.9.047/048

**ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ОДОРАНТА
ПРИ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, К.Н. Огурцов

**A POSSIBILITY OF ULTRASONIC
SPRAYING OF ODORANT AT
THE TRUNK TRANSIT SYSTEM OF NATURAL GAS**

N.V. Bekrenev, I.V. Zlobina, K.N. Ogurtsov

Выполнен анализ методов распыления жидкостей, в том числе одоранта в потоке при транспортировке природного газа и показана перспективность применения ультразвукового распыления. На основе выполненных экспериментальных исследований установлено, что наилучшие характеристики формируемого фонтана микрокапель обеспечиваются при резонансной частоте 44 кГц с амплитудами от 5 до 8 мкм. Средний размеркапель – 24-27 мкм, коэффициент вариации – 0,43-0,96 %. Производительность распыления составляет не менее 0,2 мл/с.

Ключевые слова: Ультразвуковое распыление, одорант, резонансная частота, скорость распыления, плотность и однородность фонтана, размер микрокапель

Введение

В магистральных системах транспортировки природного газа используется обязательная одоризация с целью надежной диагностики утечек, могущих привести к авариям с тяжелыми последствиями и техногенным катастрофам. Впервые одоризацию газа, применив этилмеркаптан, для определения утечек в гидравлическом контуре использовал Фон Квальо в Германии в 1880 году. В настоящее время одоризация горючих газов применяется во всем мире [1-4].

Процесс одоризации происходит непосредственно перед подачей газа потребите-

The analysis of methods of spraying liquids, Analysis of the methods of spraying liquids, including odorant in the flow during transportation of natural gas, is performed and prospects for using ultrasonic spraying are shown. Based on the performed experimental studies, it is found that the best characteristics of the formed fountain of microdrops are provided at the resonant frequency of 44 kHz with the amplitudes from 5 to 8 microns. The average droplet size is 24-27 microns, and the coefficient of variation is 0.43-0.96 %. The spraying capacity is at least 0.2 ml/s.

Keywords: ultrasonic spraying, odorant, resonant frequency, spray rate, density and uniformity of the fountain, size of microdrops

лям – на газораспределительных станциях (ГРС). Реагент (в России – этилмеркаптан) вводят в газопровод с помощью специальных установок, обеспечивающих подачу одоранта пропорционально расходу газа – строго по установленным нормам: 16 г в расчете на 1000 м³ газа. При этом требуется обеспечить равномерное распределение вещества в потоке и наличие максимально монодисперсного потока. Наличие крупных капель приводит к тому, что они оседают на стенках трубопровода и не доходят до потребителя в конце транспортной цепочки.

В настоящее время применяется несколько способов ввода одоранта в поток газа [3]: капельный, применением фитильного одоризатора, барботажный, при помощи форсуночных дозаторов. В системах транспортировки газа наибольшее распространение получили высокопроизводительные форсуночные распылители, недостатками которых являются относительно высокая разноразмерность капель в потоке, большие их размеры и высокая вероятность появления отложений на стенках каналов форсунки, что снижает производительность подачи одоранта и может создать перебои в его транспортировке. Также использование форсунок не позволяет осуществлять тонкую регулировку производительности, что важно для систем малой и средней мощности.

На основании изложенного разработка альтернативных указанным выше методам систем подачи одоранта малой и средней мощности с возможностью тонкой регулировки количества подаваемого вещества и поддержанием максимально возможной монодисперсности фонтана капель является актуальной задачей.

Основная часть

В промышленности применяются различные способы распыления технологических и эксплуатационных жидкостей: гидравлический, механический, пневматический, электростатический, термоиспарительный и ультразвуковой. Первые четыре способа не решают задачу получения равномерного монодисперсного фонтана с минимальным размером капель и возможностью оперативной регулировки его параметров.

В ООО Завод «Газпроммаш» (г. Саратов) предложено устройство подачи одоранта на основе специального электроиспарителя [5]. Испаритель обеспечивает получение однородного особо мелкодисперсного фонтана капель, фактически представляющего собой туман, что не достижимо другими известными способами распыления. Тем не менее, недостаток устройства заключается в объективной (по особенностям метода формирования объема микро-

капель) инерционности метода, практически исключающей оперативную регулировку как интенсивности испарения, так и дисперсности капель в потоке. Сверхмалый размер капель может привести к их полному исчезновению к моменту доставки газа потребителю.

При ультразвуковом способе распыления жидкость переходит в аэрозольное состояние за счет увеличения поверхностной энергии пленки жидкости, которое достигается путем наложения на нее механических колебаний высокой интенсивности ультразвуковой частоты (обычно 22-44 кГц). Широкое применение ультразвукового распыления в увлажнителях воздуха и медицинских ингаляторах подтверждает высокую управляемость процесса и надежность с точки зрения отсутствия отверстий малого диаметра, которые могут забиваться эксплуатационными отложениями. Однако, в известных системах не решен вопрос получения микрокапель стабильной размерности [6-15]. Применительно к одоранту не определены оптимальные режимы распыления.

В соответствии с изложенным целью работы явилось исследование влияния частоты ультразвука и конструкции излучающей системы на производительность распыления одоранта и параметры фонтана микрокапель.

Установлено, что удельные энергозатраты быстро возрастают с уменьшением размера частиц. Увеличить долю энергии, затрачиваемой непосредственно на распыление, решить проблемы инженерного характера, стоящие перед распыляющей техникой, позволяют электрофизические способы распыления, к которым относится ультразвуковое (УЗ) распыление в фонтане и слое. Для практической реализации ультразвукового способа распыления в фонтане [6, 7] используют фокусирующие излучатели с резонансной частотой 1-3 МГц в виде вогнутых фокусирующих пьезоэлектрических пластин. Биза, Дирнагель, Эше [6, 14] в результате тщательного исследования процесса УЗ распыления жидкости «в фонтане», предложили свою ги-

потезу механизма процесса – капиллярно-волновую. Согласно этой гипотезе, капли аэрозоля образуются из гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды, которые возникают на поверхности струи фонтана. Вторым механизмом распыления жидкостей под действием ультразвуковых колебаний является «распыление в слое», которое происходит при дроблении тонкого слоя (пленки) жидкости, распределенной по поверхности ультразвукового излучателя под действием пульсаций давления, возникающих при высокочастотном возвратно-поступательном его движении. При этом одним из основных параметров, влияющих на интенсивность процесса УЗ распыления, является толщина слоя жидкости [6, 10-12]. Считается [6, 15], что толщина слоя жидкости для обеспечения эффективного распыления в зависимости от ее вязкости должна находиться в диапазоне 0,1-0,8 мм (большие значения соответствуют меньшей вязкости жидкости). Применительно к теме настоящих исследований применение способа распыления в слое может считаться более целесообразным по сравнению с распылением в фонтане, т. к. при этом практически исключается (при условии одномоментного распыления дозы) сдувание остаточного объема одоранта потоком газа, что может формировать крайне неоднородное распределение капель по размеру, а также вызывать неполное смешивание из-за частичного оседания тяжелых и крупных капель на стенках газопровода.

В соответствии с изложенным в исследованиях использовали метод «распыления в слое». С учетом опасности одоранта эксперименты проводились на модельных жидкостях: вода техническая ГОСТ Р 53128-2003 и спирт этиловый ГОСТ Р 55878-2013. Последний в наибольшей степени соответствует одоранту по плотности и вязкости. Подача жидкости осуществлялась при помощи медицинской капельницы. Разовую дозу жидкости устанавливали равной 0,05, 0,2 и 0,5 мл.

С целью определения оптимальных параметров ультразвукового воздействия

на жидкость применяли две стандартных частоты ультразвука – 22 и 44 кГц. Использовали пьезокерамические электромеханические преобразователи на базе колец ЦТС-19 с размерами $\varnothing 52 \times \varnothing 22 \times 8$ мм.

Для лабораторных исследований применяли установку со сменными электромеханическими преобразователями (рис. 1). Концентратор-распылитель изготовлен из сплава Д16Т, обладающего наименьшим акустическим сопротивлением из конструкционных сплавов. Активная накладка колебательной системы на 22 кГц изготовлена также из данного материала, активная накладка системы на 44 кГц – из титанового сплава ВТ-3-1. Питание преобразователей осуществлялось от макета ультразвукового генератора с частотой, программируемой при помощи ноутбука в диапазоне 20-60 кГц, максимальной мощностью 400 Вт. Тонкая настройка системы в резонанс осуществлялась кнопчным регулятором с дискретностью 10 Гц. Устанавливаемая в эксперименте мощность сигнала генератора – 100 Вт.

Использовали концентраторы с дисковыми распылителями диаметром 40 мм (рис. 1 а и б) и ступенчатые стержневого типа с диаметром выходной ступени, равным 14 мм. При установленной мощности генератора и в условиях резонанса амплитуда колебаний дисковых распылителей составила 3-8 мкм, стержневых – 12-14 мкм. Ступенчатые стержневые концентраторы были выполнены двух типов: гладкий и с двухзаходной спиральной канавкой в предположении, что наличие канавок-завихрителей может способствовать повышению равномерности фонтана микрокапель. Кинетику распыления фиксировали на цифровую видеокамеру. Из видеоряда вырезали изображения, в большей степени характеризующие особенности процесса распыления. Также по таймеру, встроенному в видеоряд, определяли продолжительность распыления от первичного образования фонтана до полного прекращения регистрации капель. Фиксировали скорость (производи-

тельность) распыления в мл/с, как отношение объема разовой дозы ко времени распыления, определенному по таймеру.

Дополнительно оценивали плотность и размеры фонтана в каждом варианте эксперимента.



а



б

Рис. 1. Лабораторный макет для изучения ультразвукового распыления с преобразователем с расчетной частотой 22 кГц (а).
Насадка с преобразователем с расчетной частотой 44 кГц (б)

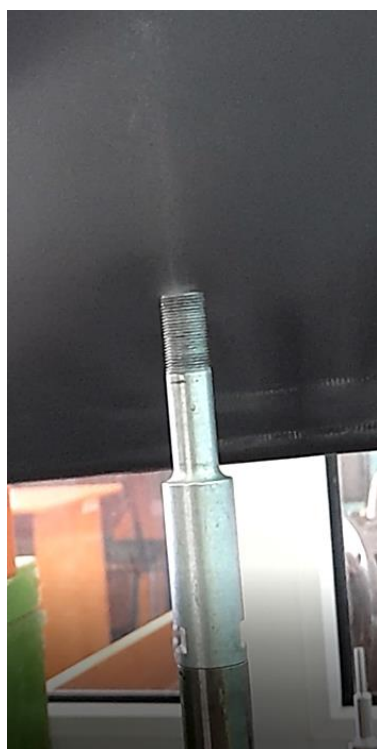
Для фиксирования капель применяли способ их осаждения на поверхность стеклянной пластинки, предварительно покрытой тонким слоем масла смазочного бытового ГОСТ 20799-88. Размер капель определяли по микрофотографиям, полученным в проходящем свете при помощи цифрового микроскопа Bresser LCD 50×-2000× при увеличениях $\times 40$ и $\times 400$ в сопоставлении со шкалой линейки. Окончательно размер капель, осажденных в слое масла, опреде-

ляли по программе Grafula, в которой составляли список их размеров и проводили статистическую обработку.

Результаты экспериментов по определению эффективности гладкого ступенчатого концентратора и концентратора с двухзаходной спиральной канавкой представлены в табл. 1 и на рис. 2-4. При помощи ступенчатых концентраторов осуществляли распыление воды.

Таблица 1 – Зависимость скорости распыления (мл/с) от конструкции концентратора и дозы жидкости

Тип концентратора	Доза распыления, мл		
	0,05	0,2	0,5
Ступенчатый гладкий	0,1	0,2	0,15
Ступенчатый с двухзаходной спиральной канавкой	0,2	0,2	0,17



а



б



в

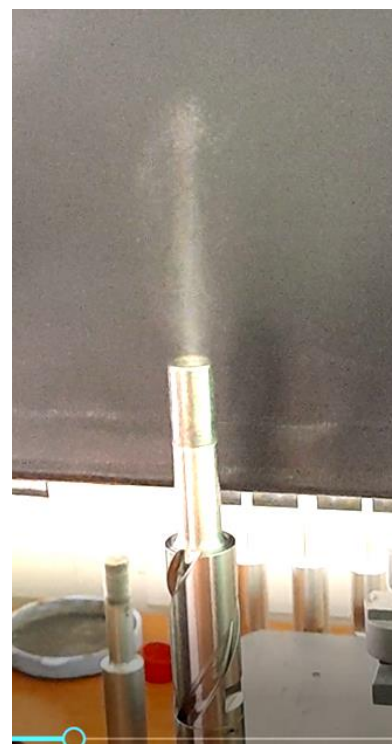
Рис. 2. Распыление объема воды 0,05 мл (а), 0,2 мл (б) и 0,5 мл (в) ступенчатым гладким концентратором



а



б



в

Рис. 3. Распыление объема воды 0,05 мл (а), 0,2 мл (б) и 0,5 мл (в) ступенчатым концентратором с двухзаходной спиральной канавкой

В ходе экспериментов по ираспылению воды с использованием ступенчатых стержневых концентраторов отмечены следующие особенности:

1. Фонтан строго ориентирован вдоль оси инструмента.

2. При больших (в исследованном диапазоне) дозах наблюдается явное постепенное развитие процесса – среднее по интенсивности распыление в первый момент воздействия ультразвука, максимальная плотность и размеры фонтана в первую треть периода с дальнейшим спадом интенсивности, эффект в большей степени выражен для концентраторов со спиральной канавкой.

3. При малых и средних (в исследованном диапазоне) дозах происходит максимальное распыление в первый момент воздействия ультразвука, далее процесс затухает.

4. В период максимальной интенсивности распыления фонтан имеет выраженную неоднородность плотности – зафиксирована узкая весьма плотная струя вдоль оси фонтана и разряженное облако по периферии, сечение облака при этом по крайней мере на порядок больше, чем у центральной струи.

5. Наличие спиральной двухзаходной канавки способствует появлению фокусирующего эффекта и ускорению микрокапель в потоке, что особо проявляется при больших дозах распыления (рис. 3 в), при этом высота фонтана, формируемого гладким концентратором, составляет 90-100 мм, концентратором со спиральной канавкой – 120-150 мм.

6. Фонтан, сформированный концентратором со спиральной канавкой, состоит по преимуществу из более крупных капель, чем при использовании гладкого инструмента, на вершине фонтана отмечается консолидация отдельных капель в грибообразный массив.

Производительность распыления экстремально зависит от разовой дозы жидкости для обоих типов концентраторов, максимальная производительность зафиксирована при дозе 0,2 мл и составляет 0,2 мл/с

с дальнейшим снижением на 25-15%. По видимому это связано с превышением оптимальной толщины слоя жидкости, который представляет собой достаточно объемную каплю при использующейся схеме подачи (рис. 4), не растекающуюся по торцевой поверхности распылителя. Это приводит к постепенному развитию процесса: сначала – малоинтенсивное распыление, далее толщина слоя становится оптимальной, и происходит взрывной выброс вещества, и, наконец малоинтенсивное распыление оставшейся жидкости, толщина слоя которой значительно меньше оптимальной.

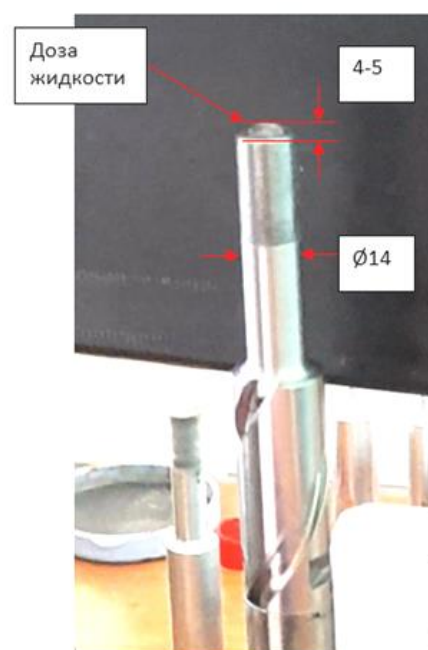


Рис. 4. Размер максимальной дозы жидкости на торце концентратора

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что использование стержневых ступенчатых концентраторов не целесообразно в системах ультразвуковой одоризации по причине концентрации капель в узкой струе, что не обеспечит равномерного их распределения в потоке. В случае концентраторов со спиральной канавкой еще одним препятствием к применению может явиться чрезмерно большой размер капель в вершине грибообразного фонтана, что нарушает равномерность распределения одоранта в потоке газа.

Результаты исследования процесса распыления воды и спирта дисковыми инструментами при использовании частот

ультразвука 22 и 44 кГц представлены в табл. 2 и на рис. 5-7.

Таблица 2 – Скорость распыления вещества (мл/с) в зависимости от дозы и частоты ультразвука

Распыляемое вещество	Доза распыления, мл			
	0,05		0,2	
	22 кГц	44 кГц	22 кГц	44 кГц
Вода техническая	0,1	0,1	0,067	0,15
Спирт этиловый	0,2	0,23	0,1	0,2



а



б

Рис. 5. Распыление дозы спирта объемом 0,2 мл при частоте 22 кГц (а) и 44 кГц (б)

Фактическая резонансная частота ультразвуковых колебаний, определенная по диалоговому окну монитора ноутбука программирования ультразвукового генератора, составила 24,8 кГц и 43,5 кГц.

В ходе экспериментов по распылению воды и спирта с использованием концентраторов с дисковым распылителем отмечены следующие особенности:

1. При малых, средних и больших дозах жидкости (в исследованном диапазоне) формируются объемные фонтаны мелкодисперсных капель типа тумана в целом неправильной формы и не имеющие выраженной симметричности отно-

сительно оси концентратора, проявляется чувствительность к движениям воздуха в помещении, что приводит к смещению облака частиц и его деформации.

2. Как для воды, так и для спирта отмечается аналогичная отмеченной для стержневых концентраторов тенденция увеличения интенсивности распыления при росте дозы до значения 0,2 мл с последующим снижением, что проявляется в увеличении времени, потребного на распыление, а визуально – в уменьшении плотности фонтана.

3. На частоте 44 кГц отмечается значимое увеличение скорости (производительности) распыления воды и спирта, в боль-

шей степени выраженное (практически в 2 раза) при дозе 0,2 мл.

4. При оптимальной дозе (0,2 мл) высота (протяженность) фонтана воды при распылении на частоте 22 кГц составляет 20-25 мм, спирта 30-40 мм. При дозах 0,05 мл соответственно – 10-15 мм и 25-30 мм.

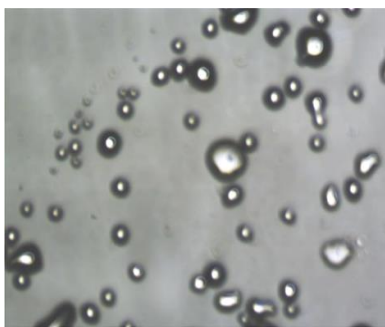
5. На частоте 44 кГц при дозе 0,2 мл высота фонтана спирта достигает 90-110 мм, при увеличении дозы высота незначительно снижается.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что использование концентраторов с дисковым распылителем формирует объемный и в целом равномерный по плотности фонтан микрокапель, что позволяет использовать данную

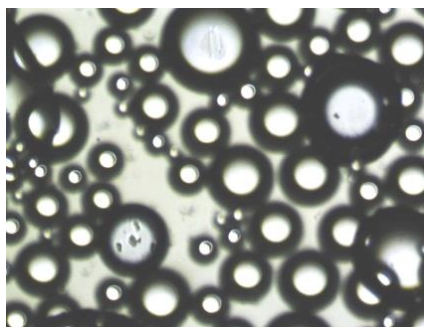
схему в устройствах одоризации газа при условии обеспечения необходимой производительности распыления, обеспечивающей 100 % распыление дозы вещества.

Наибольшую эффективность по производительности и протяженности фонтана обеспечивает применение ультразвуковых колебаний частотой 44 кГц.

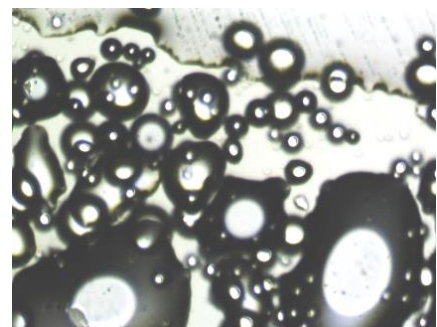
Для определения размера микрокапель установлено соответствие 2048 пикселей изображения 1-му мм при разрешении микроскопа $\times 40$. Типичные изображения микрокапель, зафиксированных в слое масла, полученных при распылении спирта с различными амплитудами и частотами, показаны на рис. 6 и 7, результаты статистической обработки распределения размеров – в табл. 3.



а



б

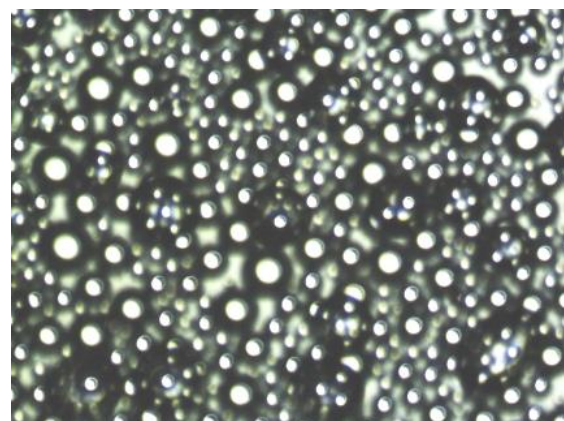


в

Рис. 6. Изображения микрокапель, полученных ультразвуковым распылением тонкого слоя спирта при частоте 24,8 кГц: $A = 3$ мкм (а), $A = 5$ мкм (б), $A = 8$ мкм (в).
Поле зрения по горизонтали – 1 мм



а



б

Рис. 7. Изображения микрокапель, полученных ультразвуковым распылением тонкого слоя спирта при частоте 43,5 кГц: $A = 3$ мкм (а), $A = 8$ мкм (б).
Поле зрения по горизонтали – 1 мм

Таблица 3 – Математическое ожидание и коэффициент вариации размеров микрокапель в зависимости от режимов ультразвукового распыления (объем выборки 30-34 размера)

Частота колебаний преобразователя, кГц	Амплитуда, мкм	Математическое ожидание, мм	Коэффициент вариации, %
24,8	3	0,25	4,7
	5	0,33	3,85
	8	0,39	13,5
43,5	3	0,024	0,96
	8	0,027	0,43

Видно, что с увеличением амплитуды колебаний на обеих используемых частотах наблюдается увеличение размеров микрокапель. При этом на резонансной частоте 24,8 кГц средний размер капель при увеличении амплитуды с 3 до 8 мкм возрастает более чем на 50 % и коэффициент вариации размеров – практически в 3 раза, что свидетельствует о росте неоднородности сформированного фонтана. При малых амплитудах (3 мкм) хотя коэффициент вариации минимален, но мала производительность распыления, что выражается в меньшей плотности фонтана и, соответственно, в меньшем количестве зафиксированных микрокапель в поле зрения.

Картина распыления резко меняется с увеличением частоты колебаний. Хотя сохраняется тенденция возрастания среднего размера капель с увеличением амплитуды, но оно незначительно – (12-13) %. В то же время размеры микрокапель при всех принятых в эксперименте амплитудах на порядок меньше, чем при частоте 24,8 кГц. Коэффициент вариации размеров также на порядок меньше, т.е. фонтан значительно более однороден по составу. Одновременно плотность фонтана также значительно выше, что соответствует отмеченной ранее большей производительности распыления и проявляется в высокой плотности заполнения поля зрения микроскопа микрокаплями.

Полученные результаты хорошо согласуются с известными особенностями механизмов ультразвукового распыления [6, 7, 14]:

– воздействие ударных волн, образующихся в результате захлопывания кавитационных полостей у поверхности раздела: жидкость – газ;

– отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности полусферических выступов, образованных парогазовыми пузырьками, пульсирующими у поверхности жидкости;

– отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности жидкости при отсутствии парогазовых кавитационных пузырьков.

Первый из этих механизмов реализуется при высокой интенсивности ультразвука, определяемой большими значениями амплитуд колебаний излучателя, и приводит к образованию крупных капель-брызг, диаметр которых на порядки больше диаметра капель, образующихся из капиллярных волн. Второй и третий механизмы характерны при использовании ультразвука средней и малой интенсивности, при которой величина амплитуды колебаний излучателя не приводит к интенсивной кавитации с образованием и схлопыванием микропузырьков во всем объеме слоя жидкости, а они сосредотачиваются только в тонком слое, непосредственно покрывающем поверхность излучателя. Следовательно, амплитуду ультразвуковых колебаний необходимо ограничивать на уровне, при котором только поверхность преобразователя покрыта слоем кавитационных пузырьков. Как правило, толщина

такого слоя много меньше толщины слоя озвучиваемой жидкости. В нашем случае это – 5 мкм для резонансной частоты 22 кГц и 5-8 мкм для 44 кГц.

Заключение

Ультразвуковое распыление модельных жидкостей (вода и этиловый спирт) обеспечивает в лабораторных условиях формирование требуемых параметров фонтана микрокапель.

Наибольшая интенсивность распыления обеспечивается при помощи ступенчатых стержневых инструментов-концентраторов с двухзаходной спиральной канавкой, работающих в режиме завихрителя. Однако, их использование не целесообразно по причине узкой фокусировки фонтана и локализации максимального распыляемого объема вблизи осевой струи, что не обеспечивает равномерного

стабильного распределения по объему потока газа. В осевой струе и на вершине фонтана образуются крупнодисперсные капли и их скопления, что также не обеспечивает равномерного одорирования.

При использовании дисковых распылителей обеспечивается объемный относительно равномерный плотный фонтан мелкодисперсных капель. При этом максимальная производительность распыления и протяженность фонтана отмечается при использовании частоты 44 кГц.

Использование частоты 44 кГц предпочтительнее при практической реализации ультразвукового распыления одоранта поскольку позволяет по сравнению с частотой 22 кГц повысить производительность до 2 раз, снизить разброс размеров капель в фонтане в 10 раз, а также уменьшить средний размер капли практически в 10 раз.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. <https://stavropol-tr.gazprom.ru/press/proekt-azbuka-proizvodstva/odorizatsiya-gaza/>
2. <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/556397-odorizatsiya-gaza/>
3. <https://sovet-ingenera.com/gaz/safety/odorant-prirodnogo-gaza.html>
4. http://www.gazprommash.ru/factory/vestnik/vestnik1/vestnik_st6/
5. Патент RU № 2730333 «Испаритель одоранта», МПК G05D 7/00, F17D 1/02, B01F 3/02. Опубл. 21.08.2020, бюл. № 24.
6. Ультразвуковое распыление жидкостей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова и др. Барнаул: АлтГТУ, 2010. 228 с.
7. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин и др. Барнаул: АлтГТУ, 2010. 196 с.
8. **Экнадиосянц О.К.** Получение аэрозолей. Физические основы ультразвуковой технологии. Москва: Наука, 1970.
9. **Майер Е.В.** Простые опыты с ультразвуком. Москва: Наука, 1978. 160 с.
10. Физика и техника мощного ультразвука. Т. I. Источники мощного ультразвука / под ред. Л.Д. Розенберга. Москва: Наука, 1967. 380 с.
11. Физика и техника мощного ультразвука. Т. II. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. Москва: Наука, 1968. 269 с.
12. Физика и техника мощного ультразвука. Т. III. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. Москва: Наука, 1970. 688 с.
13. Экнадиосянц О.К. О роли кавитации в процессе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане // Акустический журнал. 1968. № 14. Вып. 1. С. 107.
14. **Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова А.В.** Ультразвуковое распыление жидкостей. Барнаул: АлтГТУ, 2010. 272 с.
15. Разработка высокочастотных ультразвуковых колебательных систем для мелкодисперсного распыления жидкостей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, М.В. Хмелев и др. // Ползуновский вестник. 2010. № 3. С. 315-320.

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., научный сотрудник лаборатории специального органического синтеза отдела тонких органических технологий НИЦ «Курчатовский институт»

Огурцов Константин Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., начальник группы инновационных разработок ООО Завод «Газпромаш»

Nikolaj.V. Bekrenev – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina V. Zlobina – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Research Fellow at the Laboratory of Special Organic Synthesis of the Department of Fine Organic Technologies, National Research Centre at Kurchatov Institute

Konstantin N. Ogurtsov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Head: Innovative Development Group of LLC Gazprommash Plant

Статья поступила в редакцию 21.05.24, принята к опубликованию 12.06.24

УДК 621.791, 621.365.52, 621.794.61

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СВАРНОЙ «СТАЛЬ – ТИТАНОВОЙ» КОНСТРУКЦИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ТВЧ

И.С. Егоров, А.В. Войко, А.А. Фомин

NUMERICAL SIMULATION OF THE HEATING PROCESS OF A WELDED “STEEL – TITANIUM” STRUCTURE DURING HEAT TREATMENT OF HIGH-FREQUENCY CURRENTS

I.S. Egorov, A.V. Voiko, A.A. Fomin

Комбинированные конструкции системы «сталь – титан» широко применяются в промышленности. Для этой цели применение контактной сварки можно считать достаточно перспективным. Улучшить качество таких соединений можно за счет индукционной термообработки. В настоящем исследовании представлены результаты численного моделирования процесса индукционной термообработки биметаллических изделий, структура которых содержит основу из быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 и защитное покрытие из технического титана.

Ключевые слова: токи высокой частоты, быстрорежущая инструментальная сталь, технический титан, термообработка, слоистая структура

Введение

Биметаллическая структура, представляющая собой систему «сталь – металл с высокой стойкостью к воздействиям окружающей среды» применяется в авиастроении, в энергетической, инструментальной и других областях промышленности. Титан и титановые сплавы, а также высоколегированные стали обладают высокой прочностью и теплостойкостью, эти особенности материалов позволяют применять их в инструментальной промышленности, для производства металлорежущих инструментов. Однако комбинирование разнородных металлов поз-

Combined structures of the steel-titanium system are widely used in industry. For this purpose, the use of resistance welding can be considered quite promising. The quality of such compounds can be improved through induction heat treatment. This study presents the results of numerical modeling of the process of induction heat treatment of bimetallic products, the structure of which contains a base made of high-speed tool steel R6M5 and a protective coating of commercially pure titanium.

Keywords: high frequency currents, high-speed tool steel, commercially pure titanium, heat treatment, layered structure

воляет получить системы, обладающие характеристиками, превосходящими исходные металлы. В свою очередь, проблема в том, что соединение разнородных материалов является сложной задачей, однако актуальной, так как традиционные металлургические методы исчерпывают себя и не обладают высокой эффективностью в решении износостойкости и теплостойкости.

Согласно известным источникам, титан способен образовывать твердые растворы с рядом металлов (Mo, Ta, Nb, W, V), что способствует повышению его прочностных свойств. Для железоуглеродистых сплавов,

применяются такие элементы (Co, Mn, Cu, Ag), которые способны при соединении изменять технологические и химические свойства сплава. Данный пример показывает, что для образования высококачественного соединения титана и железа нужно применять промежуточные слои из металлов, предрасположенных к образованию качественного соединения [1]. Основным из подходящих методов соединения стали и титана является сварка давлением, в частности сварка трением и взрывом, диффузионная сварка, сварка оплавлением, а именно контактная сварка.

Затруднение, возникающее при формировании качественного сварного соединения титана со сталью, является склонность этих металлов при взаимодействии образовывать хрупкие фазы. Одним из эффективных методов улучшения сварного соединения титана с различными металлами и предотвращения образования дефектов в сварной зоне является использование медной или медно-ванадиевой фольги в качестве промежуточного слоя [2]. Сварочные процессы диффузионного типа, которые заключаются в применении высокого давления с высокотемпературным воздействием применяется для образования соединения между сплавом Ti-6Al-4V и сталью AISI 316L [3]. Также соединение между листами титанового сплава TA15 полученное методом дуговой сварки TIG, подвергается улучшению за счет сварки трением с перемешиванием [4]. Применение предварительного прогрева нержавеющей стали 316L позволяет обеспечить высокую прочность сварного соединения (до 310 МПа) [5]. В месте образованного соединения титана с разнородными для него материалами регистрируют наличие интерметаллидной фазы (Cr_2Ti , FeTi , Fe_2Ti , и другие).

Контактная точечная сварка (КТС), применяется для формирования соединения между нержавеющей сталью и нитинолом Ni55Ti45 [6]. Такой тип соединения достаточно прочный и при испытании на растяжение достигает 435 Мпа. Впоследствии процесса холодной вытяжки изменяется микроструктура соединения после термического

воздействия и повышается микротвердость. Описанный метод сварки позволяет достичь высокого качества соединения между разнородными материалами, но, необходимо строго соблюдать технологические параметры, а именно величину рабочего тока и время воздействия. Еще одним из доказательств правильности применения КТС является широкое применение в автомобилестроении, где прочность и безопасность напрямую связаны с прочностью соединения. Широкое применение обусловлено относительной простотой, высокой скоростью сваривания, а также легкостью автоматизации.

Одним из возможных способов улучшения качества и характеристик сварного соединения стали с титаном является применение термической обработки. Однако применения КТС для соединения титана со сталью остаётся мало затронутым и мало изученным. В качестве метода повышения прочности и твердости малогабаритных изделий из технического титана, хорошо себя проявила термообработка ТВЧ [7-10]. В связи с ранее описанным в этой работе представлен вариант образования биметаллической системы для применения в инструментальной области. Объектом исследования являются сменные режущие пластины для металлообработки, чья структура состоит из инструментальной стали Р6М5, защитного приваренного покрытия из титана BT1-0 и металлооксидного слоя на поверхности титана который образуется в течение выдержки при высоких температурах. Так в данной работе изучен процесс воздействия ТВЧ на нагрев стальной основы с титановым покрытием.

Методика и техника эксперимента

Геометрия образцов, полученных точечной контактной сваркой, представляла собой квадратные пластины со стороной равной 10,5 мм, толщиной 3,8 и 4,1 мм в зависимости от толщины наносимого титанового покрытия. Материалом для основы пластин служила быстрорежущая инструментальная сталь Р6М5. Данная сталь относится к высокоуглеродистым легированным

сталлям с содержанием углерода 0,8-0,88 %, также в ее состав входят легирующие элементы: W, Mo, V, Cr. Покрытие представляло собой квадратную пластину 10,5×10,5 мм из технического титана толщиной 0,5 мм.

Модификация системы «сталь – титан» для образования оксидного слоя на поверхности проводилась за счет термообработки ТВЧ, проводимой в открытой атмосфере воздуха. Температурный диапазон выдержки составил 1250 ± 50 °С при продолжительности не более $t = 300$ с.

Геометрические параметры индуктора соответствовали форме нагреваемых образцов и имели вид цилиндрической спирали с числом витков $w = 3$. Данная конструкция обусловлена необходимостью равномерного распределения плотности тока. Индуктор выполнен из медной трубки, по внутреннему каналу которого циркулирует вода для сохранения низкой температуры индуктора и исключения перегрева в течение длительной выдержки образца при высокой температуре.

Моделируемая система включала в себя, помимо воды и воздушной атмосферы, кера-

мическое основание для размещения обрабатываемого изделия в поле индуктора. Для нагрева ТВЧ заготовки в данной системе применяется медный трубчатый индуктор (поз. 3) с внешним диаметром трубки 6 мм и внутренним 4,5 мм (рис. 1 а). Размеры обрабатываемого изделия достаточно малы, в виду чего изготовление индуктора в его соответствии технологически сложно и не целесообразно. Поэтому принято решение для обработки изделия квадратной формы применить цилиндрическую конфигурацию индуктора со следующими габаритными размерами: внутренний диаметр $D_{\text{н}} = 21$ мм, наружный диаметр $D_{\text{в}} = 33$ мм, высота $h_{\text{инд}} = 22,5$ мм. В установленные размеры вписывались три витка с межвитковым расстоянием в 0,75 мм. В центральной части индуктора размещалось керамическое основание (поз. 5) с центрирующим выступом, на котором размещалась сталь-титановая пластина в центре активной зоны воздействия индуктора. На 2D модели пластина выполнена в виде ассиметричного прямоугольника, соответствующая ломаному разрезу (рис. 1 б, поз. 6).

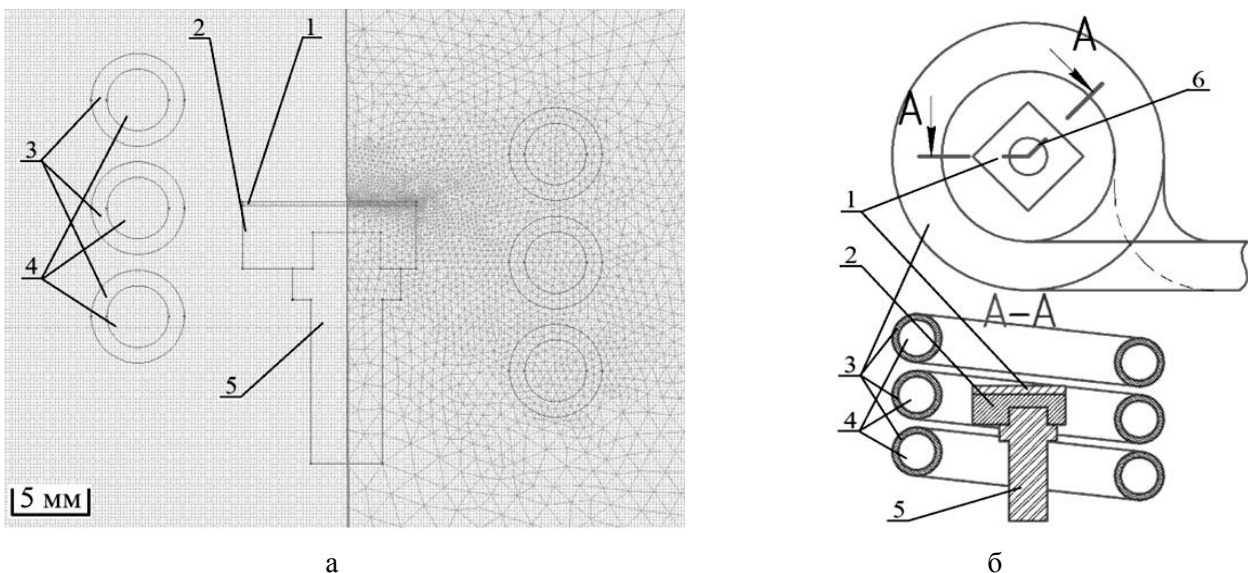


Рис. 1. Геометрическая модель (а) с указанием основных элементов, в левой части которой показано разбиения системы на конечные элементы: 1 – титановое покрытие; 2 – стальная основа; 3 – индуктор; 4 – охлаждающая жидкость; 5 – керамическая опора; схема расположения детали в индукторе (б) и сечение «сталь – титановой» пластины по ломаному разрезу 6

Ассиметричная конфигурация позволяет определить влияния модифицирующей тер-

мообработки ТВЧ на разноудаленные от индуктора части изделия. Анализ темпе-

ратуры сталь-титановой сборки осуществлялся по центрам двух боковых граней. В материале пластины, а именно в титане глубина скин-слоя не превышала 2 мм при заданной частоте переменного тока $f = 80$ кГц. Но в тоже время глубина скин-слоя в стальной основе почти в 10 раз меньше, чем в титановой пластине до температуры перехода в парамагнитное состояние.

На границах блоков задавались параметры теплоотдачи (тепловые потери на конвекцию и излучение), а также на внутренней границе индуктора с водой задавались условия интенсивного конвективного охлаждения. Показатели электро- и теплофизических характеристик материалов зависят от температуры, поэтому для корректного расчета стационарной температуры осуществлялся расчет для высокотемпературной области. Ток индуктора $I_{\text{инд}}$ в заданной системе определялся для индуктора в диапазоне от 1,7 до 2,3 кА. Тип соединения токоведущих элементов системы (витков индуктора в 2D модели) являлся последовательным. Задавались также граничные условия: тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на электропроводящих поверхностях ($H_{\tau} = 0$ А/м) и величина потенциала магнитного поля на границе расчетной области ($A_0 = 0$ Вб/м).

В соответствии с особенностью термообработки ТВЧ при компьютерном эксперименте для решения задачи нестационарной теплопередачи устанавливалась продолжительность моделирования $t = 300$ с (шаг расчетных точек выбирался не реже $\Delta t = 5$ с). Устанавливалось момент времени t , в момент которого и далее зависимость $T(I, t) \rightarrow T_{\text{max}}$ остаётся практически постоянной. Для продолжительной выдержки при необходимой температуре определялась величина тока индуктора.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

При решении задачи электродинамики требовалось определить характер распределения и графическое решение в виде изображений с линиями уровня скалярных величин: плотности токов j и объемной плотности выделения джоулевого тепла Q .

Одним из результатов решения краевой задачи электродинамики было определение распределения плотности тока (рис. 2), которое во всех задаваемых режимах имело схожий для всех режимов, характер проявления. Наибольшая плотность сконцентрирована на внутренней части витков индуктора, в то время как в нагреваемом изделии увеличивалось от центра к краям, но не достигала высокого значения.

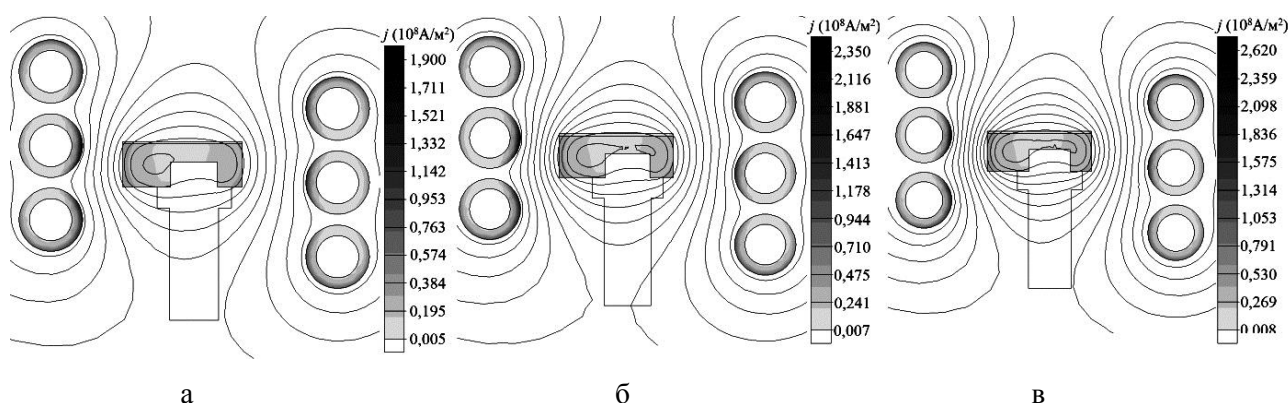


Рис. 2. Изображение полей распределения плотности тока j для стальной основы, с титановым покрытием $I_{\text{инд}} = 1,8$ кА (а), $I_{\text{инд}} = 2,1$ кА (б); $I_{\text{инд}} = 2,4$ кА (в)

Картина распределения тепловыделений (рис. 3) в системе схожа с расположением плотности тока. Наибольшее количество тепла выделялось на внешних краях заго-

товки, и снижалось к её центру, на индукторе наибольшее тепловыделение концентрировалось на внутренней части и было незначительным.

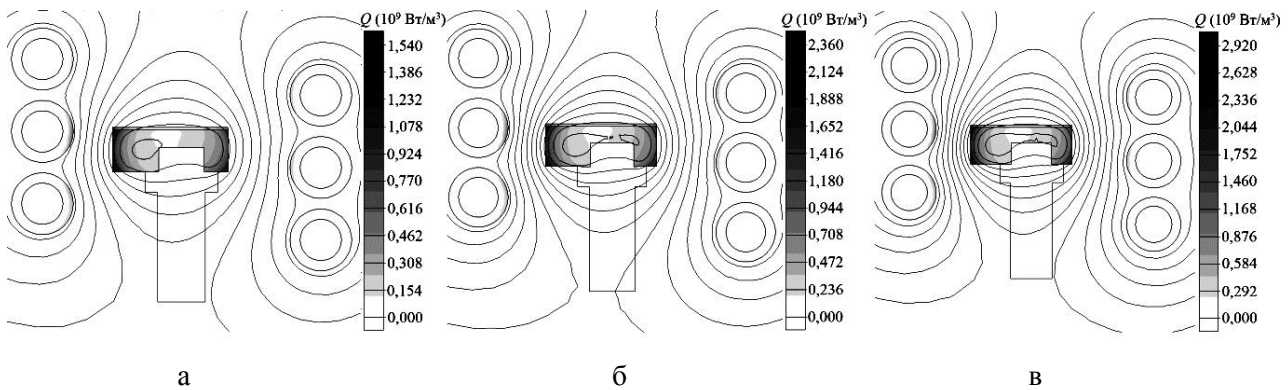


Рис. 3. Изображение полей распределения тепловыделения Q для стальной основы, с титановым покрытием $I_{\text{инд}} = 1,7$ кА (а), $I_{\text{инд}} = 2,1$ кА (б), $I_{\text{инд}} = 2,3$ кА (в)

Согласно полученным изображениям полей распределения при воздействии ТВЧ на стальную пластину толщиной 3,8 мм и покрытия 0,5 мм с током индуктора $I_{\text{инд}} = 1,7$ кА плотность тока на боковых гранях стальной пластины достигла $j = 0,4 \times 10^8$ А/м², а тепловыделение соответствовало $Q = 1,3 \times 10^9$ Вт/м³. При токе индуктора $I_{\text{инд}} = 2,1$ кА плотность тока составила $j = 0,5 \times 10^8$ А/м² при тепловыделении $Q = 2,0 \times 10^9$ Вт/м³. Решение задачи при токе индуктора $I_{\text{инд}} = 2,3$ кА соответствовало $j = 0,55 \times 10^8$ А/м² и $Q = 2,5 \times 10^9$ Вт/м³. Максимальные значения плотности тока дости-

гались на внутренней поверхности витков индуктора от $1,7$ до $2,4 \times 10^8$ А/м² при тепловыделении от $0,44$ до $0,84 \times 10^9$ Вт/м³ соответственно.

На эпюрах распределения температуры наблюдался выраженный нагрев обрабатываемого изделия и керамической центрирующего основания ввиду теплопередачи от обрабатываемого изделия (рис. 4). Вследствие этого часть тепловыделения из стальной основы с покрытием стекала в керамику, вызывая температурную разницу центральной части относительно боковых граней.

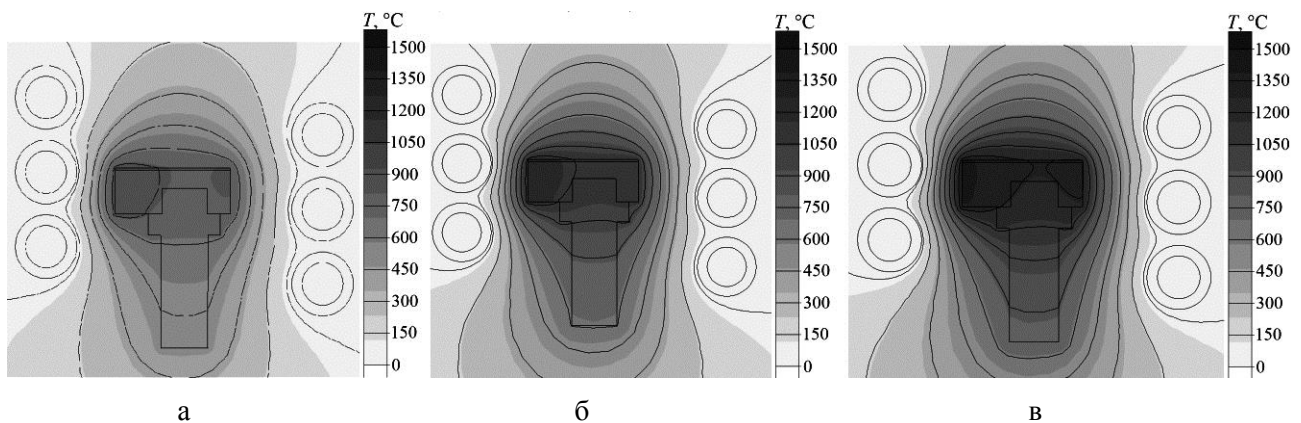


Рис.4. Изображения полей распределения температуры T для стальной основы, с титановым покрытием $I_{\text{инд}} = 1,7$ кА (а), $I_{\text{инд}} = 2,1$ кА (б), $I_{\text{инд}} = 2,3$ кА (в)

Анализ термодинамических кривых нагрева боковой грани и центра боковой стороны изделия (рис. 5) показал, что, имеет место разность скоростей нагрева и максимальных значений температур в разно удаленных от индуктора участках изделия.

При токе индуктора $I_{\text{инд}} = 1,7$ кА (рис. 5, кривые 3,3*) боковая грань прогревается до температуры 910 °С за 33-35 с, а боковая сторона в центре изделия до 900 °С за 55-57 с и держится на данной отметке на протяжении всей термообработки. Термообработка ТВЧ при токе индуктора $I_{\text{инд}} = 2,1$ кА (рис. 5,

кривые 2,2*) обеспечивает прогрев боковой грани (вершины пластины) до 1240 °С, а боковой стороны до 1200 °С, при этом скорость нагрева до максимальной температуры не

превышает 33-35 с. В свою очередь повышение тока до 2,3 кА приводит к нагреву боковой грани до температуры 1390 °С и центра боковой стороны до 1370 °С за 44-45 с.

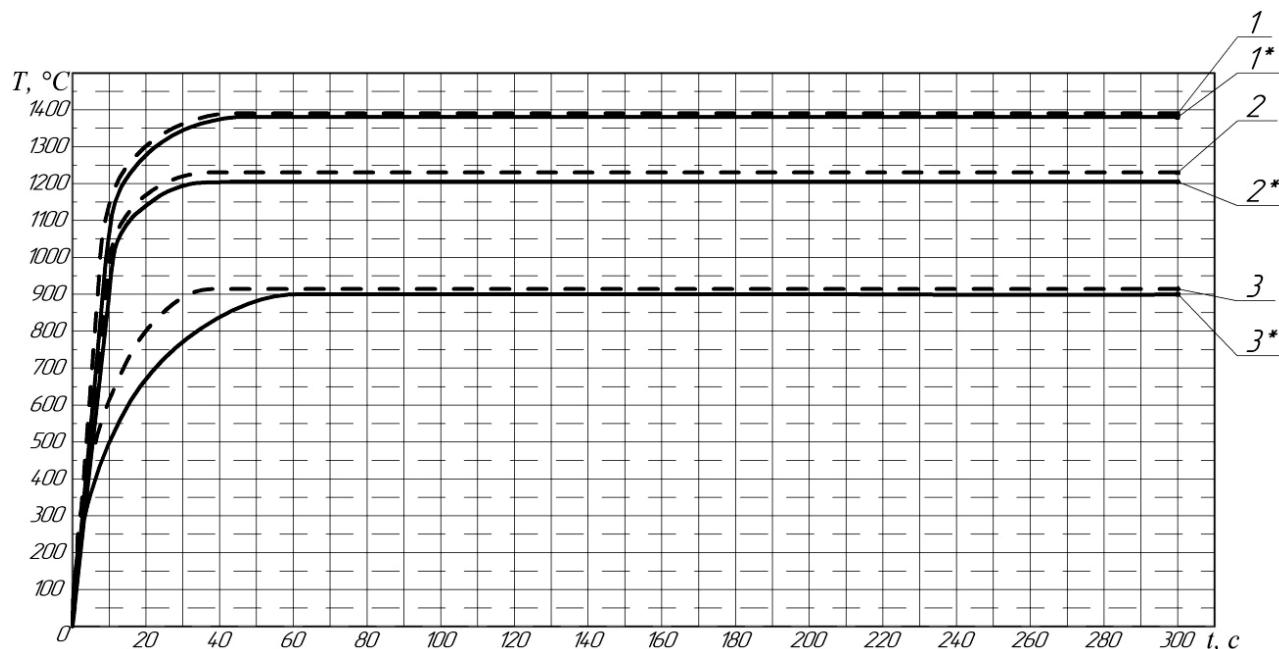


Рис. 5. Динамика нагрева и максимальная температура выдержки стальной основы, с титановым покрытием 0,5 мм: 1, 1* – левый, правый край пластины ($I_{\text{инд}} = 2,3$ кА); 2, 2* – левый, правый край пластины ($I_{\text{инд}} = 2,1$ кА); 3, 3* – левый, правый край пластины ($I_{\text{инд}} = 1,8$ кА)

Заключение

Установлены численные параметры электродинамических и тепловых процессов при термообработке ТВЧ для модели «индуктор – камера – изделие», которые характеризуют кинетику нагрева образцов системы

«сталь – титан» до характерной температуры 900-910, 1200-1240 и 1370-1390 °С. Согласно полученным значениям, нагрев изделия целесообразно проводить за минимальный временной интервал при токе индуктора $I = 2,1$ кА для достижения температуры модификации T от 1200-1240 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. High strength electron beam welded titanium-stainless steel joint with V/Cu based composite filler metals / T. Wang, B. Zhang, G. Chen, J. Feng // *Vacuum*. 2013. Vol. 94. P. 41-47.
2. Microstructure and mechanical properties of titanium/steel bimetallic joints / Q. Chu, R. Bai, M. Zhang et al. // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 132. P. 330-337.
3. Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between Ti-6Al-4V titanium alloy and AISI316L stainless

- steel using Cu/Nb multi-interlayer / T.F. Song, X.S. Jiang, Z.Y. Shao et al. // *Vacuum*. 2017. Vol. 145. P. 68-76.
4. Microstructures and microhardness for sheets and TIG welded joints of TA15 alloy using friction stir spot processing / X.-W. Yang, W.-Y. Li, H.-Y. Li et al. // *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2018. Vol. 28. № 1. P. 55-65.
5. Akbarimousavi S.A.A., GohariKia M. Investigations on the mechanical properties and microstructure of dissimilar cp-titanium and AISI

316L austenitic stainless steel continuous friction welds // Materials & Design. 2011. Vol. 32. № 5. P. 3066-3075.

6. **Li Q., Zhu Yu., Guo J.** Microstructure and mechanical properties of resistance-welded Ni-Ti/stainless steel joints // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 249. P. 538-548.

7. Structure and mechanical properties of hydroxyapatite coatings produced on titanium using plasma spraying with induction preheating / A. Fomin, M. Fomina, V. Koshuro et al. // Ceramics International. 2017. Vol. 43. № 14. P. 11189-11196.

8. Metal oxide (Ti,Ta)-(TiO₂,TaO) coatings produced on titanium using electrospark alloying and modified by induction heat treatment / V. Koshuro, M. Fomina, I. Rodionov, A. Fomin // Composite Structures. 2018. Vol. 196. P. 1-7.

9. Surface morphology of zirconium after treatment with high-frequency currents / V. Koshuro, M. Fomina, A. Voyko et al. // Composite Structures. 2018. Vol. 202. P. 210-215.

10. Structure of “Chromium steel-base – Ti-coating” and its production by the contact welding / I. Egorov, A. Shchelkunov, A. Fomin, I. Rodionov // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124. P. 081015.

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

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

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

Alexey V. Voiko – Assistant, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Aleksandr A. Fomin – Dr. Sci., Tech., Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.05.24, принята к опубликованию 12.06.24

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.6:621.314

СТРУКТУРА УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ю.В. Гармаш, И.И. Пономарева, А.Е. Рассохин

STRUCTURE OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROL COOLING SYSTEM

Yu.V. Garmash, I.I. Ponomareva, A.E. Rassokhin

Рассмотрена структура системы, охлаждающей двигатель внутреннего сгорания (ДВС), позволяющая изменять температуру охлаждающей жидкости, и самого двигателя при изменении режима его работы. Исследование проведено с целью улучшения эксплуатационных характеристик системы управления, позволяющих улучшить точность поддержания температурного режима ДВС до величин около 1 град., что особенно при высоких оборотах двигателя, заметно влияет на полноту сгорания топлива и на экологию окружающей среды, а также на срок службы ДВС. Стабильность показателей работы ДВС в значительной мере определяется его температурным режимом, которая, в свою очередь, зависит от структуры, точности и надежности работы системы управления охлаждением двигателя внутреннего сгорания

Ключевые слова: управляющая система, двигатель внутреннего сгорания, частота вращения электродвигателя постоянного тока; регулировка воздушного потока, автоматическая регулировка температуры, преобразователь параметров электрической энергии, токсичность отработавших газов

The structure of the cooling system of the internal combustion engine is considered, which allows for adjusting the temperature of the coolant, and accordingly, the internal combustion engine, depending on its operating mode. The main goal of the research is to improve the operational characteristics of the control system, which allows increasing the accuracy of the temperature regime of the internal combustion engine to the values of about 1 deg., which significantly affects, especially at high engine speeds, both completeness of fuel combustion and the environmental ecology, and the service life of the engine itself. Stability of the internal combustion engine performance is largely determined by its temperature, which in turn, depends on the structure and accuracy in control of the cooling system of the internal combustion engine.

Keywords: control system, internal combustion engine, DC motor speed; automatic temperature control, electric energy parameter converter, exhaust gas toxicity

Введение

Как известно из литературы [1-3], рабочая температура (ДВС) автотранспортного средства непосредственно влияет на процесс смесеобразования в цилиндрах ДВС, и, следовательно, как на его коэффициент полезного действия (КПД), так и на экологию окружающей среды (полнота сгорания топлива) и ресурс работы ДВС. Температура охлаждающей жидкости ДВС определяется как климатическими условиями, так и условиями его охлаждения, а также режимом работы двигателя. Система охлаждения ДВС необходима для поддержания теплового состояния ДВС в диапазоне температур, при работе в котором он обеспечивает номинальные характеристики при максимальной долговечности.

Постановка задачи

В современных автотранспортных средствах охлаждение ДВС устроено так, что переключение вентилятора системы охлаждения ДВС осуществляется автоматически в случаях достижения границ заданного техническими условиями диапазона его температур. Причем эти границы зависят от типа автомобиля и ДВС. Так для атмосферных двигателей они обычно лежат в диапазоне 85-95 °С, а для двигателей с наддувом – 95-105 °С. Кроме того, производительность жидкостного насоса (ЖН) системы охлаждения (СО) регулируется пропорционально частоте вращения КВ, так как находится в жесткой связи посредством ременной передачи [4]. Такое построение схемы устройства отличается высокой надежностью работы и безусловной простотой, но оно имеет и очевидный недостаток поскольку вентилятор охлаждения ДВС включается на полную мощность и полностью отключается при температурах, определяемых характеристиками гистерезиса биметаллического датчика температуры. А привод ЖН не способен обеспечить рациональное тепловое состояние ДВС во всем поле эксплуатационных режимов, так как не учитывает текущие температурные параметры деталей и сред, а также режим работы ДВС. Вследствие этого могут возникать обратимые и необратимые

тепловые явления, снижающие надежность, ресурс, пусковые качества, скорость выхода на режим принятия нагрузки и эффективные показатели двигателя [4]. Указанной причиной и обусловлены погрешности в установке температуры переключения датчика в диапазоне около 10 градусов Цельсия [5, 6], что дает избыточный расход топлива, а также к снижает ресурс работы ДВС, кроме того, отрицательно влияет на экологическое состояние окружающей среды [6, 7].

Решение задачи

Выход из данной ситуации можно найти в использовании самостоятельно автоматически подстраивающегося к изменяющимся условиям устройства электропитания вентилятора охлаждения ДВС и электродвигателя привода жидкостного насоса, построенной с применением широко-импульсного (ШИМ) регулирования [8, 9], причем регулятор включается в цепь обратной связи системы управления. Устройство подключает вентилятор охлаждения с небольшой скоростью вращения примерно за 10-15 градусов до достижения ДВС рабочей температуры и увеличивает частоту вращения ротора в процессе прогрева ДВС. Предлагаемый способ охлаждения ДВС позволяет получить, как плавный выход на установленную рабочую температуру ДВС, так и позволяет получить большую точность ее поддержания. Как известно из литературы [10, 11], частота (скорость) вращения якоря двигателя постоянного тока (ДПТ) может быть определена из уравнения:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_E \Phi}, \quad (1)$$

где n – скорость вращения якоря ДПТ и, соответственно, вентилятора, об/мин; C_E – конструктивная постоянная ДПТ; U – напряжение питания, подаваемое на ДПТ, В; $I_{\text{я}}$ – ток, протекающий по обмотке якоря, А; $r_{\text{я}}$ – суммарное сопротивление цепи ротора, Ом; Φ – магнитный поток ДПТ, Вб.

Возможные варианты способов изменения скорости вращения якоря определяют

ся по уравнению (1), откуда следует, что изменение частоты вращения ротора возможно следующими способами:

1 – изменением основного магнитного потока полюсов ДПТ;

2 – изменением величины резистора, включенного в цепь якоря;

3 – изменением уровня напряжения питания ДПТ.

Ранее в системах автомобилей применялись ДПТ с возбуждением основного магнитного потока с помощью соответствующих обмоток статора. В настоящее время в электрооборудовании автотранспортных средств в основном применяют ДПТ с постоянными магнитами для создания основного магнитного потока, что связано с появлением магнитных материалов для постоянных магнитов с высокой остаточной индукцией. Применение подобных современных двигателей, не дает возможности регулировать магнитный поток, и остаются только два способа изменять скорость вращения якоря, сводящиеся к подключению последовательно в цепь якоря ДПТ добавочного резистора. В случае такого построения схемы устройства наблюдается перераспределение напряжения питания между включенным сопротивлением и, собственно, обмоткой якоря, при этом напряжение на обмотке изменяется. В результате меняются соответствующим образом частота и скорость вращения вентилятора, и скорость создаваемого им воздушного потока.

Отметим, что при включении в цепь ротора ДПТ дополнительного резистора существенным образом изменяются характеристики ДПТ, во-первых, проявляется более сильная зависимость скорости вращения электродвигателя вентилятора от механической нагрузки на его валу, так как при увеличении тока в цепи якоря возрастает падение напряжения на добавочном сопротивлении, и напряжение на обмотке якоря ДПТ уменьшается (более мягкая скоростная характеристика), а, во-вторых, увеличиваются непроизводительные потери энергии за счет нагрева дополнительного резистора. Следовательно,

остается только одна эффективная возможность – изменение питающего напряжения на ДПТ, которое возможно при использовании автоматизированной подстраивающейся к режиму работы (адаптивной) системы электроснабжения.

Для создания подобной адаптивной системы питания может быть применена широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [7, 8], принцип получения которой заключается в сравнении с помощью компаратора входного напряжения и напряжения, генерируемого генератором пилообразного напряжения (ГПН) (рис. 1). Отметим, что подобный принцип управления предлагался достаточно давно для вентилятора системы отопления [12], однако, он не был реализован из-за отсутствия в то время мощных силовых транзисторных ключей. С подобными целями может использоваться и частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) [1, 3, 14, 15], однако, при ее применении спектр сигнала получается заметно более широким [14], что плохо влияет на электромагнитную совместимость приборов и систем электрооборудования. Способ получения ШИМ состоит в следующем: если уровень входного модулирующего сигнала превышает уровень напряжения, вырабатываемого ГПН, то на выходе схемы сравнения (компаратора) устанавливается выходной высокий уровень напряжения; а в случае обратной ситуации – низкий выходной уровень напряжения. Как следует из рис. 1 [8, 9], продолжительность импульса на выходе схемы сравнения прямо пропорциональна входному напряжению. Отметим, что период импульсов ШИМ модулированного сигнала T остается неизменным и определяется частотой сигнала, генерированного ГПН, то время действия импульса изменяется в процессе модуляции, а уровень постоянной составляющей выходного ШИМ сигнала будет изменяться, и этот меняющееся во времени уровень определяется длительностью импульса выходного напряжения компаратора и может быть использован в качестве напряжения питания ДПТ.

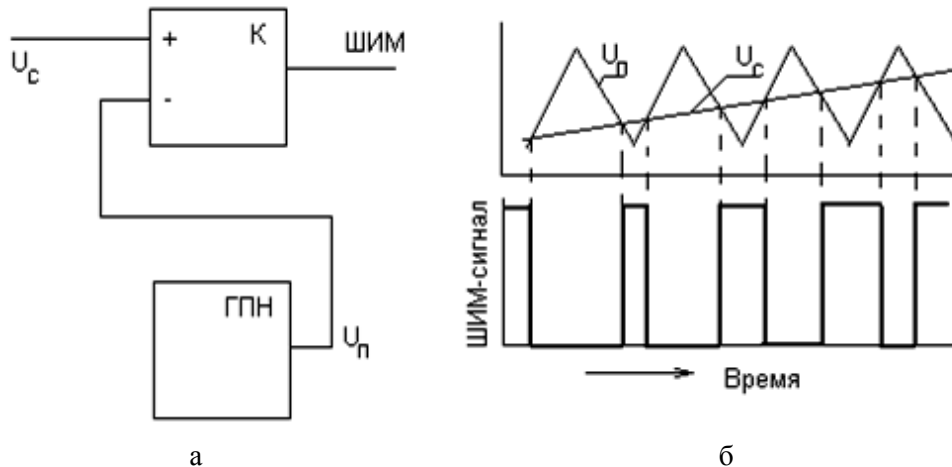


Рис. 1. Функциональная схема (а) и принцип (б) получения ШИМ сигнала:
К – схема сравнения уровней (компаратор); ГПН – генератор пилообразного напряжения

Отметим, что подобное управление электродвигателем системы охлаждения уже начиная с частоты ШИМ-сигнала 100 Гц не вызывает каких-либо неравномерностей в скорости (частоте) вращения электродвигателя из-за инерционности его ротора. ШИМ описывается коэффициентом заполнения, который при изменении входного уровня модулирующего напряжения меняется в пределах 0-1, а уровень среднего выходного напряжения схемы сравнения:

$$U = U_{num} \frac{t_u}{T}, \quad (2)$$

где U_{num} – питающее напряжение компаратора, В.

Импульсный сигнал с выхода схемы сравнения уровней используется в качестве управляющего для мощного силового ключа, в качестве которого обычно применяют мощный полевой транзистор. В случае замкнутого ключа мощность рассеиваемая на нем определяется произведением падения напряжения на канале транзистора и протекающего тока, и она очень мала из-за небольшого падения напряжения на канале (в случае современных полевых транзисторов со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП), например, типа IRF 3205 [16] сопротивление канала находится на уровне тысячных долей Ома, при максимально допустимом токе до ста Ампер), в случае разомкнутого ключа – мощность рассеяния также очень мала из-за крайне малого тока, проте-

кающего через закрытый транзистор (менее мкА). Во время переключения МОП транзистора из-за быстрого переключения данного типа транзисторов (~ 10 нс), энергия, рассеиваемая при переключениях также оказывается крайне малой из-за малой длительности фронтов импульсов.

Применение подобных управляющих систем на основе ШИМ значительно уменьшает средний уровень шума, производимого вентилятором охлаждения ДВС автотранспортного средства, что достигается за счет плавной регулировки его скорости вращения в зависимости от температуры.

Моделирование работы устройства

При моделировании мы использовали среду Simulink [17], при этом реализуется способ визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь, используя стандартные, взятые из библиотеки блоки, создает модель устройства.

Пользователю не нужно изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, знаний в той предметной области, в которой он работает. Доступ к функциям MATLAB и другим его инструментам является открытым и их можно использовать в среде Simulink. При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения с фиксированным или

переменным шагом модельного времени. В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого применяются специальные устройства наблюдения в библиотеке Simulink.

На рис. 2 представлено смоделированное устройство ШИМ, реализующее данный метод.

Сигнал генератора 1 пропорционален сигналу ошибки ШИМ регулятора и показан на рис. 3.

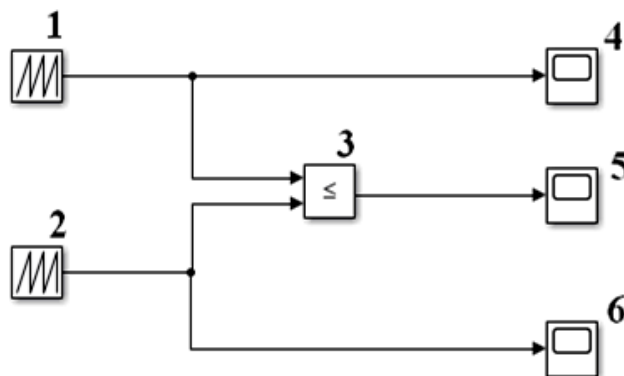


Рис. 2. Модель устройства ШИМ в среде Simulink: 1 – генератор пилообразного напряжения, напряжение, которого пропорционально сигналу ошибки; 2 – генератор пилообразного напряжения ШИМ регулятора; 3 – схема сравнения уровней (компаратор); 4, 5, 6 – осциллографы, для наблюдения сигнала в различных частях устройства

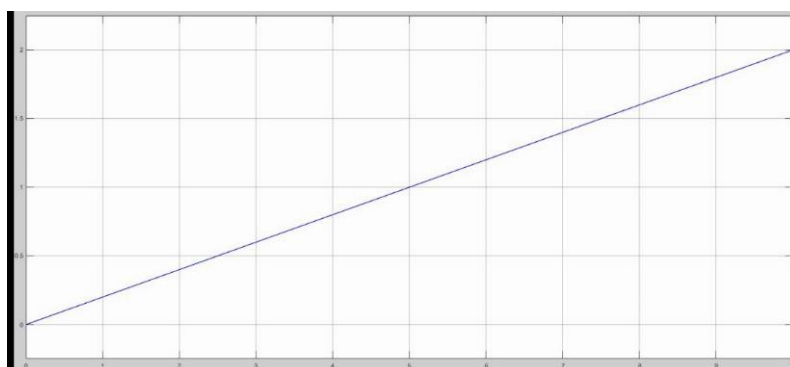


Рис. 3. Сигнал ошибки для управления работой ШИМ-регулятора

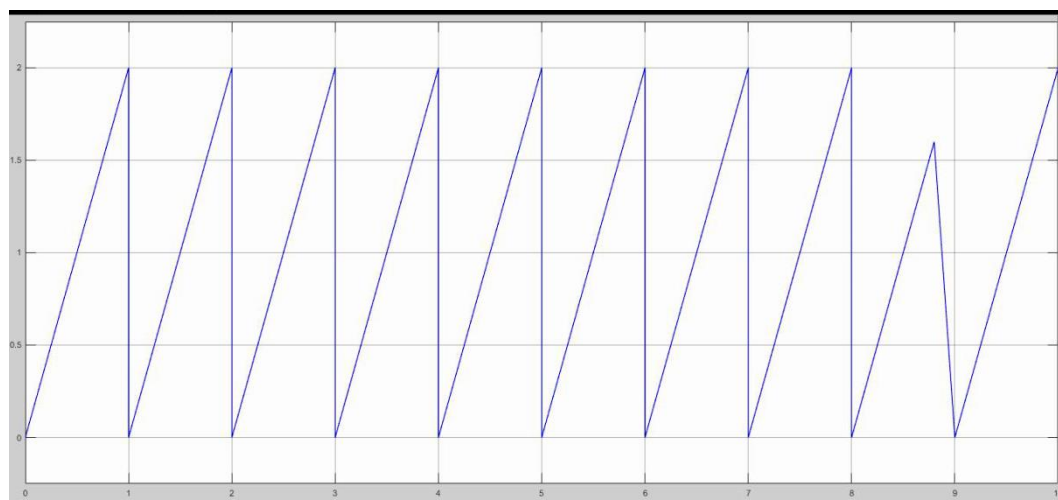


Рис. 4. Сигнал генератора пилообразного напряжения формирователя ШИМ-сигнала

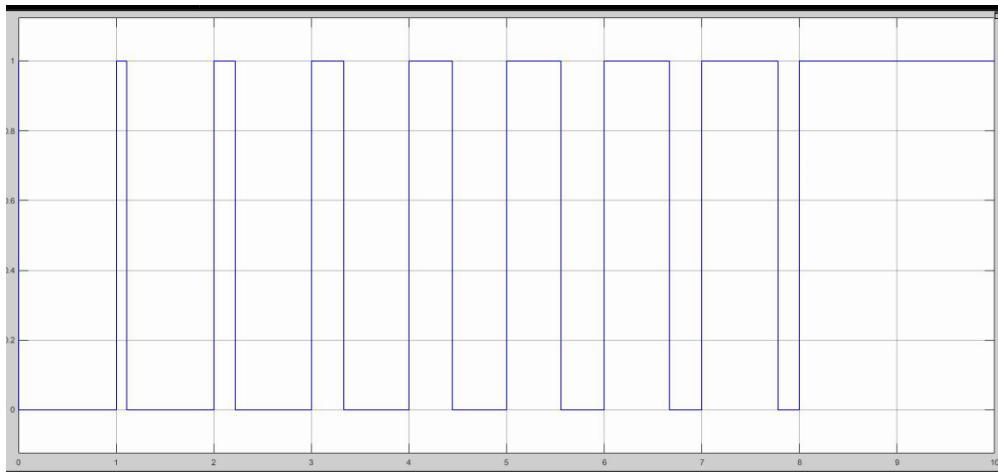


Рис. 5. Выходной сигнал ШИМ-модулятора

Этот сигнал поступает на первый вход компаратора 3 (рис. 2), а на его второй вход поступает сигнал генератора пилообразного напряжения формирователя ШИМ-сигнала (рис. 4), который сравнивается компаратором с сигналом ошибки и в результате сравнения формируется ШИМ-сигнал.

На рис. 5 показан выходной ШИМ-сигнал, управляющий мощным силовым ключом.

Разработка электрической принципиальной схемы устройства

Разработка электрической принципиальной схемы устройства. Нами был разработан ряд управляющих систем и устройств, работающих на рассмотренном ранее принципе в работах [18-21]. Для уменьшения стоимости устройства, упрощения его схемы, повышения надежности и КПД за счет снижения мощности рассеивания нами был разработан и рассчитан вариант устройства управления вентилятором и жидкостным насосом системы охлаждения с n -канальным полевым транзистором типа IRF3205. Электрическая принципиальная схема представлена на рис. 6. В устройстве управления в качестве ШИМ-драйвера применена специализированная микросхема 494 TL [22], которая позволяет преобразовать уровень разности сигналов (датчика температуры R1 – терморезистора) и задатчика температуры (R2 – переменного резистора), причем уровень напряжения задатчика температуры может регулироваться переменным сопротивлением R2,

что позволяет подстраивать «рабочую» температуру ДВС в процессе эксплуатации. Преобразование разности уровней происходит напрямую в ШИМ-сигнал, управляющий транзистором IRF 3205.

Ключ на полевом транзисторе подключается параллельно контактам биметаллического переключателя и фактически выполняет его роль – с частотой ШИМ-сигнала подключая электродвигатель системы охлаждения ДВС к источнику питания. Время, на которое подключается электродвигатель, определяется коэффициентом заполнения ШИМ-сигнала, по этой причине эквивалентное постоянное напряжение, приложенное к электродвигателю, определяется уравнением (2). Частота вращения ротора электродвигателя практически линейно зависит от поданного на него напряжения [9, 10], так что воздушный поток, им создаваемый зависит от разности температур датчика и задатчика температуры (сопротивления R1 и R3). Таким образом обеспечивается пропорциональное регулирование температуры охлаждающей жидкости и плавный выход на заданную температуру, а также ее поддержание с более высокой степенью точности. Микросхема стабилизатора напряжения 1158KP9A [23] применена для стабилизации питающего напряжения драйвера 494 TL, что позволяет улучшить режим ее работы. Отметим, что подобное рассмотренному выше подключение полевого транзистора позволяет не отключать штатную систему охлаждения ДВС, а использовать ее в каче-

стве резервной, что повышает надежность работы системы охлаждения в целом.

Результаты и обсуждение

В системе реализован следующий принцип управления частотой вращения вентилятора охлаждения: вентилятор начинает медленно вращаться при разности установленной и действительной температурах охлаждающей жидкости около 10 градусов. По мере прогрева ДВС скорость вращения электродвигателя вентилятора сначала возрастает, а затем, по мере повышения температуры охлаждающей жидкости и приближения к установленной задатчиком температуре начинает уменьшаться.

Кроме того, в системе охлаждения применен ЖН с независимым электрическим приводом и электронным управлением. При этом алгоритм управления циркуляцией теплоносителя учитывает несколько сценариев в зависимости от значений текущих параметров теплового состояния и режимов работы ДВС [24, 25]. Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты в целом позволили сделать следующие выводы:

– использование режима ступенчатой малоинтенсивной циркуляции теплоносителя при прогреве двигателя на режиме холостого хода способствует сокращению на 13-25 % времени выхода двигателя на режим принятия нагрузки;

– регулирование производительности ЖН по разветвленному алгоритму с переменными критериями управления в зависимости от текущего теплового состояния рабочих сред, частоты вращения КВ и нагрузки позволяет термостабилизировать двигатель на стационарных и переходных режимах работы в зонах с максимальными эффективными показателями и минимальным износом;

– сохранение или ступенчатое снижение частоты вращения вала электродвигателя в течение от 2 до 3 минут после останова ДВС предотвращает локальный перегрев деталей и закипание теплоносителя, повышая надежность и ресурс двигателя;

– автоматический выбор оптимальной циркуляции теплоносителя в совокупности с высоким КПД электродвигателя способствует уменьшению механических потерь на привод ЖН до 85 % в зависимости от режимов работы ДВС.

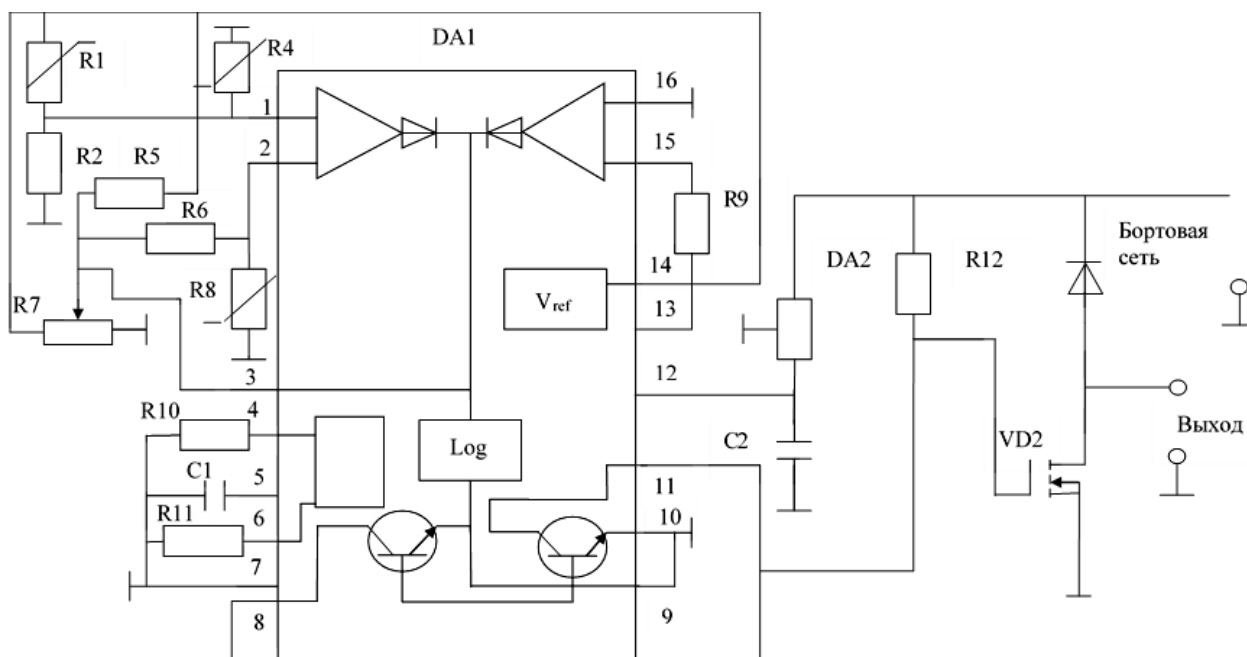


Рис. 6. Принципиальная схема управляющей системы охлаждения

двигателя внутреннего сгорания, позволяющая регулировать температуру охлаждающей жидкости: DA 1 – микросхема ШИМ драйвера TL494; DA 2 – микросхема стабилизатора напряжения 1158KP9A

Данный эффект достигается за счет применения нелинейных резисторов (варисторов R4 и R8). Подобное построение системы позволяет осуществить плавный выход температуры ДВС на необходимый режим и повысить точность ее поддержания на заданном уровне с погрешностью порядка 1 градуса.

Выводы

Разработана новая структура системы управления охлаждением ДВС, которая

- обладает более высокой эффективностью по сравнению с используемыми в настоящее время;

- в случае применения предложенной системы управления следует ожидать улучшения процесса смесеобразования в цилиндрах

ДВС из-за более точного поддержания его температуры, повышения его КПД, а также уменьшения токсичности отработавших газов и увеличения ресурса работы ДВС;

- в случае выхода из строя электронной части управляющей системы охлаждения ДВС охлаждение двигателя не прекратится, поскольку штатная система остается подключенной, что увеличивает надежность работы системы охлаждения ДВС в целом.

Таким образом, применение разработанной системы совместно с системой регулирования производительности вентилятора позволит обеспечить возможность термостабилизации ДВС во всем диапазоне режимов и условий эксплуатации, что способствует повышению эффективности применения ДВС и образцов в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. Москва: Транспорт, 1989. 287 с.

2. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Горячая линия – Телеком, 2006. 440 с.

3. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей: учебник для вузов. Москва: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. 384с.

4. Савельев М.А., Рассохин А.Е., Заяц Ю.А. Анализ способов поддержания теплового режима двигателей внутреннего сгорания // Научный резерв. –2018. № 4 (4). С. 8-16.

5. Данов Б.А., Рогачев В.Д., Шевченко Н.П. Электрооборудование военной автомобильной техники: учеб. пособие. Рязань: РВАИ, 2005. 518 с.

6. Автотранспорт и экология мегаполисов / А.А. Ипатов, В.Ф. Кутенев, В.А. Лукшо и др. Москва: Экология Машиностроение, 2010. 254 с.

7. Двигатели внутреннего сгорания. Т. 1. Теория рабочих процессов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др. Москва: Высшая школа, 2005. 476 с.

8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1. Москва: Мир, 1983. 598 с.

9. Интегральные микросхемы. Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. Москва: Додека, 2000. 608 с.

10. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. Москва: Академия, 2003. 539 с.

11. Общая электротехника / под ред. А.Т. Блажкина. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 591 с.

12. Буна Б. Электроника на автомобиле. Москва: Транспорт, 1979. 182 с.

13. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов; 5-е изд., перераб. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.

14. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Советское радио, 1977. 608 с.

15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Москва: Высшая школа, 1978. 656 с.

16. <http://irf.ru/pdf/irf3205.pdf>.

17. Моделирование работы электронного устройства управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink / В.И. Сарбаев, Ю.В. Гармаш,

А.Н. Крюков, Л.Г. Блинникова // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 4. С. 2-5.

18. **Гармаш Ю.В.** Анализ применения импульсных преобразователей напряжения в электроприводе вспомогательного оборудования автомобильной техники: монография. Рязань: РВАИ, 2007. 99 с.

19. Система отопления и вентиляции салона автомобиля: Пат. 2270104 Российская федерация, МПК⁷ В 60 Н 1/04 / С.М. Карabanов, В.И. Ясевич, Ю.В. Гармаш, И.И. Пономарева. Заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «Рязанский завод металлокерамических приборов»; № 2004115012 заявл. 17.05.2004; опубл. 20.02.2006. Бюл. 8.

20. Термоэлектрический кондиционер: Пат. 2336184 Российская федерация, МПК⁷ В 60 Н 1/03 / Ю.В. Гармаш, И.И. Пономарева. Заявитель и патентообладатель Рязанский воен. авт. ин-т; № 2007117272; заявл. 08.05.2007; опубл. 20.10.2008. Бюл. 29.

21. Система отопления, вентиляции и кондиционирования салона автомобиля: Пат. 2472642 Российская федерация, МПК⁷ В 60 Н

1/08 / В.И. Сарбаев, Ю.В. Гармаш, И.И. Пономарева. Заявитель и патентообладатель Негосударственное образовательное учреждение ВПО «Современный технический институт». № 2011132457; заявл. 01.08.2011; опубл. 20.01.2013. Бюл. 2.

22. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/tl494-d.pdf>.

23. KP1158EH301A. sitsemi.ru.

24. Пат. RU 2697597, F 01 P 3/02. Система управления циркуляцией теплоносителя в жидкостной системе охлаждения / А.Е. Рассохин, М.А. Савельев, Ю.А. Заяц, В.Д. Рогачев, С.С. Волков, Т.М. Юдин. № 2018127250; заявлено 24.07.2018; опубл. 15.08.2019.

25. **Рассохин А.Е., Савельев М.А.** Способ управления тепловым состоянием двигателей внутреннего сгорания для повышения эффективности эксплуатации в особых условиях // Современные проблемы создания и эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов в системе МЧС России: сб. трудов секции № 10 XXIX Междунар. науч.-практ. конф. «Предотвращение. Спасение. Помощь» / Академия гражданской защиты МЧС России. Химки, 2019. С. 7-14.

Гармаш Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Математические и естественно-научные дисциплины» Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища (МО РФ) (РВВДКУ)

Пономарева Ирина Ивановна – преподаватель кафедры «Математические и естественно-научные дисциплины» Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища (МО РФ) (РВВДКУ)

Рассохин Андрей Евгеньевич – старший преподаватель кафедры «Автомобильная техника» Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища (МО РФ) (РВВДКУ)

Yuriy V. Garmash – Dr. Sci.Tech., Professor, Department of Mathematical and Natural Sciences, Ryazan Higher Airborne Command School

Irina I. Ponomareva – Lecturer, Department of Mathematical and Natural Sciences, Ryazan Higher Airborne Command School

Andrey E. Rassokhin – Senior Lecturer, Department of Automotive Engineering, Ryazan Higher Airborne Command School

Статья поступила в редакцию 09.04.24, принята к опубликованию 29.05.24

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)

УДК 621.316.849

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НОМИНАЛОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ МЛТ-0,25

А.Р. Ибрагимов, С.В. Дворников

STATISTICAL EVALUATION OF MEASUREMENT RESULTS OF RESISTANCE RATINGS OF METAL-FILM RESISTORS MLT-0.25

A.R. Ibragimov, S.V. Dvornikov

В работе представлены результаты статистической обработки данных измерения сопротивления у партии металлопленочных резисторов МЛТ-0,25 с номинальным значением 2,4 кОм, произведенных в 1980 году в Советском Союзе. Дана оценка их соответствия заявляемому ГОСТ 5.172-75 «Резисторы постоянные металлодиэлектрические типов МЛТ и МТ мощностные рассеяния до 2 Вт. Требования к качеству аттестованной продукции» на основе критерия согласования Колмогорова-Смирнова. Выдвинуты предположения о причинах низкой точности исследуемых резисторов и определены направления по дальнейшему исследованию в рассматриваемой области.

Ключевые слова: металлопленочный резистор, измерение номинального сопротивления, гистограмма, нормальное распределение, критерий согласования Колмогорова – Смирнова

Введение

В прошлом столетии электронная промышленность стран Европы, США и Японии, несмотря на жесткую конкуренцию между их национальными компаниями, развивалась в условиях активного обмена инно-

The processing of the resistance measurement data for a batch of metal film resistors MLT-0.25 with the nominal value of 2.4 kOhm, produced in 1980 in the Soviet Union. Their conformity to the claimed GOST 5.172-75 "Permanent metal-dielectric resistors of MLT and MT types with the power dissipation up to 2 W is assessed. The requirements for quality of the certified products are made "On the basis of the Kolmogorov-Smirnov conformity criterion". The assumptions about the reasons for low accuracy of the resistors under study are put forward and directions for further research in the area under consideration are defined.

Keywords: metal-film resistor, nominal resistance measurement, histogram, normal distribution, Kolmogorov-Smirnov agreement criterion

вациями через международную торговлю лицензиями и патентами, документацией на технологические процессы, новейшим технологическим, контрольно-измерительным и оптико-механическим оборудованием, материалами и другими своими достижениями.

В то же время электронная промышленность СССР была полностью лишена подобной возможности. Под эгидой США был учрежден специальный международный комитет (КОКОМ) [1], ответственный за контроль всех научно-технических и торгово-экономических взаимоотношений с СССР.

Членами КОКОМ была разработана широкая номенклатура положений, изложенная на 250 страницах, представляющих собой свод правил [1], согласно которым запрещалось продавать СССР не только передовые технологии и изделия, относящихся к таким отраслям радиоэлектроники, как приборостроение, микроэлектроника, вычислительная техника, но и технологическое и измерительное оборудование, материалы, прецизионное станочное оборудование и прочее.

Успехи западной радиоэлектроники обусловлены тем, что изначально в этой отрасли предусматривалось международное разделение труда, обуславливающее ее конкурентоспособность по отношению к странам социалистического содружества. Естественно, что такое состояние дел оказало существенное негативное влияние на развитие производства элементной базы в СССР, последствия которого трансформировались и на Россию в виде хронического отставания в области электроники.

Несмотря на это, с советского времени сохранились значительные запасы отдельных номенклатур радиоэлектронных компонентов, которые до сих пор используются при производстве радиотехнических изделий. Однако с момента их производства прошло уже много лет и у большинства компонентов закончились установленные сроки хранения. Поэтому в интересах оценки их дальнейшего использования необходима выборочная проверка соответствия заявляемых номиналов предъявляемым требованиям.

С учетом данного аспекта, в статье представлены результаты измерения номинального сопротивления партии резистор МЛТ-0,25 в количестве 100 штук с заявляемым сопротивлением 2,4 кОм и допустимой погрешностью разброса параметров $\pm 5\%$.

Целевая установка исследования

Несмотря на строгость требований ГОСТ 5.172-75, сложность организации технологического производства при массовом изготовлении сопротивлений приводит к тому, что заявляемый номинал отдельных экземпляров будет отличаться от требуемых значений. Поэтому на производствах организуются службы ОТК, обеспечивающие отбраковку тех изделий, значения которых не удовлетворяют изначальным требованиям.

Учитывая, что на больших объемах обрабатываемых данных применимы методы статистического анализа, то полученные результаты на контрольной выборке позволят их обобщить применительно ко всей партии выпускаемой продукции. И тем самым прогнозировать возможный процент брака.

С учетом технологической изолированности, вопрос качества производимых электронных компонентов и в Советском Союзе стоял особенно остро. Так, согласно [2], процент выхода пригодных компонентов для СБИС в СССР в 1984 году составлял всего около 10 %, в то время как в США этот показатель находился на уровне более 85 %. Но даже с учетом работы ОТК не исключались случаи попадания некондиционных компонентов на производственных линиях.

Учитывая указанные обстоятельства, целью представленного исследования являлось выявление соответствия по результатам выборочного контроля номинального сопротивления металлопленочных резисторов советского производства МЛТ-0,25, их заявленному значению 2,4 кОм с допустимой погрешностью разброса параметра $\pm 5\%$, определяемой ГОСТ 5.172-75.

Исследование проводилось путем случайного выбора из партии в 10 000 резисторов 100 экземпляров.

Верификация результатов измерений проводилась на основе их статистической обработки с применением критерия согласия Колмогорова-Смирнова [3], позволившего выявить соответствие разброса распределения номинальных значений сопротивлений нормальному закону.

Общие сведения о резисторах МЛТ-0,25

Резисторы представляют собой пассивные электронные компоненты, предназначенные для создания определенного уровня электрического сопротивления путём ограничения тока в электрических цепях [4].

Основная функция резисторов – ограничение или уменьшение тока в электрической цепи. Поэтому отклонение их номиналов от заданных значений потребует затрат значительных усилий при отладке радиоэлектронных изделий, что является нежелательным явлением.

Металлопленочные резисторы МЛТ-0,25 состоят из керамической трубчатой основы с нанесённым на неё тонким слоем металлизированной плёнки из специ-

ального резистивного материала. Таким образом, величина номинала сопротивления зависит от состава плёнки и количества витков спирали, нанесенных на керамическую основу [5].

По способу изготовления резисторы МЛТ могут быть с нарезкой спиральной канавки и безнарезные.

Наиболее надёжными считаются безнарезные, с омическим сопротивлением до 2 кОм.

В табл. 1 приведены общие характеристики измеряемых резисторов [3].

Металлопленочные резисторы выпускались с 1964 по 1993 годы на Нижегородском заводе «Орбита» (в настоящее время НПО «ЭРКОН») и на заводе «Кермет» в Пензенской области [5].

Таблица 1 – Характеристики и габариты исследуемого резистора

Тип резистора		МЛТ-0,25
Размеры, мм	D	3,0
	L	7,0
	d	0,6
	l	20
Масса, г (не более)		0,25
Номинальная мощность, Вт		0,25
Номинальное сопротивление		2,4 кОм
Предельное рабочее напряжение, В		250

Результаты проведенных измерений

Измерения проводились с использованием стандартного цифрового мультиметра DT-830B. Результаты произведённых измерений сведены в табл. 2.

По результатам измеренных величин значений номинальных сопротивлений резисторов МЛТ-0,25 были определены минимальное номинальное значение $R_{\min} = 2,28$ кОм и максимальное $R_{\max} = 2,6$ кОм, после чего полученный диапазон измеренных значений

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min} = 2,6 - 2,28 = 0,32 \text{ кОм}$$

был разбит на десять интервалов, по которым были распределены измеренные значения и рассчитана частота (вероятность) проявления в их пределах истинных значений резисторов контрольной партии

$$w_i = n_i / N,$$

где $i = 1, 2, \dots, 10$ – текущий номер интервала; n_i – количество измеренных значений, соответствующих i -му интервалу (количество попаданий); N – общее количество проведенных измерений. Полученные результаты сведены в табл. 3.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)

Таблица 2 – Результаты измерений резисторов МЛТ-0,25 номиналом 2,4 кОм

№ изм.	R, кОм	№ изм.	R, кОм	№ изм.	R, кОм	№ изм.	R, кОм	№ изм.	R, кОм
1	2,47	21	2,37	41	2,46	61	2,34	81	2,44
2	2,33	22	2,43	42	2,41	62	2,53	82	2,34
3	2,6	23	2,35	43	2,35	63	2,35	83	2,35
4	2,46	24	2,51	44	2,35	64	2,46	84	2,47
5	2,34	25	2,44	45	2,51	65	2,35	85	2,45
6	2,43	26	2,33	46	2,43	66	2,35	86	2,33
7	2,4	27	2,46	47	2,37	67	2,35	87	2,37
8	2,39	28	2,33	48	2,52	68	2,46	88	2,35
9	2,34	29	2,46	49	2,46	69	2,37	89	2,35
10	2,39	30	2,45	50	2,4	70	2,28	90	2,35
11	2,33	31	2,36	51	2,37	71	2,38	91	2,37
12	2,46	32	2,34	52	2,45	72	2,45	92	2,51
13	2,37	33	2,41	53	2,34	73	2,36	93	2,36
14	2,39	34	2,36	54	2,34	74	2,41	94	2,33
15	2,37	35	2,34	55	2,48	75	2,44	95	2,45
16	2,38	36	2,51	56	2,42	76	2,33	96	2,34
17	2,36	37	2,34	57	2,4	77	2,44	97	2,4
18	2,36	38	2,36	58	2,41	78	2,41	98	2,37
19	2,39	39	2,48	59	2,36	79	2,46	99	2,39
20	2,41	40	2,47	60	2,41	80	2,43	100	2,41

Таблица 3 – Результаты предварительной обработки измерений номиналов сопротивлений резисторов контрольной партии

Интервал, кОм	Частота проявления n_i	Вероятность w_i
2,28 ... 2,312	1	0,01
2,312 ... 2,344	17	0,17
2,344 ... 2,376	28	0,28
2,376 ... 2,408	11	0,11
2,408 ... 2,44	17	0,17
2,44 ... 2,472	17	0,17
2,472 ... 2,504	2	0,02
2,504 ... 2,536	6	0,06
2,536 ... 2,568	0	0
2,568 ... 2,6	1	0,01
Итого	100	1

По результатам, представленным в табл. 3, была построена гистограмма распределений измеренных значений сопротивлений. Гистограмма представлена на рис. 1, где по оси абсцисс отложены измеренные значения в пределах десяти интервалов, а по оси ординат – частота (вероятность) попадания замеренных значений в указанные на оси X интервалы.

Построенная гистограмма явилась основой для последующего проведения статисти-

ческого анализа. Так, в соответствии с ГОСТ 5.172-75, допустимый срок сохранения номиналов резисторов серии МЛТ составляет 25 лет. Исследуемая партия сопротивлений была выпущена более 35 лет назад. Поэтому можно полагать, что в процессе старения резисторов, происходило изменение физико-химических свойств металлизированной плёнки из специального резистивного материала, в результате чего изменился и их текущий номинал.

Поскольку согласно [6] разброс параметров при старении элементной базы соответствует нормальному закону, то и гисто-

грамма распределений измеренных значений, тоже должна описываться посредством функции Гаусса.

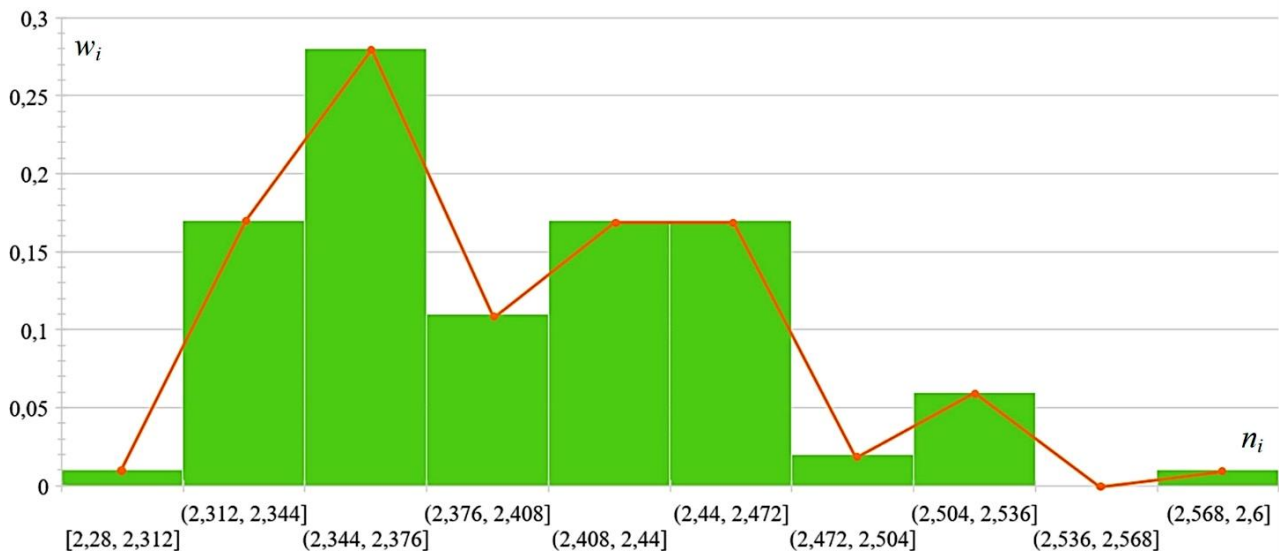


Рис. 1. Гистограмма распределения измеренных значений номинальных сопротивлений резисторов МЛТ-0,25

Для выявления указанного соответствия предлагается использовать критерий согласования Колмогорова – Смирнова [7].

Для вычисления функции нормального распределения требуется определить два расчетных параметра: математическое ожидание и среднеквадратическое откло-

нение (СКО), используемых для последующего построения функция плотности вероятности. При этом в качестве исходных данных используем значения табл. 1.

Значение математического ожидания равно

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{100} \cdot (2,28 + 2,33 \cdot 7 + 2,34 \cdot 10 + \dots + 2,53 + 2,6) = 2,3999 \approx 2,4 \text{ кОм.}$$

Значение СКО

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(2,28 - 2,3999)^2 + (2,33 - 2,3999)^2 \cdot 7 + \dots + (2,6 - 2,3999)^2}{99}} = 0,0584 \approx 0,06 \text{ кОм.}$$

Для построения функции нормального распределения необходимо задать допустимые границы области определения, которые определим в пределах $3\sigma_x$:

$$[m_x - 3\sigma_x; m_x + 3\sigma_x], \quad (1)$$

где m_x – математическое ожидание; σ_x – СКО.

Далее, подставляя расчетные значения, получим:

$$[2,3999 - 3 \cdot 0,0584; 2,3999 + 3 \cdot 0,0584]$$

$$[2,2247; 2,5751].$$

Для расчета функции плотности вероятности нормального закона, воспользуемся следующей формулой [7]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2} \right]. \quad (2)$$

Полученные результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Значения выборки и основанные на них функции плотности вероятности

№	Значение выборки x	Функция плотности вероятности $f(x)$
1	2,2247	0,075936
2	2,2636	0,449103
3	2,3026	1,703292
4	2,3415	4,142625
5	2,3804	6,461094
6	2,4194	6,4622
7	2,4583	4,144753
8	2,4972	1,70475
9	2,5361	0,449642
10	2,5751	0,076053

Используя результаты табл. 4 построим функции плотности вероятности нормального закона с параметрами измеренных значений номиналов контрольной партии резисторов на фоне гистограммы их распределения (см. рис. 2).

Выбор для анализа критерия согласия Колмогорова – Смирнова количественно определяет расстояние между эмпирической функцией распределения выборки (в данном случае представленной в виде гистограммы) и кумулятивной функцией распределения эталонного распределения

[8]. Нулевое распределение этой статистики рассчитывается в соответствии с нулевой гипотезой о том, что выборка взята из эталонного распределения.

Условия эффективности применения критерия согласия Колмогорова-Смирнова предполагают, что выборка является достаточно большой (желательно $n \geq 50$). При этом разряды (элементы вариационного ряда), упорядоченные по возрастанию какого-либо признака, обязательно должны отражать какое-то однонаправленное его изменение [7].

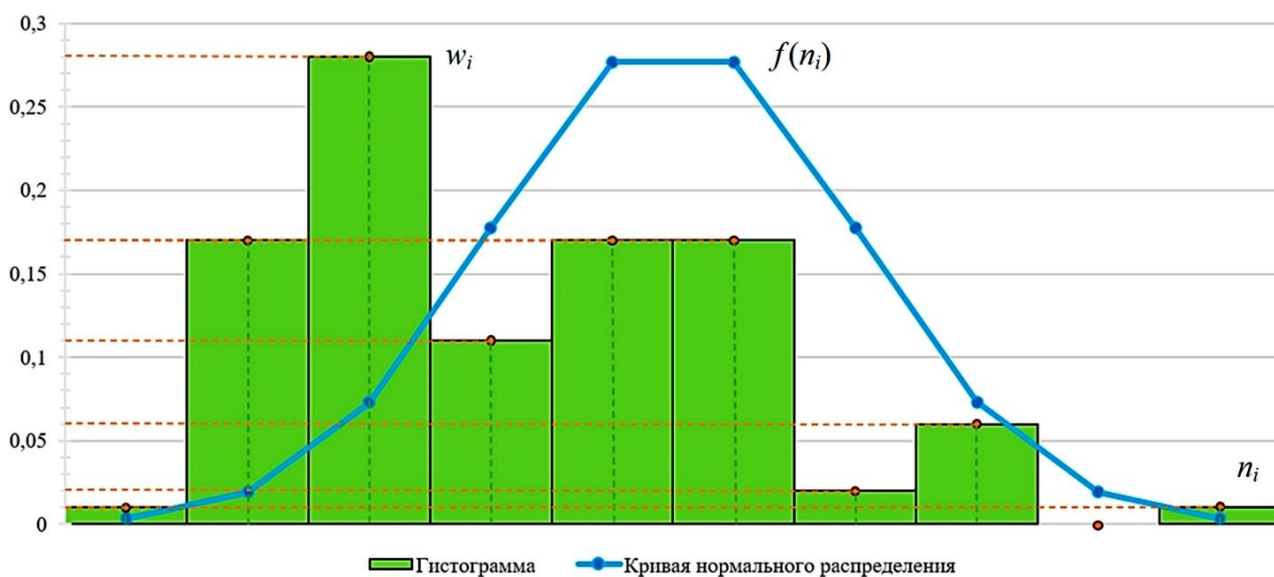


Рис. 2. Совместное представление гистограммы распределения измеренных значений номинальных сопротивлений резисторов МЛТ-0,25, и функции нормального закона с параметрами распределения

Алгоритм применения критерия предполагает выполнение следующих действий:

1) выдвигаются две гипотезы о согласии H_0 и о несогласии H_1 экспериментальных данных с распределением $f(x)$, для рассматриваемого случая – нормальным распределением;

2) на основе обрабатываемой выборки строится вариационный ряд, для которого рассчитываются накопленные эмпирические относительные частоты $N_{эмп}$ (рассчитанные вероятность w_i);

3) Рассчитываются величины теоретических значений относительных частот $N_{теор}$;

4) Вычисляется эмпирическое значение критерия $\lambda_{эмп}$ в соответствии с формулой:

$$\lambda_{эмп} = \max |N_{эмп} - N_{теор}|. \quad (3)$$

5) Рассчитывается критическое значение $\lambda_{кр}$ в зависимости от заданного уровня доверия γ :

$$\lambda_{кр} = \begin{cases} 1,36/\sqrt{n}, & \text{для } \gamma = 0,95; \\ 1,63/\sqrt{n}, & \text{для } \gamma = 0,99, \end{cases} \quad (4)$$

где n – объем выборки;

6) По результатам расчетов делается вывод о принятии гипотезы:

H_0 – о согласии (соответствии) экспериментальных данных к распределению $f(x)$ принимается в случае, если $\lambda_{эмп} < \lambda_{кр}$; или

H_1 – о несогласии экспериментальных данных к распределению $f(x)$, принимается при условии, если $\lambda_{эмп} > \lambda_{кр}$.

В соответствии с алгоритмом использования критерия, в табл. 5 представлены значения вычисленных накопленных эмпирических значений $N_{эмп}$ и теоретических значений относительных частот $N_{теор}$.

Таблица 5 – Вычисление накопленных эмпирических $N_{эмп}$ и теоретических относительных частот $N_{теор}$

Интервал	n_i	w_i	$N_{эмп}$	n_j	w_j	$N_{теор}$
2,28 ... 2,312	1	0,01	0,01	0,3	0,003	0,003
2,312 ... 2,344	17	0,17	0,18	1,75	0,0175	0,0205
2,344 ... 2,376	28	0,28	0,46	6,63	0,0663	0,0868
2,376 ... 2,408	11	0,11	0,57	16,13	0,1613	0,2481
2,408 ... 2,44	17	0,17	0,74	25,17	0,2517	0,4998
2,44 ... 2,472	17	0,17	0,91	25,18	0,2518	0,7516
2,472 ... 2,504	2	0,02	0,93	16,14	0,1614	0,913
2,504 ... 2,536	6	0,06	0,99	6,65	0,0665	0,9795
2,536 ... 2,568	0	0	0,99	1,75	0,0175	0,997
2,568 ... 2,6	1	0,01	1	0,3	0,003	1

Примечание: Объем выборки $n = 100$ шт.

Рассчитанные значения критерия $\lambda_{эмп}$ демонстрирует разницу накопленных величин относительных частот между эмпирическим распределением и теоретическим в каждом интервале выборки. Далее, используя высчитанные относительные частоты из табл. 5, рассчитаем значения данной величины по формуле (3), в соответствии с алгоритмом применения критерия Колмогорова – Смирнова. И, подставляя расчетные значения относительных частот, получим:

$$\lambda_{эмп1} = |N_{эмп1} - N_{теор1}| = |0,01 - 0,003| = 0,007;$$

$$\lambda_{эмп2} = |N_{эмп2} - N_{теор2}| = |0,18 - 0,0205| = 0,1595;$$

$$\lambda_{эмп3} = |N_{эмп3} - N_{теор3}| = |0,46 - 0,0868| = 0,3732;$$

$$\lambda_{эмп4} = |N_{эмп4} - N_{теор4}| = |0,57 - 0,2481| = 0,3219;$$

$$\lambda_{эмп5} = |N_{эмп5} - N_{теор5}| = |0,74 - 0,4998| = 0,2402;$$

$$\lambda_{эмп6} = |N_{эмп6} - N_{теор6}| = |0,91 - 0,7516| = 0,1584;$$

$$\lambda_{эмп7} = |N_{эмп7} - N_{теор7}| = |0,93 - 0,913| = 0,017;$$

$$\lambda_{эмп8} = |N_{эмп8} - N_{теор8}| = |0,99 - 0,9795| = 0,0105;$$

$$\lambda_{эмп9} = |N_{эмп9} - N_{теор9}| = |0,99 - 0,997| = 0,007;$$

$$\lambda_{эмп10} = |N_{эмп10} - N_{теор10}| = |1 - 1| = 0.$$

В результате проведенных вычислений получаем эмпирические значения критерия $\lambda_{эмп}$ для каждого из рассматриваемых в табл. 5 интервалов вариационного ряда номинальных значений сопротивлений.

Согласно требованиям алгоритма работы с рассматриваемым критерием согласования, для дальнейшего статистического анализа требуется использование максимального из получившихся эмпирических значений критерия $\lambda_{эмп}$.

Таковым в данном случае является эмпирическое значение критерия третьего интервала $\lambda_{эмп3}$ рассматриваемого вариационного ряда сопротивлений (далее $\lambda_{эмп}$).

Вычисление критического значения $\lambda_{кр}$ при разных уровнях доверия является следующим действием при проверки критерия согласования Колмогорова – Смирнова. Определение данной величины сводится к решению уравнений (4) и (5), представленных далее:

$$\lambda_{кр} = 1,36/\sqrt{n} = 1,36/\sqrt{100} = 0,136$$

$$\lambda_{кр} = 1,63/\sqrt{n} = 1,63/\sqrt{100} = 0,163$$

Согласно требованию алгоритма применения критерия Колмогорова – Смирнова, проведенные выше расчеты являются достаточными для формулировки вывода о принятии гипотезы согласия H_0 или несогласия H_1 . То есть об отнесении экспериментальных данных к распределению $f(x)$.

Для наглядности полученных результатов визуализируем рассчитанные данные, посредством их отображения на шкале, характеризующей уровень доверия.

Так на рис. 3, 4 показаны области допустимых значений гипотез H_0 и H_1 , с отображением рассчитанных значений $\lambda_{эмп}$ и $\lambda_{кр}$.

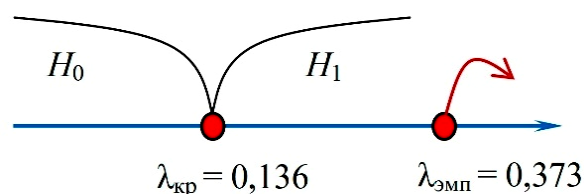


Рис. 3. Правосторонняя критическая область при уровне доверия $\gamma = 0,95$

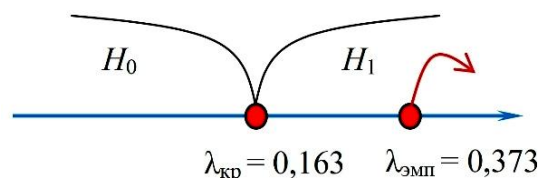


Рис. 4. Правосторонняя критическая область при уровне доверия $\gamma = 0,99$

Полученные изображения правосторонних критических областей позволяют утверждать, что эмпирическое значение критерия $\lambda_{эмп}$ третьего интервала рассматриваемого вариационного ряда номинальных сопротивлений принимает большее значение относительно критического значения порога $\lambda_{кр}$ независимо от применённого при расчётах уровня доверия γ , иначе говоря, $\lambda_{эмп} > \lambda_{кр}$ в обоих рассматриваемых случаях.

В соответствии с заключительным пунктом алгоритма критерия Колмогорова-Смирнова, а также с учётом полученных результатов расчётов, в рассматриваемом случае должна быть принята гипотеза H_1 – о несогласии экспериментальных данных к распределению $f(x)$.

Принятие гипотезы H_1 в данном случае означает, что полученная ранее эмпирическая функция распределения выборки номинальных сопротивлений существенно отличается от кумулятивной функции распределения эталонного распределения.

Заключение

Подводя итог вышеизложенному статистическому анализу номинального сопротивления металлопленочных резисторов советского производства МЛТ-0,25, можно сделать вывод, что фактическое номинальное сопротивление представленных образцов выборки довольно-таки сильно отличается от заявленного. Почти треть (28 %) из использованных для исследования резисторов имели номинальное сопротивление ниже заявленного на 3,67 %. Также 2 % выборки исследуемых компонентов вообще не попали в заявленные производителем границы допустимой погрешности разброса параметров $\pm 5\%$. Данные факты свидетельствуют о низкой точности советских металлопленочных резисторов МЛТ-0,25, вследствие чего их использование в современных электронных устройствах возможно исключительно после проверки фактического номинального сопротивления каждого компонента по отдельности.

При своём большом эксплуатационном запасе, советские резисторы подвержены старению – при длительном хранении в отопляемом помещении происходит окисление и кристаллизация проводящего слоя, отвердевание защитного покрытия. Естественное старение проявляется в зна-

чительном изменении номинальных характеристик и может привести к быстрому выходу резистора из строя во время работы. Следовательно, полученные низкие показатели точности исследуемых электронных компонентов можно связать с истекшим установленным сроком их хранения и несоблюдением требуемых условий хранения. С большой долей вероятности эти 2 причины являются основными виновниками несоответствия у части исследуемых резисторов фактического номинального сопротивления заявленному.

Обобщая описанные выше причины низкой точности исследуемых резисторов, можно заключить, что основанием для несоответствия фактического номинального сопротивления заявленному могла стать, как и изначальная низкая точность новых электронных компонентов, так и её понижение вследствие длительного хранения, в том числе в не самых благоприятных для данных электронных элементов условиях.

Дальнейшие исследования, затрагивающие рассматриваемую область электроники, будут связаны с контролем и оценкой долговечности работы советских металлопленочных резисторов МЛТ-0,25 в электрической схеме при номинальной мощности 2 Вт.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Шокин А.А.** Министр невероятной промышленности СССР. Страницы биографии. Москва: Техносфера, 2007. 456 с.

2. История отставания СССР от передовых стран в производстве микроэлектроники // Livejournal: [сайт]. 2023. URL: <https://historical-fact.livejournal.com/327514.html> (дата обращения: 27.11.2023).

3. ГОСТ 5.172-75. Резисторы постоянные металлодиэлектрические типов МЛТ и МТ мощностные рассеяния до 2 Вт. Требования к качеству аттестованной продукции: государственный стандарт Союза ССР: дата введения 1975 г. / Государственный комитет СССР по стандартам. Изд. официальное. Москва: Изд-во стандартов, 1975.

4. Резисторы // Wikipedia: [сайт]. 2023. URL: <http://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A0/> (дата обращения: 28.11.2023).

5. Резисторы МЛТ – обозначение и характеристики // Электрик Онлайн: [сайт]. 2023. URL: <https://onlineelektrik.ru/eoborudovanie/rezistory-mlt-oboznachenie-i-harakteristiki.html> (дата обращения: 28.11.2023).

6. **Прасов М.Т., Степанов Ю.С.** Эксплуатационная надежность электронных средств: учебное пособие для высшего профессионального образования. Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. 238 с.

7. **Никитин О.Р., Корнеева Н.Н.** Методы измерения статистических параметров радиосигналов: учеб. пособие; Вла-

дим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Владимир: Изд-во ВлГУ. Владимир, 2020. 227 с.

8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

Ибрагимов Артемий Ринадович – бакалавр кафедры «Конструирование и технологии электронных и лазерных средств» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Artemiy R. Ibragimov – Bachelor's degree student, Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Дворников Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, преподаватель кафедры «Конструирование и технологии электронных и лазерных средств» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Sergey V. Dvornikov – Dr.Sci. Tech., Professor, Department of Design and Technology of Electronic and Laser Devices, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Статья поступила в редакцию 11.05.24, принята к опубликованию 12.06.24

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.7:681.518

РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С АДАПТИВНЫМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

Е.А. Домахин, Н.С. Попов, В.И. Аниброев, М.Е. Вильбергер

DEVELOPMENT OF A FULL - ORDER OBSERVER FOR SUBMERSIBLE INDUCTION ELECTRIC MOTORS WITH ADAPTIVE OBSERVER IN THE REFERENCE MODEL

E.A. Domakhin, N.S. Popov, V.I. Anibroev, M.E. Vilberger

В работе представлен наблюдатель полного порядка для нагруженного погружного кабеля на основе схемы замещения с каскадным включением четырехполюсников. Предложенная структура наблюдателя позволяет вычислять оценку напряжения и тока, потребляемого погружным электродвигателем. Вычисленные оценки тока и напряжения на электродвигателе могут быть использованы для разработки стандартных наблюдателей переменных состояния электродвигателя, применяемых в электроприводе переменного тока. Выполнено имитационное моделирование для оценки качества синтезированной системы.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, установка электроцентробежного насоса, наблюдатель полного порядка, длинная линия

The paper presents a full-order observer for a loaded submersible cable based on an equivalent circuit with cascaded four-terminal circuits. The proposed observer structure allows for calculating the estimate of the voltage and current consumed by a submersible motor. The calculated estimates of the motor current and voltage can be used to develop the standard motor state variable observers used in AC drives. Simulation modeling was performed to assess the quality of the synthesized system.

Keywords: submersible motor, electrical submersible pump unit, full-order observer, long transmission line

Введение

Нефтяные ресурсы являются важнейшим фактором в современной мировой экономике, они влияют на политику и определяют ее. Без нефти и нефтепродуктов современная цивилизация не может существовать, особенно учитывая постоянный рост их потребления. Основным оборудованием при

добыче нефти является электрический погружной насос (ЭПН). В России широко используются электроцентробежные насосы (УЭЦН) и электровинтовые насосы (УЭВН). Для обеспечения эффективности работы насосов постоянно необходимо усовершенствовать их компоненты и технологии добычи нефти. Надежность насосного оборудования

является одним из главных показателей его эффективности и определяется межремонтным периодом. Проведение подземного ремонта требует остановки скважины, что приводит к значительным финансовым потерям для нефтяных компаний. Одним из методов, позволяющих повысить эффективность работы ЭЦН, является изменение скорости вращения вала насоса с использованием частотно-управляемого электропривода. В последние годы также возросла важность проблемы «длинных линий». Электроэнергия, передаваемая от поверхности до насоса, в большинстве случаев не соответствует требуемым параметрам, что приводит к неполадкам в работе насосного оборудования.

При эксплуатации установки электроцентробежного насоса с использованием частотно-регулируемого привода для достижения максимального дебита скважины и сохранения работоспособности погружного оборудования необходимо учитывать ограничивающие факторы при снижении и повышении частоты напряжения питания. Например, увеличение частоты приводит к значительному росту потребляемой электроцентробежным насосом мощности, тогда как мощность погружного электродвигателя изменяется линейно. Возможна ситуация, когда мощности на валу электроцентробежного насоса будет недостаточно, и станция управления выдаст сигнал на остановку погружного электродвигателя из-за превышения допустимой токовой нагрузки. При снижении частоты может произойти обратная ситуация, когда защита может выдать сигнал на остановку электроцентробежного насоса из-за снижения тока ниже минимально допустимого значения. Это связано с тем, что напор насоса зависит от квадрата частоты вращения рабочего колеса, и может возникнуть момент времени, когда энергии насоса будет недостаточно для поднятия столба жидкости с динамического уровня. В большинстве случаев для погружного электронасоса в составе электропривода используются погружные асинхронные двигатели. Они характеризуются невысокими значениями КПД и коэффициента

мощности, большими пусковыми токами, относительно большой длиной электродвигателя, а также сложностью реализации эффективного управления.

1. Особенности эксплуатации погружного электропривода

Погруженный электропривод (ПЭД) представляет собой важнейшее оборудование, используемое для добычи нефти из скважин. Однако его эксплуатация сопряжена с рядом специфических сложностей, которые ухудшают его работу.

1. Высокий напор: скважины, в которых используются ПЭД, зачастую характеризуются большим напором, что создает дополнительную нагрузку на оборудование.

2. Отложения солей и парафина: в процессе эксплуатации на внутренних поверхностях ПЭД могут накапливаться отложения солей и парафина, что приводит к снижению его эффективности.

3. Износ узлов насоса: длительная эксплуатация приводит к естественному износу узлов насоса, что может негативно сказаться на его производительности и надежности.

Проблемы пусковых токов и использование частотно-регулируемых приводов.

В тяжелых условиях эксплуатации величина и продолжительность пусковых токов ПЭД значительно превышают расчетные значения, достигая значений в 7-9 раз выше номинальных [1]. Повышенная величина пусковых токов вызывает значительные нагрузки на все элементы электротехнического комплекса с ПЭД. Наиболее эффективным решением для снижения пусковых токов является применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) [2]. ЧРП позволяют плавно изменять частоту питающего напряжения, что приводит к снижению пусковых токов и облегчению запуска ПЭД. Использование ЧРП имеет следующие преимущества:

- Снижение нагрузки на электрическую сеть и оборудование ПЭД.
- Возможность запуска ПЭД после отключения от защит.
- Испытание скважинного оборудования.

- Управление добычей высокодебитных скважин без замены погружного оборудования.

- Изменение режима низкодебитных скважин без их перевода в периодический режим эксплуатации.

- Сокращение времени выхода скважины на режим после ремонта.

Эксплуатационные физические воздействия в режимах коротких замыканий.

Значительные эксплуатационные физические воздействия возникают в режимах коротких замыканий в питающей части электротехнического комплекса с ПЭД. Эти воздействия проявляются в трансформаторах, системе управления, погружном кабеле и самом ПЭД. Наиболее уязвимым элементом является погружной электродвигатель, на который приходится более 25 % отказов, и погружная кабельная линия, на которую приходится более 34 % отказов [1-4]. Эти отказы составляют около 60 % от общего количества нарушений электромеханической системы и аварийных отказов [5]. Нарушения работы в статических режимах. Помимо проблем в режимах коротких замыканий, электротехнический комплекс с ПЭД может испытывать нарушения работы и в статических режимах. Причины таких нарушений могут быть связаны с:

- неисправностями в системе управления;
- перегрузками;
- нестабильным напряжением питания;
- повреждениями кабеля;
- коррозией и другими возрастными деформациями.

Дополнительные аспекты, влияющие на эксплуатацию ПЭД

Помимо указанных выше факторов, на эксплуатацию ПЭД также влияют:

- Качество электропитания: перепады напряжения и частоты в питающей сети могут негативно сказаться на работе ПЭД и привести к аварийным ситуациям.

- Правильность установки и обслуживания: Ошибки при монтаже и обслуживании ПЭД могут существенно сократить его срок службы.

- Контроль и диагностика: Регулярный контроль и диагностика ПЭД позволяют выявить потенциальные проблемы на ранней стадии и предотвратить аварийные ситуации.

Эксплуатация погружного электропривода является сложной задачей, требующей учета многочисленных факторов, таких как высокий напор, отложения, износ, пусковые токи, короткие замыкания и статические режимы. Использование частотно-регулируемых приводов, а также соблюдение правильных правил установки, обслуживания и контроля, позволяет повысить эффективность и надежность работы ПЭД, что приводит к снижению эксплуатационных затрат и увеличению добычи нефти.

Солеотложения в погружных электроцентробежных насосах (ПЭД) и факторы, влияющие на их образование

При эксплуатации погружных электроцентробежных насосов (ПЭД) в нефтяных скважинах одной из основных проблем является образование солеотложений на рабочих органах насосов. Это приводит к снижению эффективности работы ПЭД, возможным поломкам и необходимости дорогостоящего ремонта.

Проблема солеотложений усугубляется особенностями нефтяных скважин, в частности:

- Высокая обводненность пластовой жидкости. Вода содержит растворенные минеральные соли, которые при определенных условиях могут выпадать в осадок.

- Наличие растворенных и нерастворенных природных минералов. К таким минералам относятся карбонаты, сульфаты, хлориды кальция, магния и железа. Эти минералы могут образовывать отложения на рабочих органах ПЭД, приводя к закупориванию каналов и снижению производительности насоса.

- Изменение термобарических условий в скважине. В процессе добычи нефти изменяются температура и давление в скважине. Эти изменения могут привести к переходу растворенных солей в твердую фазу и образованию осадка.

- Смешивание пластовых вод с закачиваемыми водами. Для поддержания пластового давления и интенсификации добычи нефти в скважины могут закачиваться воды другого состава, нежели пластовая жидкость. Смешивание этих вод может приводить к образованию солеобразующих соединений и агрессивной среды, которая способствует коррозии металла и образованию солеотложений.

Помимо состава пластовой жидкости и условий эксплуатации, на образование солеотложений также влияют:

- Конструктивные особенности ПЭД. Наличие застойных зон, коррозия поверхности и другие конструктивные дефекты могут создать благоприятные условия для формирования и накопления солевых отложений.

- Режим эксплуатации скважины. Циклический режим работы скважин, при котором насос периодически включается и выключается, усиливает воздействие солеотложений на рабочие органы ПЭД. При тяжелом пуске, когда насос не может сдвинуться с места, отложения могут заклинивать его окончательно.

Циклическая эксплуатация добывающих скважин (ЦЭС) с помощью ПЭД имеет ряд преимуществ, таких как увеличение дебита, снижение энергопотребления и увеличение межремонтного периода. Однако ЦЭС также может оказывать неоднозначное влияние на образование солеотложений.

С одной стороны, кратковременная эксплуатация ПЭД большой производительности позволяет существенно снизить воздействие солеотложений и мехпримесей. Это происходит потому, что при кратковременной работе насос не успевает выработать большое количество осадка, а мехпримеси не успевают осесть на рабочих органах насоса. С другой стороны, циклическое включение и выключение ПЭД может привести к более быстрому образованию и накоплению солеотложений. При выключении насоса в застойных зонах создаются благоприятные условия для роста кристаллов соли. Последующее включение насоса может сопровождаться разрушением этих

кристаллов и их последующим осаждением на рабочих органах.

Таким образом, влияние ЦЭС на образование солеотложений в ПЭД зависит от конкретных условий эксплуатации, состава пластовой жидкости и конструктивных особенностей насоса. Для каждой скважины необходимо подбирать оптимальный режим эксплуатации, который позволит минимизировать образование солеотложений и обеспечить стабильную работу ПЭД.

2. Система управления ПЭД

Скалярное управление обеспечивает практически постоянный момент на валу в широком диапазоне частот, независимо от самой частоты. Тем не менее, на низких скоростях момент может уменьшаться, что требует повышения отношения напряжения к частоте. Поэтому каждый двигатель имеет свой определенный диапазон работы по скорости. Чтобы полностью избежать снижения момента, необходимо увеличить отношение напряжения к частоте. Невозможно разработать систему скалярного управления скоростью без датчика скорости на валу, так как изменения нагрузки сильно влияют на реальную скорость вращения ротора. Даже с наличием датчика скорости, при скалярном управлении достичь высокой точности регулирования момента сложно и экономически нецелесообразно. Недостатки скалярного управления ограничивают его применение в электротехнических комплексах с ПЭД.

В настоящее время актуально внедрение методов бездатчикового векторного управления (ВУ), которые позволяют контролировать скорость вращения и момент на валу электродвигателя в любом диапазоне при контроле частоты и фазы питающего напряжения. Это сделало управление более точным за счет управления углом пространственного вектора. Векторное регулирование, несмотря на то, что сложнее в реализации из-за вычислительной сложности, обеспечивает более точное управление. Проблемы его реализации связаны с обработкой данных и с чувствительностью

электропривода к изменениям параметров в процессе работы.

Функциональная схема УЭЦН с ПЭД на базе асинхронного двигателя с коротко-

замкнутым ротором (АДКЗР), приведена на рис. 1.

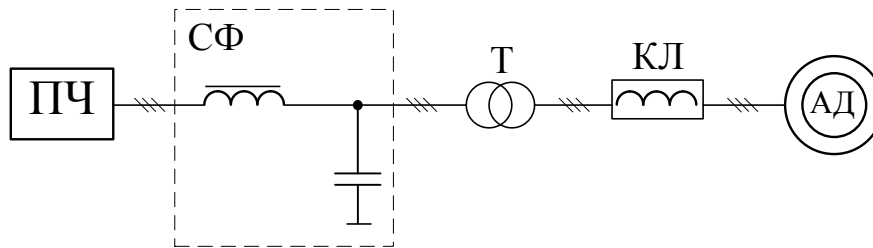


Рис. 1. Функциональная схема УЭЦН с ПЭД на базе АДКЗР

На рис. 1 ПЧ – преобразователь частоты, СФ – синусный фильтр, Т – повышающий трансформатор, КЛ – кабельная линия, АД – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Данный тип схемы с повышающим трансформатором получил достаточное распространение в УЭЦН с ПЭД

с применением скалярных алгоритмов управления [6]. Для реализации системы векторного управления схему на рис. 1 предлагается дополнить датчиками выходного напряжения и тока на стороне обмотки высшего напряжения (ВН), как изображено на схеме рис. 2.

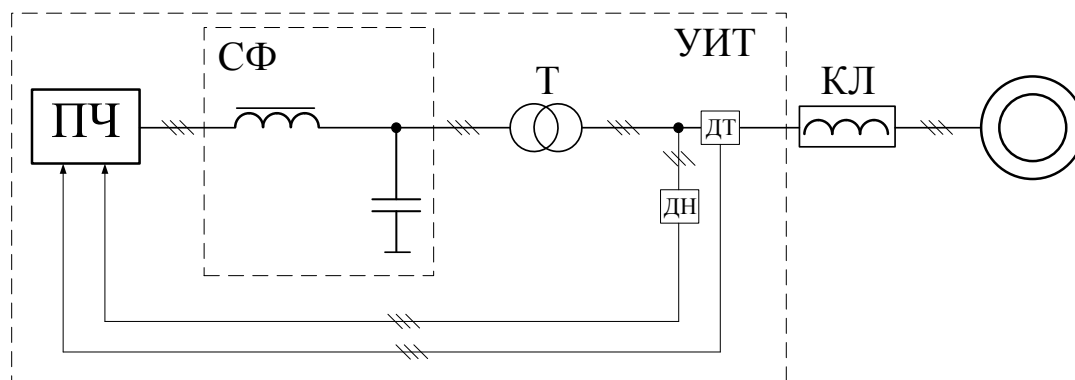


Рис. 2. Функциональная схема УЭЦН с ПЭД с модернизацией для системы ВУ

Наличие в функциональной схеме таких элементов как СФ, Т и КЛ усложняет разработку системы ВУ, в отличие от подключения. Систему ПЧ – СФ – Т возможно рассматривать как регулируемый источник питания, следовательно, для организации ВУ ПЭД требуется разработка наблюдателя системы КЛ – ПЭД.

Процессы в КЛ могут быть представлены с учетом уравнений теории длинных линий и распределенных параметров. Другим способом представления является описание процессов в длинной линии, аналогично процессам в четырехполюснике (π-секции). При этом минимальное число четырехполюсников, которыми может быть

представлена длинная линия должно быть задано из условия:

$$2N^2 \gg |jB \cdot (R + jX)|, \quad (1)$$

где N – количество элементарных π-секций; $B = \omega C_l l$ – емкостная проводимость линии, См; $R = R_l l$ – активное сопротивление линии, Ом; $X = \omega L_l l$ – индуктивное сопротивление линии, Ом; C_l, R_l, L_l – погонная емкость, активное сопротивление, индуктивность линии, Ф/км, Ом/км, Гн/км; ω – максимальное значение расчетной циклической частоты в модели, рад/с; l – длина линии, км.

В практическом смысле в уравнении (1) число четырехполюсников рекомендуется

принимать из расчета 1 звено на 1 км длины кабельной линии [7].

Процессы в нагруженной линии, длиной 2 км, могут быть представлены системой уравнений [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p \cdot i_{\text{кл}\alpha} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} i_{\text{кл}\alpha} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{кл}1\alpha} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{кл}\alpha} \\ p \cdot i_{\text{кл}\beta} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} i_{\text{кл}\beta} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{кл}1\beta} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{кл}\beta} \\ p \cdot i_{\text{кл}2\alpha} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} i_{\text{кл}2\alpha} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{кл}2\alpha} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{вых}\alpha} \\ p \cdot i_{\text{кл}2\beta} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} i_{\text{кл}2\beta} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{кл}2\beta} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} u_{\text{вых}\beta} \\ p \cdot u_{\text{кл}1\alpha} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{кл}\alpha} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{кл}2\alpha} - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} u_{\text{кл}1\alpha} \\ p \cdot u_{\text{кл}1\beta} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{кл}\beta} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{кл}2\beta} - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} u_{\text{кл}1\beta} \\ p \cdot u_{\text{вых}\alpha} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{кл}2\alpha} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{вых}\alpha} - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} u_{\text{вых}\alpha} \\ p \cdot u_{\text{вых}\beta} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{кл}2\beta} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} i_{\text{вых}\beta} - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} u_{\text{вых}\beta} \end{array} \right. \quad (2)$$

На основании системы (2) возможна разработка наблюдателя полного порядка (НПП) для нагруженной кабельной линии. Для работы НПП в соответствии с системой (2) необходимо наличие оценки тока нагрузки $I_{\alpha\beta}^{\text{вых}} = \begin{bmatrix} i_{\text{вых}\alpha} \\ i_{\text{вых}\beta} \end{bmatrix}$. Определение дан-

ной величины может быть получено с применением подхода, представленного в [7].

В данной работе предлагается иной подход для разработки наблюдателя, уравнения, которого представлены ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} p \cdot \hat{i}_{\text{кл}\alpha} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}\alpha} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}1\alpha} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}\alpha} \\ p \cdot \hat{i}_{\text{кл}\beta} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}\beta} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}1\beta} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}\beta} \\ p \cdot \hat{i}_{\text{кл}2\alpha} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}2\alpha} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}2\alpha} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{вых}\alpha} \\ p \cdot \hat{i}_{\text{кл}2\beta} = -\frac{1}{T_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}2\beta} + \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}2\beta} - \frac{1}{L_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{вых}\beta} \\ p \cdot \hat{u}_{\text{кл}1\alpha} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}\alpha} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}2\alpha} - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}1\alpha} \\ p \cdot \hat{u}_{\text{кл}1\beta} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}\beta} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}2\beta} - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{кл}1\beta} \\ p \cdot \hat{u}_{\text{вых}\alpha} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}2\alpha} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} \left(\frac{K_{\text{П}} + K_{\text{И}} p}{p} (i_{\text{кл}\alpha} - \hat{i}_{\text{кл}\alpha}) \right) - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{вых}\alpha} \\ p \cdot \hat{u}_{\text{вых}\beta} = \frac{1}{C_{\text{кл}}} \hat{i}_{\text{кл}2\beta} - \frac{1}{C_{\text{кл}}} \left(\frac{K_{\text{П}} + K_{\text{И}} p}{p} (i_{\text{кл}\beta} - \hat{i}_{\text{кл}\beta}) \right) - \frac{G_{\text{кл}}}{C_{\text{кл}}} \hat{u}_{\text{вых}\beta} \end{array} \right. \quad (3)$$

где $K_{\text{П}}$, $K_{\text{И}}$ – настроечные коэффициенты наблюдателя.

Для идентификации параметров АДКЗР возможно применение ряда подходов, в данной работе предлагается к рассмотрению зарекомендовавший себя на многих практических применениях подход к разра-

ботке адаптивного наблюдателя с эталонной моделью [9].

На рис. 3 приведена структурная схема системы с наблюдателем полного порядка для УЭЦН с ПЭД на базе АДКЗР.

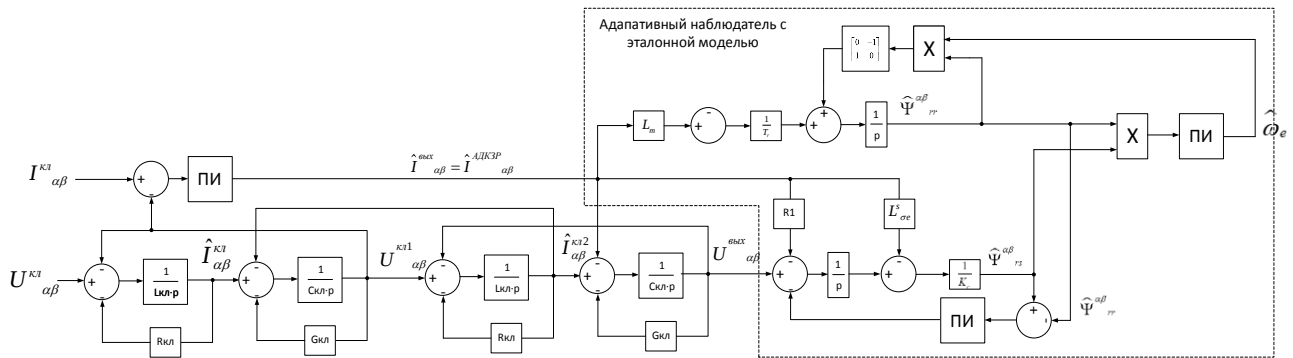


Рис. 3. НПП для системы УЭЦН с ПЭД

3. Результаты имитационного моделирования

В качестве объекта для исследования принят ПЭД с параметрами, приведенными в табл. 1, КЛ, с параметрами, приведенными в табл. 2 [8, 10].

В соответствии с табл. 2 модель КЛ представлена в виде 2 последовательно включенных π -секций.

График переходных процессов в наблюдателях напряжения, тока ПЭД, частоты вращения ПЭД при осуществлении плавного пуска ПЭД на холостой ход с последующим ступенчатым набросом нагрузки.

Таблица 1 – Параметры ПЭД

R_s , Ом	L_{ls} , мГн	R_r' , Ом	L_{2s} , мГн	L_m , мГн	J , кг·м ²	Z_p
2,995	8,493	1,167	11	211	2,63	2

Таблица 2 - Параметры кабельной линии

Погонная емкость, мкФ/км	Погонная индуктивность, мГн/км	Погонное сопротивление, мОм/км	Погонная проводимость мсм/км	Длина, км
0,212	0,3	963	1	2

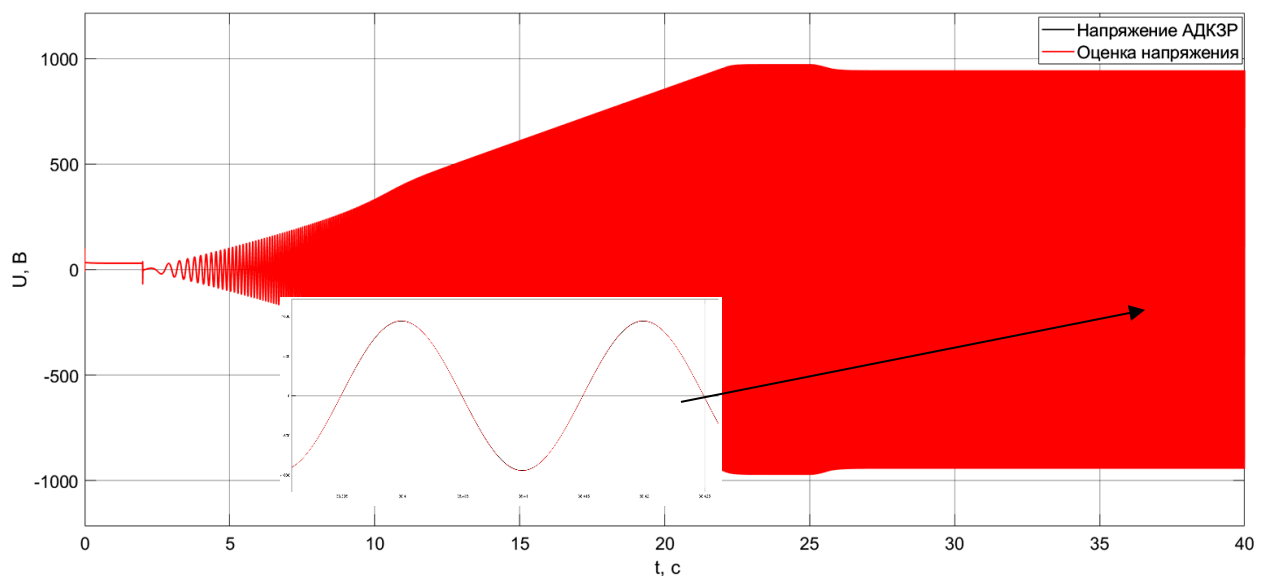


Рис. 4. Переходный процесс в НПП по напряжению ПЭД

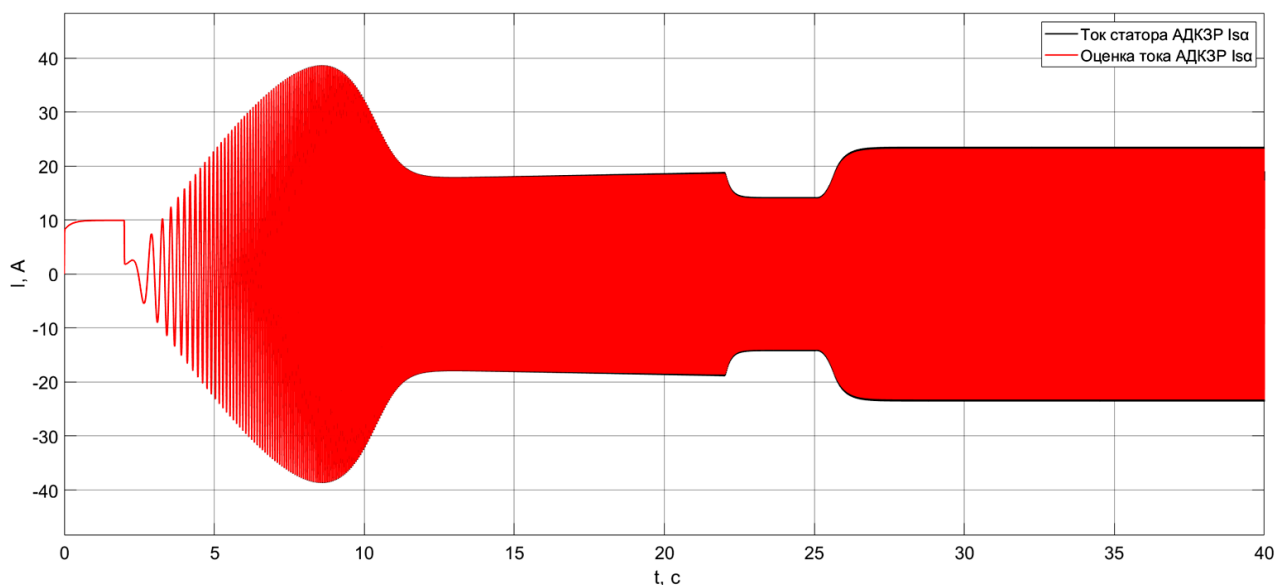


Рис. 5. Переходные процессы в НПП по току статора ПЭД

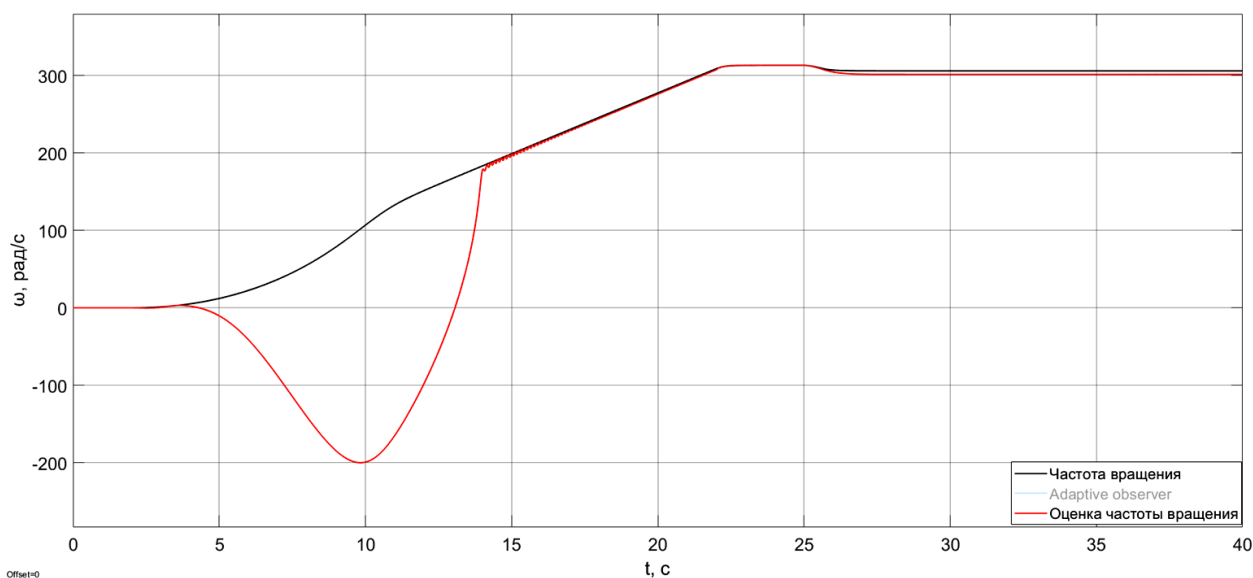


Рис. 6. Переходные процессы в НПП по частоте вращения ПЭД

Выводы

В работе был предложен вариант реализации наблюдателя полного порядка для системы УЭЦН – ПЭД на базе АДКЗР, подключенным к ПЧ по длинной линии электропередачи. Предложенный НПП имеет ряд особенностей:

1. Для реализации НПП необходимо наличие датчиков напряжения и тока со стороны ВН повышающего трансформатора.

2. Предложенный НПП позволяет определить напряжение питания на АДКЗР, а также ток АДКЗР, подключенным при помощи длинной линии.

3. Структура НПП позволяет с достаточной степенью точности определять значения оценок переменных состояния системы, что является достаточным заделом для разработки системы ВУ ПЭД на базе АДКЗР.

4. В работе предложена структура, позволяющая выполнять отдельный синтез наблюдателей напряжения и тока АДКЗР и применять стандартные и известные подходы к оценке переменных состояния АДКЗР.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Салахов А.Х., Гафаров А.Р., Мухамедьяров Д.А. Обзор современных конструкций погружных электрических двигателей, эксплуатируемых при нефтедобыче в условиях крайнего севера // ТПУ. 2015. Секция 4. С. 279-281.
2. Альбокринов В.С., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х. Перенапряжения и защита от них в электроустановках нефтяной промышленности. Самара: СамГТУ, 1997. 324 с.
3. Гольдштейн В.Г., Романов В.С. Обзор современного состояния погружных электродвигателей в нефтедобыче с выработкой рекомендаций по повышению энергоэффективности и надежности // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы док XII молодёж. науч.-практ. конф. Казань: КГЭУ, 2015. С. 139-145.
4. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. 168 с.
5. Гирфанов А.А. Электромагнитная совместимость погружного электрооборудования предприятий нефтедобычи и разработка комплекса мер по повышению его надежности: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Самара, 2005. 201 с.
6. Сагитова А.Р., Хазикарамов А.У. Интеллектуальные системы управления УЭЦН // Вестник науки. 2019. № 8 (17).
7. Раков И.В., Глазырин А.С., Кладиев С.Н. Разработка и настройка наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 219-231.
8. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев и др. // Известия ТПУ. 2018. № 2.
9. Full order observer for speed estimation of vector controlled induction motor drive / A. Diab, D. Kotin, A. Anosov, O. Slepcev // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. P. 40-45.
10. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев и др. // Известия ТПУ. 2021. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-poryadka-redutsirovannoy-dinamicheskoy-modeli-nenagruzhennogo-neftepogruzhnogo-kabelya-na-osnove-approksimatsii> (дата обращения: 04.03.2024).

Домахин Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

Попов Никита Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

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

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

Аниброев Владислав Иванович – ассистент кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

Вильбергер Михаил Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)

Vladislav I. Anibroev – Assistant Lecturer, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Plants, Novosibirsk State Technical University

Mikhail E. Vilberger – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics, Novosibirsk State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.04.24, принята к опубликованию 12.05.24

УДК 621.311.6

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

О.А. Андреева, А.И. Земцов, Л.Г. Мигунова

SIMULATION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF ELECTRONIC DEVICES WITH OPTICAL RADIATION

O.A. Andreeva, A.I. Zemtsov, L.G. Migunova

В статье рассмотрены системы питания электронных устройств оптическим излучением. Подробно рассмотрен вопрос имитационного моделирования одного из перспективных вариантов схем построения системы питания электронных устройств. Разработана модель предлагаемой системы в программном комплексе MATLAB с указанием допущений и моделируемых блоков.

Ключевые слова: *система питания оптическим излучением, компьютерная модель, оптоволоконный тракт, лазерный диод*

Abstract. *This article considers the optical radiation power supply system of electronic devices. The simulation modeling issue for building one of the promising options in electronic devices power supply systems is considered. The model of the proposed system is developed in the MATLAB program complex with specification of assumptions and modeled blocks.*

Keywords: *optical radiation power supply system, computer model, fiber optic path, laser diode*

Современные технологии отличаются высокой энергетической насыщенностью, что требует создания измерительных систем, обладающих высокой помехозащищенностью, обеспечивающих гальваническую развязку между точкой измерения и регистрирующим устройством, отличающихся высокой точностью, взрывобезопасностью, и относительно невысокой стоимостью. Этим требованиям в значительной степени отвечают гибридные измерительные системы (ГИС), которые сочетают достоинства волоконно-оптического канала передачи и микроэлектронных датчиков технологических параметров [1, 2]. Также данная система обеспечивает как гальваническую развязку, так и высокую помехозащищенность.

В настоящее время наиболее перспективной является система питания оптическим излучением (СПОИ). В зависимости

от области применения к источникам оптического излучения предъявляются разные технические и экономические требования. К основным достоинствам СПОИ относят: передачу сигнала без регенерации на большие расстояния; нечувствительность к электромагнитным помехам и радиочастотным интерференциям; относительно небольшой вес оптических кабелей по сравнению с металлическими; большее количество каналов по сравнению с физическими цепями [3].

Основной характеристикой СПОИ является КПД преобразования оптического излучения в электрическую мощность для питания электронной схемы удалённого измерительного модуля. От этого параметра зависит надёжность и ресурс работы основных компонентов СПОИ – фотовольтаического преобразователя (ФВП), в котором происходит преобразование энергии, и лазера питания. Хорошие фотовольтаиче-

ские характеристики при малой оптической мощности (< 100 мВт) были получены посредством использования эпитаксиальных структур на основе AlGaAs [4].

В работе [5] рассмотрен вариант практической реализации СПОИ с автоподстройкой мощности питающего излучения в виде блок-схемы (рис. 1).

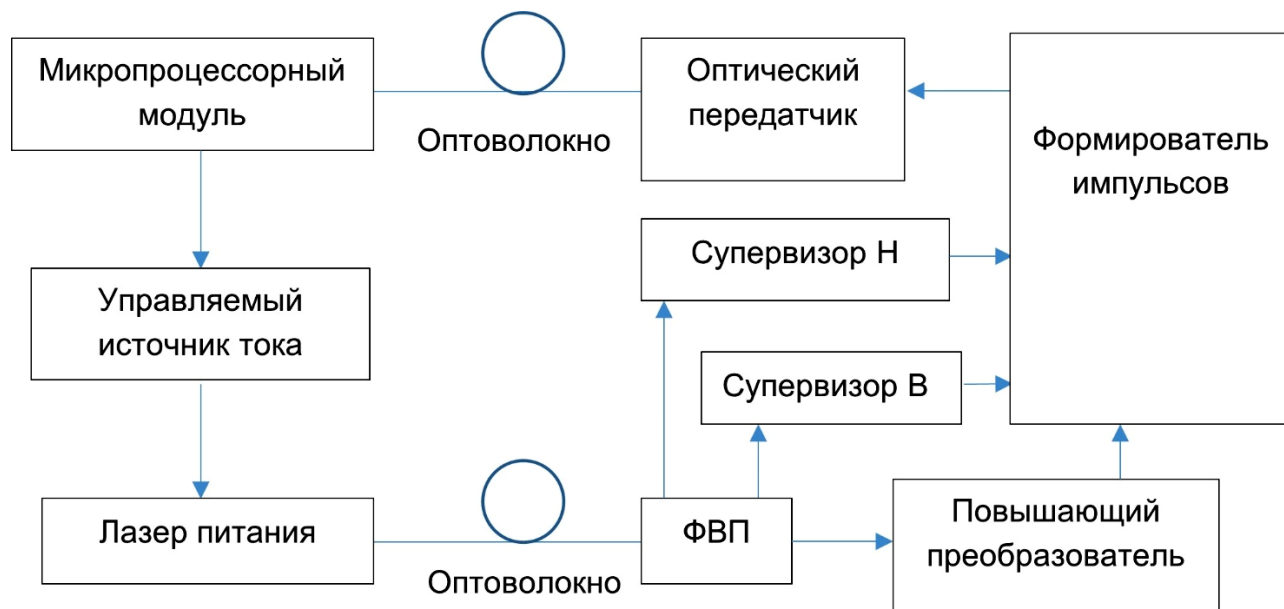


Рис. 1. Блок-схема СПОИ

Предложенная блок-схема работает следующим образом: в начальный момент времени формируется управляющий сигнал для источника тока с мощностью излучения, достаточной для запуска преобразователя, на выходе которого подключается нагрузка. Через несколько секунд начинается снижение управляющего тока (значение зависит от величины емкости, подключённой к выходу фотовольтаического преобразователя). При достижении верхнего порога напряжения точки максимальной мощности супервизор В формирует импульс, который передается на микропроцессорный модуль, после чего крутизна уменьшения тока уменьшается в 5-10 раз, а значение тока питания лазера в этот момент микропроцессор запоминает. При достижении нижнего порога точки максимальной мощности информационный импульс формирует супервизор Н и, с приходом этого импульса, модуль начинает плавно увеличивать ток лазера до величины равной значению тока, хранящегося в памяти микропроцессора, после чего процесс повторяется.

Для температурной коррекции напряжения точки максимальной мощности в одно из плеч входного делителя супервизоров предусмотрены соответствующие терморезисторы.

Следовательно, предложенный вариант построения СПОИ обеспечит работу ФВП в точке максимальной мощности при изменении потребляемого нагрузкой тока и изменении температуры.

Оперативный анализ возможных режимов работы и настройку параметров схем с наименьшим количеством издержек можно проводить при имитационном моделировании. Для разработки модели воспользуемся программным комплексом Matlab. Эксперимент также позволит в дальнейшем предсказывать и прогнозировать поведение системы в различных условиях. Схема модели СПОИ в программном комплексе Matlab представлена на рис. 2.

Модель оптической системы электропитания разделим на две части: передающую и приёмную.

Основу компьютерной модели передающей части СПОИ образует лазерный диод с источником питания.

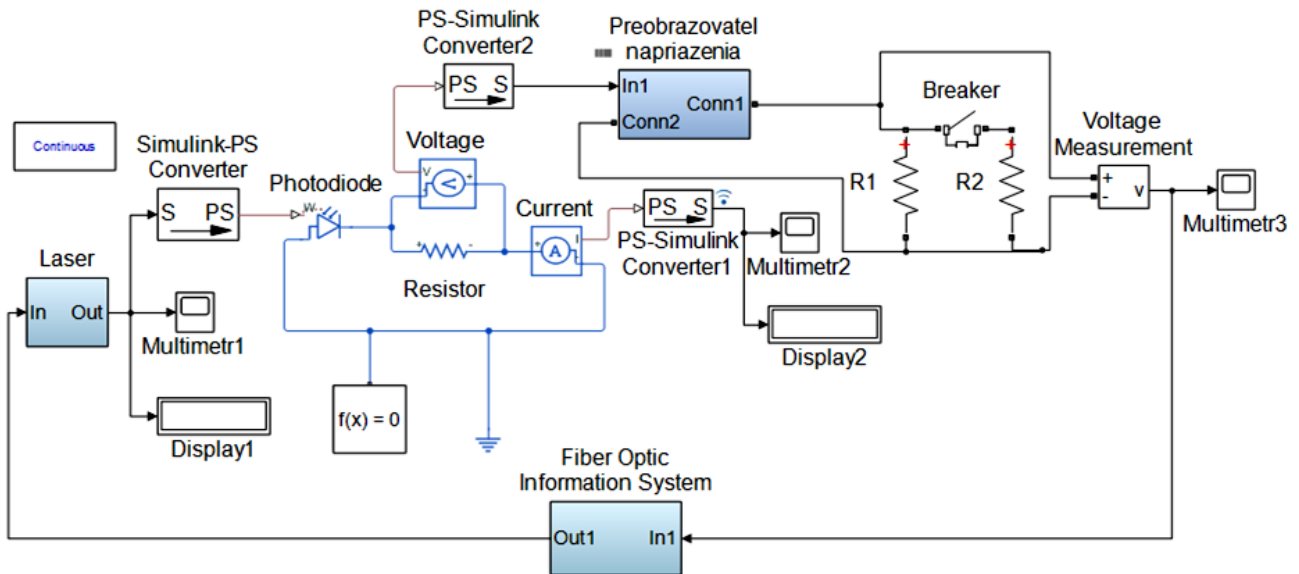


Рис. 2. Схема модели оптической системы электропитания

Модель данного узла базируется на ватт-амперной характеристике лазерного диода. В зависимости от значения тока накачки излучение имеет либо спонтанный характер, либо становится индуцированным, что приводит к резкому росту мощности излучения и его когерентности. Для моделирования лазерного диода применены блоки Dead Zone и Saturation, а также блок Gain. Пороговое значение тока накачки заносится в окно настройки блока Dead Zone [6, 7].

Значение коэффициента K , определяющего наклон ватт-амперной характеристики, вводится в окно настройки блока Gain. Значение рабочего тока лазерного диода редактируется в настройках блока Saturation.

Драйвер лазерного диода обязательно должен соотноситься с источником тока, так как выходная оптическая мощность лазерного диода находится в зависимости от тока, проходящего по р-п-переходу.

При моделировании лазера источник тока представлен апериодическим звеном с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1},$$

где K , T – коэффициент передачи и постоянная времени соответственно.

Управление источником тока осуществляется с помощью ПИД-регулятора,

на вход которого подается разница между заданным значением напряжения на выходе оптической системы и его фактическим значением.

В настройках блока Constant заносится заданное значение напряжения на выходе оптической системы электропитания. В настройках блока PID Controller в процессе отладки модели вводятся значения коэффициентов пропорционального (P), интегрального (I) и дифференциального (D) каналов регулятора.

Схема модели передающей части оптической системы электропитания, оформленная в виде подсистемы Laser и представлена на рис. 3.

Для моделирования приемной части оптической системы электропитания применены блоки из папки SimElectronics.

Выход подсистемы Laser соединен через блок Simulink-PS Converter со входом блока Photodiode, который моделирует фотодиод.

Этот блок используется в качестве управляемого источника тока и экспоненциального диода, соединенных параллельно. Управляемый источник тока производит ток, пропорциональный плотности потока излучения.

За нагрузку фотодиода примем входное сопротивление повышающего преобразователя напряжения, которое моделируется блоком Resistor.

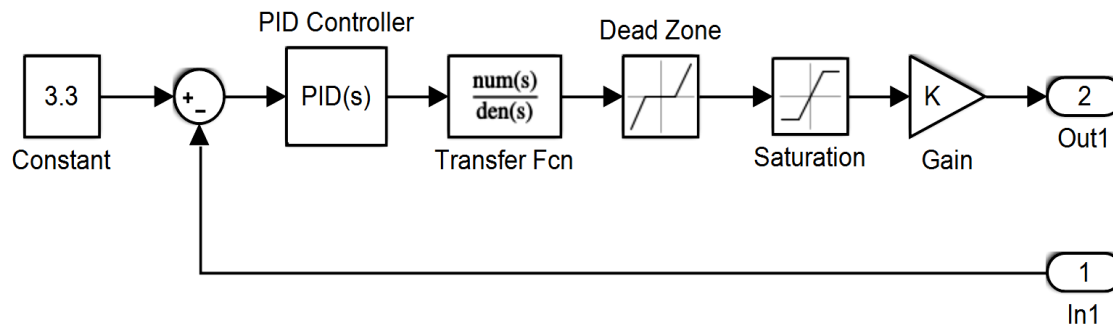


Рис. 3. Схема подсистемы Laser

Для контроля напряжения и протекающего через него тока Current устанавливаем блоки Voltage Sensor и Sensor. Сигнал с выхода блока Voltage Sensor через блок PS-Simulink Converter 2 поступает на вход подсистемы Step-up Voltage Converter.

Сигнал с выхода блока Current Sensor через блок PS-Simulink Converter 1 подает-

ся на блоки, моделирующие измерительные приборы. Подсистема Step-up Voltage Converter моделирует повышающий преобразователь напряжения. Схема подсистемы представлена на рис. 4.

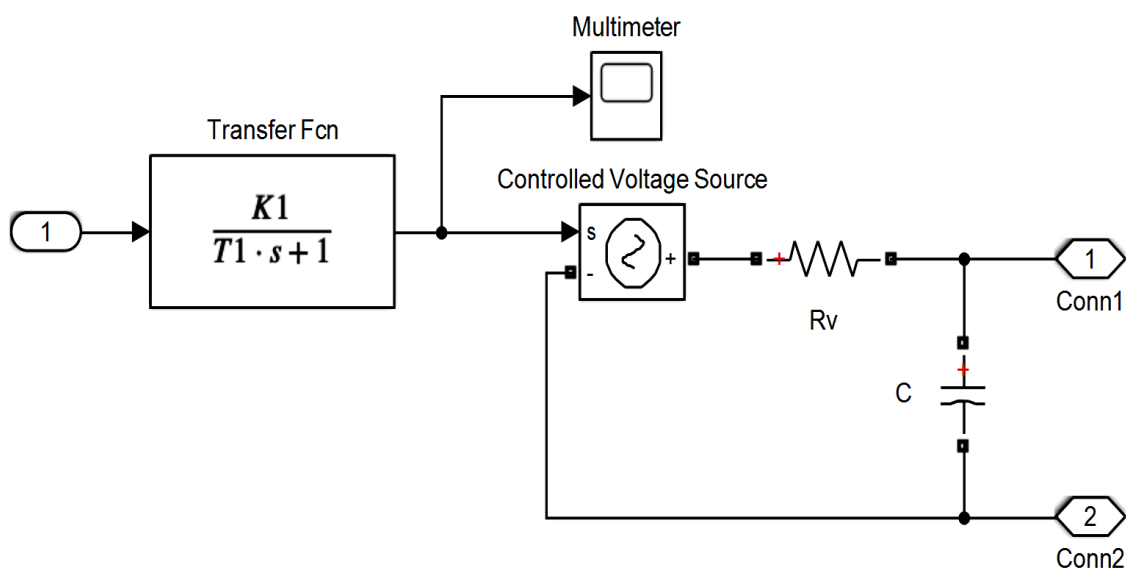


Рис. 4. Схема подсистемы Step-Up Voltage Converter

В ее состав входят блоки Transfer Fcn, моделирующий задержку нарастания выходного напряжения, и Controlled Voltage Source, к выходу которого через резистор R_v подключен конденсатор C . Резистор R_v отображает выходное сопротивление повышающего преобразователя, конденсатор C – фильтр на его выходе [8].

Удаленные электронные устройства представлены эквивалентными сопротивлениями R_1 и R_2 . Канал обратной связи реализован в виде подсистемы Fiber Optic

Information System, которая учитывает задержки передачи мощности и информационного сигнала передаваемым по оптоволоконному волноводу.

По результатам проведенного моделирования можно сделать вывод, что полученная модель при первичной апробации отвечает требованиям адекватности и в дальнейшем позволит проводить оперативные моделирования СПОИ для подбора параметров различных элементов физической схемы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Power Transmission by Optical Fibers for Component Inherent Communication / M. Dumke et al. // Systemics, cybernetics and informatics. 2010. № 1. P. 55-60.
2. Соколовский А.А., Моисеев В.В. Гибридные волоконно-оптические датчики // Фотон-экспресс. 2021 № (6). С. 278-279.
3. Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments / J.D.L. Cardona, C. V'azquez, D.S. Montero, P.C. Lallana // Journal of lightwave technology. 2018. Vol. 36. № 3. p. 748.
4. Соколовский А.А. Фотовольтаические характеристики светодиодов на основе AlGaAs // Письма в ЖТФ. 2018. № 8. С. 57-62.
5. Соколовский А.А., Моисеев В.В., Земцов А.И. Устройство питания электронных устройств оптическим излучением. Патент на полезную модель RU 200668 U1, 05.11.2020. Заявка № 2020116854 от 19.05.2020.
6. Воронов А.С., Калигин Н.Н. Имитационное моделирование лазерного диода со встроенным фотодиодом // Ползуновский альманах. 2016. № 2. С. 14-16.
7. Матюхин С.И., Макулевский С.И., Деев О.В. Вольтамперная характеристика лазерного диода на основе арсенида галлия // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3 (299). С. 9-22.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК Пресс; Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.

Андреева Ольга Алексеевна – магистрант кафедры «Электрические станции» Самарского государственного технического университета

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

Мигунова Людмила Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции» Самарского государственного технического университета

Olga A. Andreeva – Master's student, Department of Electric Power Plants, Samara State Technical University

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

Ludmila G. Migunova – Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electric Power Plants, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 20.05.24, принята к опубликованию 12.06.24

УДК 621.3.078

**РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЯ
ДИНАМИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНЕ
ПО СИГНАЛАМ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
СТАНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМ НАСОСОМ**

К.М. Чубаров, В.С. Шуев, А.В. Стариков

**DEVELOPMENT OF A COMPUTER
OF THE DYNAMIC LEVEL LIQUIDS IN THE WELL ACCORDING
TO SENSORS SIGNALS ELECTRICAL VALUES
OF THE SUBMERSIBLE PUMP CONTROL STATION**

K.M. Chubarov, V.S. Shuev, A.V. Starikov

В статье рассматривается новый подход к определению динамического уровня жидкости в нефтяной скважине по измеренным действующим значениям фазного тока и напряжения на выходе станции управления погружным насосом, а также с учетом частоты. Найдена аналитическая зависимость, связывающая динамический уровень с током, напряжением, частотой и параметрами электротехнического комплекса добывающей скважины. Произведено моделирование системы управления погружным насосом, замкнутой по сигналу вычислителя динамического уровня. Результаты моделирования показывают, что применение вычислителя позволяет вывести нефтяную скважину на стационарный режим работы с заданным динамическим уровнем, причем погрешность достижения динамического уровня не превышает 2 %.

Ключевые слова: динамический уровень жидкости, нефтяная скважина, датчик тока, датчик напряжения, частота

The article discusses a new approach to determining the dynamic level of liquid in the oil well based on the measured effective values of the phase current and voltage at the output of a submersible pump control station, as well as with account for the frequency. An analytical relationship was found that connects the dynamic level with the current, voltage, frequency and parameters of the electrical complex of a producing well. A simulation of the control system of a submersible pump, closed by a signal from a dynamic level computer, was carried out. The simulation results show that the use of a computer makes it possible to bring an oil well to a stationary operating mode with a given dynamic level, and the error in achieving the dynamic level does not exceed 2 %.

Keywords: dynamic fluid level, oil well, current sensor, voltage sensor, frequency

Введение

Стабилизация динамического уровня жидкости позволяет обеспечить длительный режим работы электротехнического комплекса добывающей скважины с тре-

буемым дебитом и увеличить межремонтный период. Применение специализированных датчиков для измерения динамического уровня существенно увеличивает стоимость погружного и наземного обо-

рудования. В то же время станции управления погружными насосами оснащены датчиками таких электрических величин, как фазные токи и напряжения, необходимыми для контроля режимов работы погружного электроцентробежного насоса. Кроме того, для стабилизации динамического уровня необходимо регулировать скорость вращения насоса, поэтому в состав станции управления также входит преобразователь частоты (ПЧ) и программируемый контроллер, обладающий значительной вычислительной мощностью. Поэтому в настоящее время ведутся работы, посвященные поиску методов косвенного определения динамического уровня жидкости в скважине по сигналам датчиков электрических величин [1-3]. Среди них следует выделить способ расчета динамического уровня $H_{дин}$ по формуле [3]

$$H_{дин} = \frac{\left[\left(\frac{I_{cy} - I_{xx.ТМПН}}{k_{ТМПН}} \right)^2 - I_0^2 \right] M_{ном}}{\left[I_{1ном}^2 - I_0^2 \right] \frac{k_Q \rho g}{86400 \eta_{нас}}} - \frac{86400 \eta_{нас} M_0}{k_Q \rho g} - H_{тр} - \frac{P_{буф}}{\rho g} + H_z, \quad (1)$$

где $H_{тр}$ – потери напора на преодоление сил трения в насосно-компрессорных трубах при движении потока жидкости; $P_{буф}$ – буферное давление на устье скважины; ρ – плотность нефтяной смеси; g – ускорение свободного падения; H_z – дополнительный напор, вызванный работой выделяющегося из жидкости газа; k_Q – коэффициент пропорциональности между производительностью насоса и скоростью вращения; $\eta_{нас}$ – коэффициент полезного действия погружного насоса; $I_{1ном}$, I_0 и $M_{ном}$ – номинальный ток статора, ток холостого хода и номинальный момент погружного асинхронного двигателя; $I_{xx.ТМПН}$ и $k_{ТМПН}$ – ток холостого хода и коэффициент трансформации повышающего трансформатора.

Этот метод основан на измерении тока одной из фаз на выходе станции управления I_{cy} . При этом принято допущение, что изменение частоты и действующего значения напряжения питания незначительно влияет на результат расчета, и ток холостого хода I_0 асинхронного двигателя принимается постоянной величиной. Кроме того, формула (1) не учитывает изменение напряжения на статоре погружного двигателя в функции частоты питающего напряжения, тока нагрузки, а также под действием неустойчивости питающей сети. Однако, все эти факторы несомненно влияют на точность расчета, особенно если учесть неустойчивость напряжения, питающего электротехнические комплексы добывающих скважин.

В связи с этим целью работы является поиск аналитической зависимости, позволяющей повысить точность вычисления динамического уровня жидкости в нефтяной скважине по измеренным значениям частоты и фазных токов и напряжений на выходе преобразователя частоты станции управления погружным насосом.

Решение задачи

Для решения поставленной задачи рассмотрим однолинейную схему электротехнического комплекса добывающей скважины, оснащенной погружным асинхронным двигателем М, приводящим в движение центробежный насос (рис. 1).

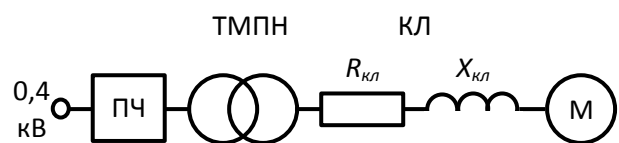


Рис. 1. Схема электротехнического комплекса добывающей скважины

Станция управления погружным насосом имеет в своем составе низковольтный преобразователь частоты ПЧ, получающий питание от трехфазной сети напряжением 0,4 кВ. Поскольку все погружные асинхронные двигатели для нефтяной промышленности выпускаются на так называемой

нестандартное напряжение, к выходу ПЧ подключается повышающий трансформатор ТМПН. Повышающий трансформатор соединен с погружным асинхронным двигателем (ПЭД) кабельной линией КЛ, которая характеризуется активным сопротивлением $R_{кл}$ и индуктивным сопротивлением $X_{кл}$ сопротивления.

В соответствии с рассматриваемой схемой ток холостого хода ПЭД будет зависеть от действующего значения $U_{ф.су}$ и частоты f_1 питающего напряжения на выходе преобразователя частоты станции управления [3]

$$I_0 = \frac{U_{ф.су} k_{ТМПН} - \Delta U_{кл}}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (2\pi f_1 L_1)^2}}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{кл}$ – падение напряжения на кабельной линии, соединяющей погружной двигатель с повышающим трансформатором; L_1 – индуктивность фазной обмотки статора. Формула (2) получена в предположении, что падением напряжения на повышающем трансформаторе можно пренебречь, поскольку оно во много раз меньше $\Delta U_{кл}$.

Падение напряжения на соединительном кабеле можно определить по формуле

$$\Delta U_{кл} = I_1 \sqrt{R_{кл}^2 + 4\pi^2 L_{кл}^2 f_1^2}, \quad (3)$$

где I_1 – ток, протекающий через фазу погружного двигателя.

Подставляя (3) в (2), получим

$$I_0 = \frac{U_{ф.су} k_{ТМПН} - I_1 \sqrt{R_{кл}^2 + 4\pi^2 L_{кл}^2 f_1^2}}{\sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (2\pi f_1 L_1)^2}}, \quad (4)$$

где R_0 – активное сопротивление цепи намагничивания двигателя.

В свою очередь ток статора ПЭД связан с моментом $M_{ПЭД}$ на валу зависимостью [4]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + \frac{(I_{1ном}^2 - I_0^2) M_{ПЭД}}{M_{ПЭД.ном}}}. \quad (5)$$

Момент $M_{ПЭД}$ погружного двигателя можно определить по формуле [3]

$$M_{ПЭД} = \frac{\left(H_{дин} + H_{тр} + \frac{P_{бугф}}{\rho g} - H_z \right) k_Q \rho g}{\eta_{нас}}. \quad (6)$$

где коэффициент пропорциональности k_Q , в отличие от формулы (1), рассчитывается в системе СИ.

Подставляя (6) в (5), получим зависимость тока статора ПЭД от динамического уровня жидкости в скважине

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + \frac{(I_{1ном}^2 - I_0^2)(H_{дин} + \Delta H) k_Q \rho g}{\eta_{нас} M_{ПЭД.ном}}}, \quad (7)$$

где $\Delta H = H_{тр} + \frac{P_{бугф}}{\rho g} - H_z$.

Возведем в квадрат левую и правую часть выражения (7)

$$I_1^2 = I_0^2 + \frac{(I_{1ном}^2 - I_0^2)(H_{дин} + \Delta H) k_Q \rho g}{\eta_{нас} M_{ПЭД.ном}}. \quad (8)$$

Из (8) можно получить зависимость динамического уровня жидкости от токов I_1 и I_0

$$H_{дин} = \frac{\eta_{нас} M_{ном} (I_1^2 - I_0^2)}{k_Q \rho g (I_{1ном}^2 - I_0^2)} - \Delta H. \quad (9)$$

Ток I_1 статора ПЭД связан с током $I_{су}$ на выходе станции управления формулой

$$I_1 = \frac{I_{су} - I_{хх.ТМПН}}{k_{ТМПН}}. \quad (10)$$

Подставляя (4) и (10) в (9), получим зависимость динамического уровня жидкости в скважине $H_{дин}$ с частотой f_1 , током $I_{су}$ и фазным напряжением $U_{ф.су}$ на выходе преобразователя частоты станции управления погружным насосом

$$H_{дин} = \frac{d_1 \left[\frac{d_2 + d_3 f_1^2}{d_5} (I_{cy} - d_4)^2 - \left(d_6 U_{\phi.cy} - \frac{I_{cy} - d_4}{d_6} \sqrt{d_7 + d_8 f_1^2} \right)^2 \right]}{d_9 (d_2 + d_3 f_1^2) - \left(d_6 U_{\phi.cy} - \frac{I_{cy} - d_4}{d_6} \sqrt{d_7 + d_8 f_1^2} \right)^2} - d_{10}. \quad (11)$$

где $d_1 = \frac{\eta_{нас} M_{ном}}{k_Q \rho g}$; $d_2 = (R_1 + R_0)^2$;

$d_3 = 4\pi^2 L_1^2$; $d_4 = I_{xx.TMHH}$; $d_5 = k_{TMHH}^2$;
 $d_6 = k_{TMHH}$; $d_7 = R_{кл}^2$; $d_8 = 4\pi^2 L_{кл}^2$; $d_9 = I_{1ном}^2$;
 $d_{10} = \Delta H$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров ПЭД, погружного насоса, соединительного кабеля и повышающего трансформатора.

Следовательно, вычислитель динамического уровня жидкости в скважине должен производить расчет по формуле (11).

Результаты компьютерного моделирования

Для оценки погрешности вычисления динамического уровня жидкости по формуле (12) и работоспособности системы управления погружным насосом, замкнутой по сигналу вычислителя, произведем ее компьютерное моделирование.

Допустим, что гипотетическая скважина имеет следующие характеристики: площадь затрубного пространства $S_z = 0,0083 \text{ м}^2$; статический уровень жидкости в скважине $H_{ст} = 180 \text{ м}$; коэффициент продуктивности нефтяного пласта $k_{np} = 1,0553 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$; $\rho = 1041 \text{ кг/м}^3$. Скважина оснащена центробежным насосом 0215ЭЦНАКИ5-125И, который приводится во вращение погружным асинхронным двигателем ЭДТ45-103М1. При этом погружная установка обладает следующими параметрами: $k_Q = 4,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{рад}$, $\eta_{нас} = 0,47$, $M_{ПЭД.ном} = 151,6 \text{ Нм}$, $R_1 = 2,32 \text{ Ом}$, $R_0 = 40 \text{ Ом}$, $L_1 = 0,1485 \text{ Гн}$. Повышающий трансформатор имеет коэффициент трансформации $k_{TMHH} = 3,65$ и ток холостого хода $I_{xx.TMHH} = 5,5 \text{ А}$. Для соединения погружного двигателя с трансформатором используется кабель с активным сопротивлением $R_{кл} = 1,148 \text{ Ом}$ и индуктивностью $L_{кл} = 4,835 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$.

Тогда расчетная модель предлагаемой системы управления погружным электроцентробежным насосом будет иметь вид, приведенный на рис. 2. На расчетной модели регулятор динамического уровня и преобразователь частоты представлены следующей композицией блоков (рис. 3). Поскольку инерционность процессов, протекающих в скважине, на несколько порядков выше, то преобразователь частоты представлен безынерционным звеном K_u с линейным законом регулирования напряжения в функции частоты. Регулятор динамического уровня выбран пропорционально-интегральным с коэффициентом передачи $K_n = 0,15$ и постоянной времени $T_u = 25000 \text{ с}$. Его выходной сигнал ограничивается частотой питающего напряжения $f_{1max} = 52 \text{ Гц}$. Расчетная модель вычислителя динамического уровня жидкости имеет следующий вид (рис. 4). Она учитывает, что для рассматриваемой нефтяной скважины и погружного и наземного оборудования коэффициенты, входящие в формулу (11) имеют следующие значения: $d_1 = 1560 \text{ м}$; $d_2 = 1791 \text{ Ом}^2$; $d_3 = 0,871 \text{ Ом}^2/\text{Гц}^2$; $d_4 = 5,5 \text{ А}$; $d_5 = 13,32$; $d_6 = 3,65$; $d_7 = 1,318 \text{ Ом}^2$; $d_8 = 9,23 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^2/\text{Гц}^2$; $d_9 = 762 \text{ А}^2$; $d_{10} = 157 \text{ м}$.

Компьютерное моделирование показывает, что рассматриваемая система управления погружным электроцентробежным насосом выводит нефтяную скважину на стационарный режим работы с заданным динамическим уровнем жидкости 1200 м с погрешностью, составляющей 18 м (рис. 5).

При этом установившемся режиму работы электротехнического комплекса погружного насоса соответствует частота питающего напряжения $f_1 = 41,5 \text{ Гц}$ (рис. 6) и дебит скважины $Q_{скв} = 96 \text{ м}^3/\text{сут.}$ (рис. 7).



Рис. 2. Расчетная модель системы управления погружным электроцентробежным насосом с вычислителем динамического уровня жидкости в скважине



Рис. 3. Расчетная модель регулятора динамического уровня и преобразователя частоты



Рис. 4. Расчетная модель вычислителя динамического уровня жидкости

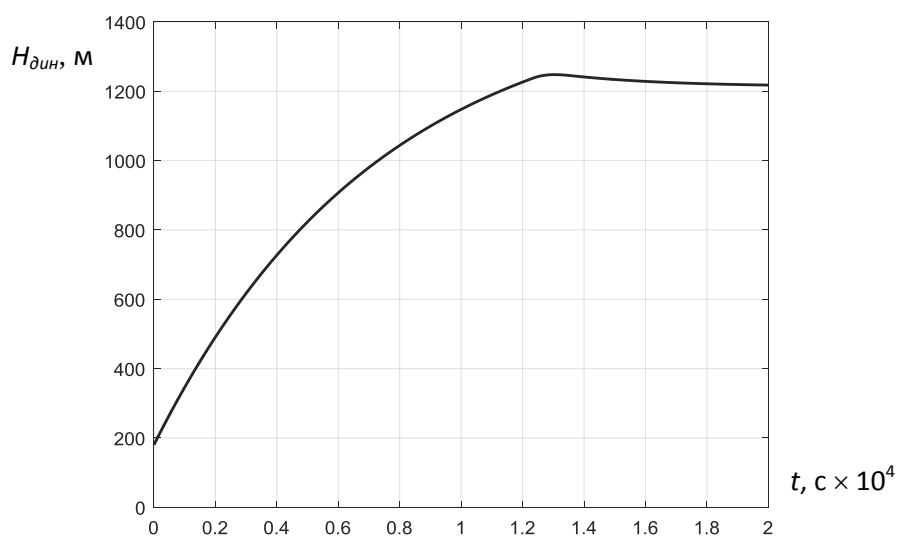


Рис. 5. График изменения динамического уровня жидкости в нефтяной скважине при работе системы управления погружным насосом с разработанным вычислителем

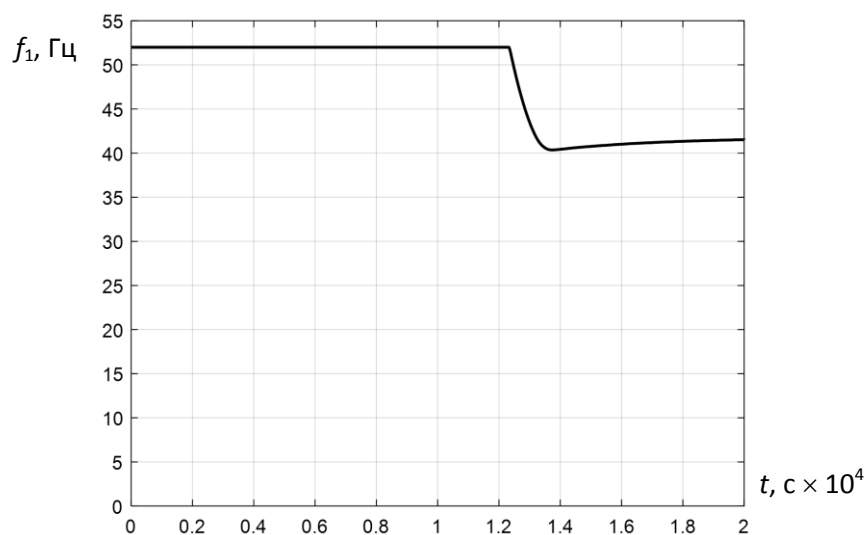


Рис. 6. График изменения частоты питающего напряжения

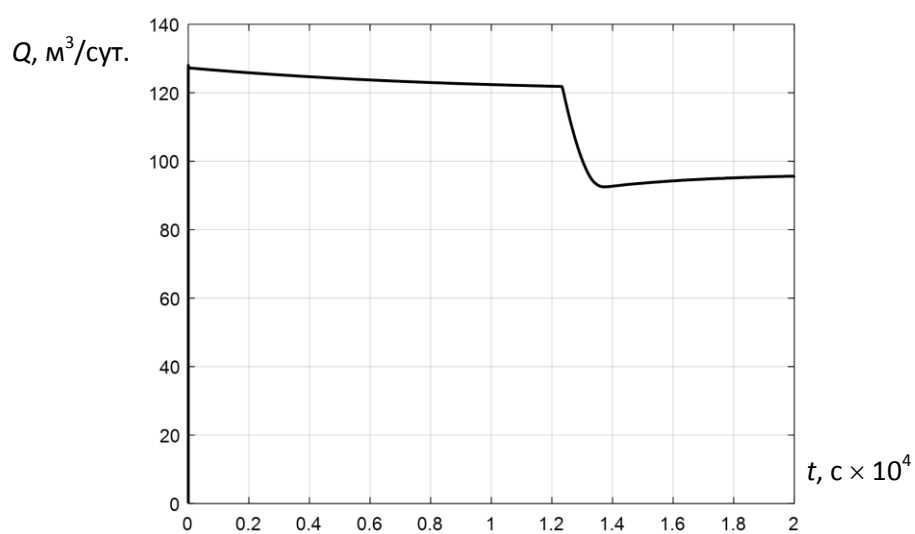


Рис. 7. График изменения производительности погружного насоса

Выводы

1. Найденная аналитическая зависимость позволяет рассчитать динамический уровень жидкости в нефтяной скважине по сигналам датчиков тока и напряжения станции управления погружным насосом с погрешностью менее 2 %.

2. Применение в системе управления погружным насосом разработанного вычислителя динамического уровня позволяет обеспечить вывод нефтяной скважины на стационарный режим работы без применения специализированного датчика.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Стариков А.В., Полежаев Д.Ю., Красненко В.Н.** Анализ погрешности вычисления динамического уровня жидкости в скважине по сигналам датчика расхода // Ашировские чтения: сб. трудов XII Междунар. науч.-практ. конф. Т. III. Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015 С. 90-94.

2. **Масляницын А.П.** Автоматизация технологического процесса добычи нефти погружными центробежными насосами:

автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГАСА, 1999. 18 с.

3. **Стариков А.В., Косорлуков И.А., Чубаров К.М.** Наблюдатель динамического уровня жидкости в нефтяной скважине // Вопросы электротехнологии. 2023. № 3 (40). С. 72-77.

4. **Михайлов О.П.** Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. Москва: Машиностроение, 1990. 304 с.

Чубаров Кирилл Михайлович – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Шуев Владимир Сергеевич – аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

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

Kirill M. Chubarov – Postgraduate, Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

Vladimir S. Shuev – Postgraduate, Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

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

Статья поступила в редакцию 04.04.24, принята к опубликованию 12.05.24

УДК 621.313.12:536.24

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДУГОСТАТОРНОМ ИНДУКТОРНОМ ГЕНЕРАТОРЕ

В.П. Бутко, Р.В. Кузьмин

ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES IN AN ARC-STATOR INDUCTOR GENERATOR

V.P. Butko, R.V. Kuzmin

В данной работе проводится имитационное моделирование тепловых процессов в дугостаторном индукторном генераторе с помощью программы Elcut 6.6. Заданы необходимые упрощения и условия, определены используемые материалы и их параметры. По результатам моделирования сделан вывод о их соответствии с предварительным расчетом, разработаны рекомендации по увеличению точности теплового расчета генератора.

Ключевые слова: тепловые процессы, дугостаторный индукторный генератор, метод конечных элементов, имитационная модель

The research deals with simulation modeling of the thermal processes in an arc-stator inductor generator using the Elcut 6.6 program. The necessary simplifications and conditions are specified, the materials used and their parameters are determined. Based on the modeling results, a conclusion was made that they correspond to the preliminary calculation, and recommendations were developed to increase the accuracy of thermal calculation of the generator.

Keywords: thermal processes, arc-stator inductor generator, finite element method, simulation model

Введение

При проектировании и создании различных электромеханических систем (ЭМС) одним из важнейших разделов является расчет и анализ тепловых процессов [1]. Для серийных машин тепловой расчет представляет собой набор эмпирических формул, которые дают приближенное представление о тепловых параметрах системы. В случае нестандартных, специальных ЭМС часто приходится прибегать к имитационному моделированию, которое позволяет более полно оценить протекающие процессы. Одним из самых распространённых способов моделирования является метод конечных элементов, который позволяет получить результаты, достаточно приближенные к реальным. На основе этого метода работает множе-

ство программ, одной из которых является программа Elcut.

Цель данной работы состоит в том, чтобы произвести анализ тепловых процессов в дугостаторном индукторном генераторе при помощи имитационного моделирования в программе Elcut 6.6, а также разработать рекомендации по повышению точности теплового расчета генератора.

Задачи работы:

1. Определение и задание необходимых упрощений.
2. Определение используемых материалов и их параметров.
3. Создание имитационной модели и вывод результатов моделирования.
4. На основе полученного результата составить рекомендации по повышению точности теплового расчета.

Основная часть

Дугостаторный индукторный генератор состоит из статора 1, на котором расположены обмотки, и ротора 2, совмещенного с пропеллерной гидротурбиной (рис. 1) [2-4].

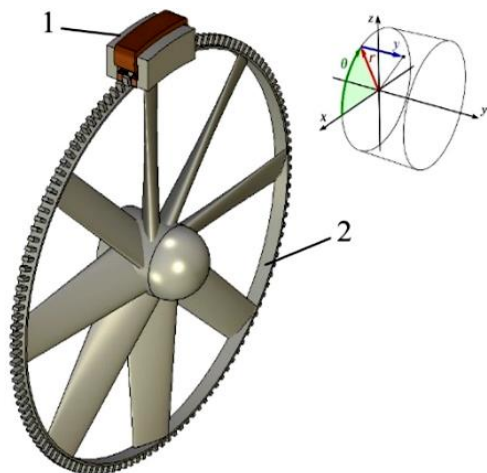


Рис. 1. Дугостаторный индукторный генератор, ротор которого совмещен с гидротурбиной

Рассмотрим двухмерные модели статора генератора в аксиальном (рис. 2) и радиальном (рис. 3) сечениях. Витки обмоток якоря и возбуждения заменены проводниками эквивалентного сечения. В решении используются граничные условия первого и третьего рода. Сетка построена в автоматическом режиме [5, 6].

При решении задачи используется уравнение теплопроводности в следующем виде [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

где $\lambda_{x,y}$ – компоненты тензора теплопроводности; T – температура; q – удельная мощность тепловыделения; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; t – время.

На всех поверхностях статора и ротора, обращенных в воздух, задается граничное условие конвекции:

$$F_n = \alpha_T (T - T_{ox}),$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(К·м²); T – установившаяся температура поверхности тела, °С; T_{ox} – температура охлаждающего газа (воздуха), °С.

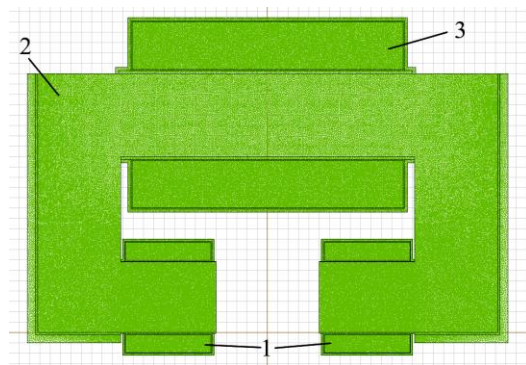


Рис. 2. Модель статора в аксиальном сечении:
1 – обмотка якоря; 2 – магнитопровод;
3 – обмотка возбуждения

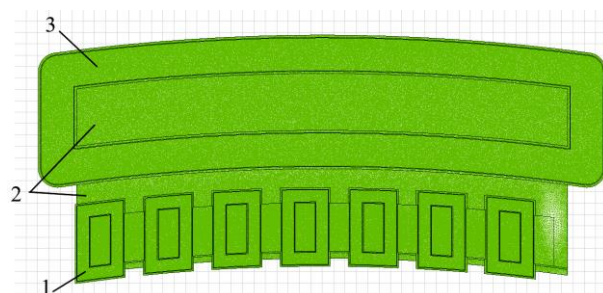


Рис. 3. Модель статора в радиальном сечении:
1 – обмотка якоря; 2 – магнитопровод;
3 – обмотка возбуждения

Коэффициент теплоотдачи с поверхности определяется для материала, окружающего стенки (воздуха), исходя из следующего уравнения, включающего критерияльные составляющие:

$$\alpha_T = \frac{Nu \cdot \lambda}{h},$$

где Nu – критерий Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(К·м); h – определяющий размер поверхности, м.

Поскольку поверхности статора, обращенные в воздух, представляют собой набор разнотипных материалов, то температуры пограничных слоев (рассматриваемый материал – воздух) отличаются друг от друга, следовательно, коэффициенты теплоотдачи для поверхностей, выполненных из разных материалов также будут разными.

На внешней поверхности воздушные массы статичны (естественная конвекция), то есть отсутствует ветровая нагрузка, которая может охлаждать поверхность. В данном случае критерий Нуссельта опре-

деляется исходя из критериев Прандтля и Грасгофа [8-10]:

$$Nu = 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3},$$

где Gr , Pr – коэффициенты критериев Грасгофа и Прандтля, выбранные для рассматриваемой температуры.

На внутреннюю область (роторную) воздействуют изменяющиеся воздушные массы (вынужденная конвекция), которые проходят в радиальном направлении и обусловлены вращением ротора генератора. При частоте вращения ротора 33,446 об/мин и внешнем диаметре 2,35 м, средняя скорость воздушного потока в роторной области статора оказывается равной 4,3 м/с, что необходимо учитывать при задании условия конвекции. Критерий Нуссельта определяется исходя из критерия Рейнольдса [11, 12]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8},$$

где Re – коэффициент критерия Рейнольдса, рассчитанный для рассматриваемой температуры.

Магнитопровод статора выполняется из электротехнической стали и заключается в алюминиевый корпус через текстолитовую прокладку. Обмотки выполнены из провода типа ПЭТ и установлены на статор через текстолитовые обоймы. Также внешние поверхности обмоток залиты керамико-полимерным диэлектрическим компаундом, который защищает обмотки от попадания воды. По предварительному расчету самым нагруженным элементом является обмотка якоря, среднее превышение температуры которой над температурой окружающей среды составляет 45 °С, следовательно, она является определяющей при задании условий моделирования [13, 14]. Условия моделирования при номинальной нагрузке и параметры материалов перечислены в табл. 1.

Результат первого этапа исследования представлен на рис. 4 и 5. В данном случае температура обмотки возбуждения не соответствует расчетному значению.

Таблица 1 – Условия моделирования при номинальной нагрузке и параметры материалов

Температуры элементов, °С	
Температура окружающей среды,	20
Среднее превышение температуры обмотки якоря	45
Среднее превышение температуры обмотки возбуждения	39
Теплопроводности материалов, Вт/(К·м)	
Алюминиевый корпус	203,5
Изоляция обмоток	0,14
Текстолит	0,34
Керамико-полимерный компаунд	1,2
Медь обмоток	401
Сталь статора	25
Коэффициенты теплоотдачи поверхностей, обращенных в воздух, Вт/(К·м ²)	
Сталь статора (внешняя)	5,233
Компаунд обмотки якоря (внешний)	5,315
Компаунд обмотки возбуждения (внешний)	5,233
Алюминиевый корпус	5,247
Текстолит	5,242
Сталь статора (внутренняя)	18,496
Компаунд обмотки якоря (внутренний)	19,621
Компаунд обмотки возбуждения (внутренний)	19,325

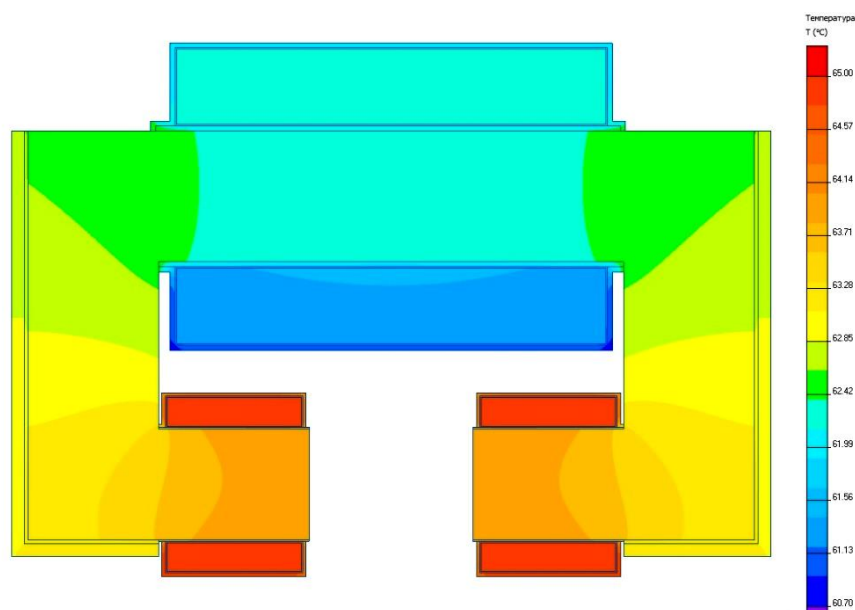


Рис. 4. Результаты моделирования теплового поля статора в аксиальном сечении при номинальной нагрузке

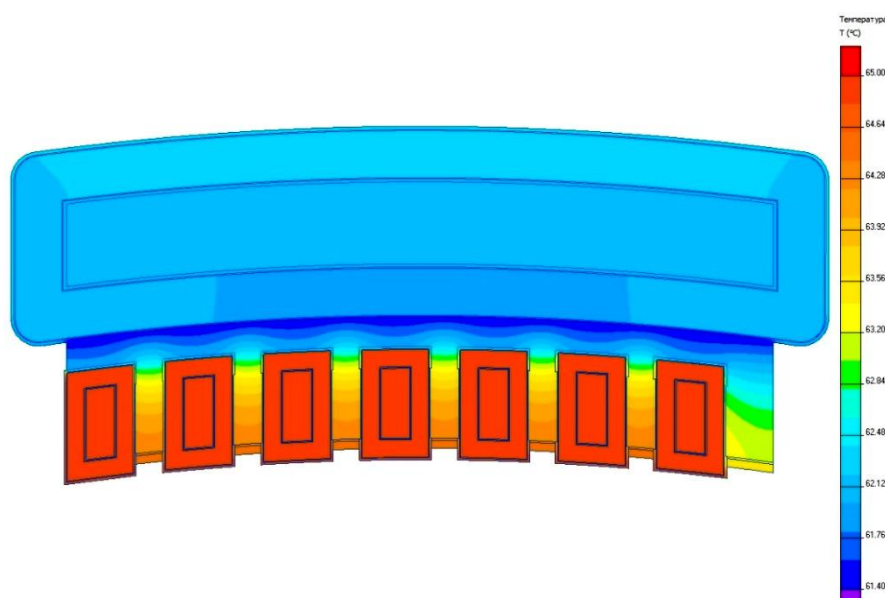


Рис. 5. Результаты моделирования теплового поля статора в радиальном сечении при номинальной нагрузке

Для дальнейшего исследования проведены несколько экспериментов изменяя коэффициент нагрузки генератора, тем самым варьируя температуру обмотки якоря в пределах от 29 до 45 °С. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Коэффициент нагрузки генератора:

$$k_{наг} = \frac{P_{наг}}{P_2},$$

где $P_{наг}$ – мощность нагрузки, Вт; P_2 – мощность генератора, Вт.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды, полученное в ходе моделирования:

$$\Delta\theta_{овм} = \frac{T_{внут} + T_{внеш}}{2} - T_0,$$

где $T_{внут}$ – температура обмотки возбуждения в роторной области, °С; $T_{внеш}$ – температура обмотки возбуждения с внешней стороны статора, °С; T_0 – температура окружающей среды, °С.

Таблица 2 – Среднее превышение температуры обмотки возбуждения в зависимости от коэффициента нагрузки

Коэффициент нагрузки, о.е.	Расчетное среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды, °С	Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды, полученное в ходе моделирования, °С
0,2	25	25,9
0,5	27	28,5
1	39	41,9

Обобщение результатов моделирования

Анализ результатов показал, что обмотка якоря подогревает элементы генератора до температур, лежащих в пределах от 60,7 °С для компаунда обмотки возбуждения, до 65 °С для обмотки якоря. Также было выявлено, что происходит дополнительный подогрев обмотки возбуждения в пределах от 0,9 до 2,9 °С, в зависимости от коэффициента нагрузки.

Для увеличения точности расчета температуры обмотки возбуждения необходимо ввести поправочный коэффициент $k_{оя}$, который будет учитывать подогрев обмотки возбуждения обмоткой якоря. Исходя из результатов моделирования, он лежит в пределах от 1,035 до 1,075. Следовательно, окончательная формула расчета среднего превышения температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей

среды, приобретает вид

$$\Delta\vartheta_{ов} = k_{оя}\Delta\vartheta'_{ов},$$

где $\Delta\vartheta'_{ов}$ – предварительное расчетное значение среднего превышения температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды, °С.

Заключение

В ходе выполнения работы получены двумерные модели тепловых процессов дугостаторного индукторного генератора в аксиальном и радиальном сечениях. Разработаны рекомендации по повышению точности теплового расчета генератора. Определен коэффициент подогрева обмотки возбуждения обмоткой якоря $k_{оя} = 1,035 \div 1,075$ и уточнен расчет среднего превышения температуры обмотки возбуждения над температурой окружающей среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах: учеб. пособие. Москва: Высш. шк., 1989. 239 с.

2. Бутко В.П., Кузьмин Р.В. Бесплотинная микроГЭС – основной источник электроэнергии в местах, удаленных от Центральной энергосистемы // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16-17 ноября 2023 года. Комсомольск-на-

Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. С. 187-189.

3. Бутко В.П., Кузьмин Р.В. Конструкция и особенности проектирования бесплотинной микроГЭС на базе дугостаторного индукторного генератора // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных: в 3 ч. Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 года. Т. 1. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. С. 300-302.

4. Gearless Micro Hydropower Plant for Small Water-Course / Yu. Dementyev, R. Kuzmin, A. Serikov et al. // Acta Polytechnica Hungarica. 2017. Vol. 14. № 4. P. 155-166. DOI 10.12700/APH.14.4.2017.4.9.

5. **Ким К., Иванов С., Хисматулин М.** Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в теплогенерирующих перекачивающих электромеханических преобразователях // Транспорт шёлкового пути. 2020. № 3. С. 3-14.

6. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С.Н. Иванов, К.К. Ким, А.А. Просолович, М.И. Хисматулин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 29-38. DOI 10.17084/20764359-2021-51-29.

7. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3.2. Руководство пользователя. СПб: ООО «Тор», 2019. 320 с.

8. **Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В.** Коэффициент теплоотдачи в пусковом режиме энергетической установки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 1. С. 26-28.

9. **Уонг Х.** Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Москва:

Атомиздат, 1979. 216 с.

10. **Зудин Ю.Б.** Влияние способа теплоподвода к стенке на осредненный коэффициент теплоотдачи в процессах теплооб-

мена с периодической интенсивностью // Теплоэнергетика. 1999. № 3. С. 63-67.

11. Ртищева А.С.

Теоретические

основы гидравлики и тепло-

техники: учеб. пособие.

Ульяновск: УлГТУ, 2007.

171 с.

12. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. 3-е изд., репр. Москва: Изд. дом «Бастет», 2010.

13. **Левин М.М., Сериков А.В.** Моделирование трёхмерного нестационарного температурного поля в нагревательном элементе трансформаторного типа // Электротехника. 2017. № 2. С. 74-80.

14. **Алексюк О.Э., Янченко А.В.** Тепловизионный контроль трансформаторного нагревателя для радиаторов отопления // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 16-26 февраля 2021 года / редкол.: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. С. 87-90.

Бутко Владимир Павлович – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета

Кузьмин Роман Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета

Vladimir P. Butko – Undergraduate, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State University

Roman V. Kuzmin– PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State University

Статья поступила в редакцию 27.05.24, принята к опубликованию 12.06.24

УДК 621.316.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК ЛИНИЙ БАЛАКОВСКОГО ЭНЕРГОУЗЛА

Е.А. Дунаева, Т.Ю. Дунаева

INVESTIGATION OF PERMISSIBLE CURRENT LOAD LINES OF BALAKOVO ELECTRICAL GENERATING SYSTEM

E.A. Dunaeva, T.Yu. Dunaeva

В статье представлены результаты исследований особенностей энергосистемы Саратовской области, Балаковского и Саратовского энергорайонов. Исследованы перспективы развития энергетики Саратовской области до 2029 года. Проведен анализ схемно-режимной ситуации Балаковского энергоузла с учетом перспектив его развития. Выявлен неблагоприятный сценарий работы энергосистемы Балаковского энергоузла при ремонте автотрансформатора связи 220/500 кВ БалАЭС. Проведен расчет токовых нагрузок ЛЭП и доказана возможность значительной токовой перегрузки на линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Центральная. Сформирована рекомендация модернизации АОПО линии.

Ключевые слова: Балаковский энергорайон, Саратовский энергорайон, ЛЭП, режим, допустимая токовая нагрузка

Введение

Единая электроэнергетическая система при работе опирается на сложный комплекс технологических и экономических процессов, в которых участвуют потребители электрической энергии и мощности, генерирующие, сетевые и сбытовые компании. Диспетчерское управление в единой энергосистеме единолично осуществляет Системный оператор ЕЭС (СО ЕЭС). Надежность работы оборудования генерирующих

The article presents the results of studies of the The article presents the results of research into the characteristics of the power system in Saratov region, including Balakovo and Saratov energy areas. The prospects for energy sector development in Saratov region until 2029 have been studied. Analysis of the circuit-regime situation in Balakovo energy generating system was carried out, with account for the prospects of its development. An unfavorable scenario in operation of the Balakovo power system during repair of the BalNPP 220/500 kV communication autotransformer has been revealed. Calculation of the current loads in transmission lines has been carried out and a possibility of a significant current overload on the 220 kV line of Saratovskaya HPS – Tsentralnaya substation has been proved. Recommendations for modernization of the automatic equipment overload limitation of the line have been determined.

Keywords: Balakovo power district, Saratov power district, power lines, mode, permissible current load

и сетевых компаний, входящих в состав ЕЭС России, является одним из обязательных условий ее стабильного функционирования. Она обеспечивается, в том числе проведением ремонтных кампаний в установленные сроки по заранее согласованным графикам.

Так как отключение даже одного сетевого элемента может повлечь за собой снижение надежности энергосистемы (ЭС), то вывод в ремонт оборудования всегда

связан с повышением рисков нарушения питания потребителей. При проведении ремонта какого-либо элемента (ремонтная схема) потоки мощности перераспределяются по оставшимся в работе элементам. Если при этом возникнет незапланированное отключение участка ЭС по любой причине, то оставшееся в работе оборудование (ЛЭП и трансформаторов подстанций) может работать с перегрузкой. Если перегрузка сетевых элементов будет выше допустимой, то может случиться их повреждение, повышенный износ изоляции, уменьшение срока эксплуатации, а в случае отключения силами АОПО (автоматики ограничения перегрузки оборудования), перерыв электроснабжения потребителей.

В РФ для обеспечения надежного функционирования энергосистемы в период проведения ремонтных кампаний, заявки на вывод оборудования из работы проходят согласование в СО ЕЭС, при этом проверяется их совпадение с текущими и планируемыми ремонтами других элементов, и производится предварительный расчет режимов при наиболее тяжелых аварийных отключениях в планируемой ремонтной схеме. Однако при подобной проверке в ряде случаев аварийных возмущений в ЭС невозможно обеспечить допустимые параметры режима без значительных изменений в ее работе.

Постановка задачи

Целью исследования является исследование допустимых токовых нагрузок линий 220-500 кВ Балаковского энергоузла, входящих в энергосистему Саратовской области.

Для выполнения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

- проанализировать структуру Балаковского энергорайона и выявить ее «узкие места» с учетом перспектив развития;
- изучить нормативные документы, регламентирующие порядок расчета режимов энергосистемы и определение его основных величин;
- рассчитать токовую нагрузку линий 220-500 кВ Балаковского энергоузла при проведении ремонта на первом энергоблоке

БАЭС и автотрансформаторе связи между ОРУ-220 и ОРУ-500 и аварийном отключении линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская и выявить линии с наибольшей перегрузкой.

Методы исследования

Расчеты были проведены в среде RastrWin3 в ходе прохождения практики в Филиале АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Саратовской области» (Саратовское РДУ).

Результаты исследования

Балаковский энергорайон энергосистемы Саратовской области характеризуется наличием двух крупных электростанций: Балаковской АЭС и Саратовской ГЭС. Общая установленная мощность объектов генерации, Балаковского энергорайона (Балаковская АЭС, Саратовская ГЭС, Балаковская ТЭЦ-4, Балаковский филиал АО «Апатит»), на 1 января 2023 г. составила 5852 МВт или 88,48 % от общей установленной мощности электростанций энергосистемы Саратовской области [2, 3]. На них генерируется значительный переизбыток электрической мощности. Из этих объектов более половины электрической мощности энергосистемы приходится на Балаковскую АЭС (60,48 %). Основной поток мощности с нее уходит в ОЭС Средней Волги. Второй крупной электростанцией энергорайона является Саратовская ГЭС, которая активно используется в паводковый период, а также для обеспечения маневренности энергосистемы Средней Волги. БалАЭС и Саратовская ГЭС имеют мощные связи между собой, а их повысительные подстанции являются узловыми для всего энергорайона.

ЛЭП 220-500 кВ Балаковского энергоузла входят в состав контролируемого сечения «СЭС-ОЭС», которое представляет собой частичное сечение, связывающее энергосистему Саратовской области и ОЭС Средней Волги. Сюда же входят ЛЭП, связывающие подстанции БалАЭС и Саратовской ГЭС. В состав сечения «СЭС-ОЭС» входят:

1. ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Ключики.

2. ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Куйбышевская № 1.

3. ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Красноармейская № 2.

4. ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Трубная.

5. ВЛ 220 кВ Балаковская АЭС – Степная.

6. ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Кубра с отпайкой на ПС Возрождение.

Контроль направления мощности в сечении «СЭС-ОЭС» осуществляется в направлении от шин Балаковской АЭС и Саратовской ГЭС [4]. Основной поток мощности уходит в ЕЭС через смежные энергосистемы Самарской и других областей. Часть мощности уходит в Саратовский энергорайон.

Значительная масса потребителей Саратовской области (около 60 %) расположена в агломерации Саратов – Энгельс. И получается, что, несмотря на то, что Саратовская область в целом является энергоизбыточным регионом, сам Саратовский энергорайон энергодефицитен. Для обеспечения надежного питания его потребителей в 2012 году был завершен проект строительства ЛЭП 500 кВ Балаковская АЭС – ПС Курдюм, который позволил увеличить максимально допустимый переток мощности в Саратовский энергорайон.

Однако согласно СиПР [2], к 2029 году планируется ввод еще 349 МВт активной мощности при значительном увеличении потребления агломерации Саратов – Энгельс. Это не может не отразиться на перетоках мощности в ЭС, особенно в период проведения ремонтов.

Период проведения ремонтных кампаний обычно приходится на летнее время, т. е. период экстремально высоких температур (ПЭВТ), при котором ограничена пропускная способность ЛЭП. К тому же тепловая генерация на энергодефицитном правом берегу Волги (ТЭЦ-2, ТЭЦ-5 и СарГРЭС) в этот период почти не работает, а потребление мощности в Саратове и Энгельсе возрастает из-за массового использования систем кондиционирования воздуха. Таким образом, переток из Балаковского энергорайона в Саратовский до-

стигает в часы максимума критических значений.

Зимой же постоянно идет борьба с повышенным гололедообразованием на проводах и грозотросах линий электропередач, что ведет к необходимости периодического вывода из работы ЛЭП, и, соответственно, дополнительной нагрузке на остальные ЛЭП и снижению надежности питания потребителей.

Своевременное выявление неблагоприятных сценариев во время проведения ремонтных кампаний и периодов плавки гололеда позволит заранее предусмотреть мероприятия, позволяющие снизить риск возникновения аварийных ситуаций и избежать тяжелых аварий.

После анализа режимно-схемной ситуации в Балаковском энергорайоне был выявлен следующий неблагоприятный сценарий. При выводе в ремонт первого энергоблока Балаковской АЭС, вместе с самим блоком выводится из работы автотрансформатор перетока между РУ 500 кВ и РУ 220 кВ (рис. 1, пунктирная линия). При этом отключается связь РУ 500 и 220 кВ, и переток мощности между ними невозможен. Если в энергосистеме возникнет повышенный спрос на электроэнергию (например, вечерний максимум нагрузки), то отключение линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС 220 кВ Центральная по любой причине приведет к резкой перегрузке линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС 220 кВ Балаковская (рис. 1), так как именно на нее ляжет основной переток мощности. Для определения величины этой перегрузки был проведен комплекс расчетов.

Расчет параметров работы прилегающего к Балаковской АЭС энергорайона проводился с учетом планируемого развития ЭС Саратовской области на перспективу 2029 г.

Исходными данными для проведения расчетов электрических режимов являются:

- схема и параметры сети ЭС Саратовской области;
- планируемая активная и реактивная мощности нагрузки.

Модель, используемая для проведения расчетов включает сети 110-500 кВ (рис. 1).

При анализе аварийных режимов работы электрических сетей и формировании требований к пропускной способности ЛЭП 220-500 кВ, использовались расчетные модели для режимов максимальных и минимальных нагрузок представленных на каждый из этапов развития до 2029 г. [2, 3]:

- режим зимнего максимума рабочего дня;
- режим зимнего минимума выходного дня;
- режим летнего максимума рабочего дня;
- режим летнего минимума выходного дня.

При выполнении расчётов электрических режимов значения загрузки по току ЛЭП 110 кВ и выше приняты для зимних режимов для температуры -5°C , для летних режимов $+25^{\circ}\text{C}$.

Параметры ЛЭП 110-500 кВ Балаково-Саратовского энергоузла и ЭС Саратовской области приведены в табл. 1.

При формировании расчетных моделей были учтены планирующиеся мероприятия по демонтажу генерирующего оборудования электростанций ЭС Саратовской области на перспективу [2] (табл. 2) и реконструкции существующего и вводу нового генерирующего оборудования (табл. 3).

Таблица 1 – Параметры ЛЭП 110-500 кВ Балаково – Саратовского энергоузла и ЭС Саратовской области

№ п/п	Элемент	ДДТН, А		АДТН, А	
		для $t = -5^{\circ}\text{C}$	для $t = +25^{\circ}\text{C}$	для $t = -5^{\circ}\text{C}$	для $t = +25^{\circ}\text{C}$
1	ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Ключики	2000	2000	2400	2400
2	ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Красноармейская № 2	2000	2000	2400	2400
3	ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Куйбышевская № 1	2000	2000	2000	2000
4	ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Трубная	2000	1693	2000	2000
5	ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Курдюм	2000	2000	2000	2000
6	ВЛ 500 кВ Балаковская АЭС – Саратовская ГЭС	2000	2000	2000	2000
7	ВЛ 500 кВ Саратовская ГЭС – Курдюм	2000	2000	2000	2000
8	ВЛ 220 кВ Балаковская АЭС – Степная	1000	680	1000	680
9	ВЛ 220 кВ Балаковская АЭС – Центральная	1250	801	1250	985
10	ВЛ 220 кВ Балаковская АЭС – Чапаевская	1000	813	1000	994
11	ВЛ 220 кВ Чапаевская – Ершовская	600	510	600	510
12	ВЛ 220 кВ Чапаевская – Горный	600	510	600	510
13	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Кубра с отпайкой на ПС Возрождение	1250	845	1250	845
14	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Балаковская	1000	960	1000	980
15	ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – Центральная	1250	980	1250	980
16	ВЛ 220 кВ Центральная – Балаковская	1000	960	1000	980

Примечание: ДДТН – длительно допустимая токовая нагрузка, АДТН – аварийно допустимая токовая нагрузка

Таблица 2 – Демонтаж генерации ЭС Саратовской области [1]

Наименование электростанции	Станционный номер, тип блока	Единичная мощность генератора, МВт	Год вывода
Балаковская ТЭЦ-4	1, ПТ-50-130/7	50	2028
Балаковская ТЭЦ-4	2, ПТ-50-130/7	50	2028

Таблица 3 – Вводы и модернизация генерации ЭС Саратовской области

Наименование электростанции	Станционный номер, тип блока	Единичная мощность генератора, МВт	Год ввода	Примечание
Саратовская ГЭС	1 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2025	Модернизация
	2 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2025	Модернизация
	11 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
	12 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
	15 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2025	Модернизация
	16 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
	17 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
	18 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
	19 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
	20 г/а пов.-лопаст. верт.	66	2026	Модернизация
Саратовская ТЭЦ-2	11, 12 ПГУ-115	115	2028	Ввод в эксплуатацию

При выполнении расчетов электроэнергетических режимов на перспективу до 2029 г. были учтены перспективные вводы и реконструкция электросетевых объектов в зоне

влияния Балаковской АЭС. Перечень намечаемых к вводу электросетевых объектов на территории ЭС Саратовской области на перспективу до 2029 г. приведен в табл. 4.

Таблица 4 – Перечень намечаемых к вводу электросетевых объектов на территории ЭС Саратовской области [1]

Наименование объекта	Технические характеристики объекта	Год ввода	Примечание
Строительство ПС 220 кВ Чапаевская с двумя трансформаторами 220/10 кВ	2×100 МВА	2024	Ввод новой мощности – 82 МВт
Строительство заходов ВЛ 220 кВ Балаковская АЭС – Ершовская на ПС 220 кВ Чапаевская	1×5,89 км 1×5,78 км	2024	
Строительство заходов ВЛ 220 кВ Балаковская АЭС – Горный на ПС 220 кВ Чапаевская	1×7,02 км 1×7,069 км	2024	
Реконструкция ПС 220 кВ ГПП Метзавод с установкой двух трансформаторов 220/10 кВ и одного трансформатора 220/35 кВ	2×63 МВА 1×160 МВА	2024	Увеличение мощности до 221 МВт
Реконструкция ВЛ 220 кВ Центральная – Метзавод № 1, № 2 с увеличением пропускной способности	2×5,6 км	2024	
Реконструкция ПС 110 кВ Совхоз-Весна с заменой трансформаторов Т-1 110/10 кВ и Т-2 110/10 кВ	2×63 МВА	2024	Увеличение мощности до 28 МВт

Для определения основных технических решений по схеме выдачи мощности Балаковской АЭС были проведены расчеты электроэнергетических режимов на 2029 г. для нормальной и основных ремонтных схем при

возмущениях, вызванных отключением линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС 220 кВ Центральная. Расчеты проводились в соответствии с требованиями и рекомендациями [4-7] в среде RastrWin3 в ходе практики в

Филиале АО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Саратовской области» (Саратовское РДУ).

Для зимнего максимума нагрузки 2029 года были выполнены расчеты электроэнергетических режимов при максимальной загрузке по активной мощности Саратовской ГЭС и Балаковской АЭС для ремонтной схемы с выводом 1 энергоблока БАЭС. Аналогично для зимнего минимума и летних максимума и минимума нагрузки.

Схема сети для рассматриваемого случая приведена на рис. 1. Пунктиром показаны отключаемые элементы.

По результатам расчетов электроэнергетических режимов для аварийного отключения ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Центральная в ремонтной схеме без учета действия АОПО были определены элементы сети, нагрузка которых превысила длительно допустимые значения. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Максимальная загрузка линий в режимах АО в ремонтной схеме в режиме зимнего и летнего максимума и минимума нагрузки 2029 года (режимный генератор в работе)

Наименование объекта	Период	Потребление	I, А	% от ДДТН	% от АДТН
ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – С Балаковская	Зимний	Максимальное (2400 МВт)	1627	162,7	162,7
ВЛ 220 кВ ПС Центральная – ПС Балаковская			1341	134,1	134,1
ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская	Зимний	Минимальное (1820 МВт)	1264	126,4	126,4
ВЛ 220 кВ ПС Центральная – ПС Балаковская			1157	115,7	115,7
ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская	Летний	Максимальное (1930 МВт)	1620	168,8	165,3
ВЛ 220 кВ ПС Центральная – ПС Балаковская			1349	140,5	137,6
ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская	Летний	Минимальное (1240 МВт)	1150	119,7	117,3
ВЛ 220 кВ ПС Центральная – ПС Балаковская			1098	114,4	112,1

Результаты

Как можно видеть (табл. 5), аварийное отключение линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Центральная при выведенном в ремонт 1 энергоблоке БАЭС и 1 АТ, приводит к перегрузке линий 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская и ПС Центральная – ПС Балаковская (рис. 2), причем все значения тока в любой период и при любой нагрузке превышают нормативно допустимые. Наибольшей перегрузке подвержена ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская. Её наибольшая токовая нагрузка приходится на летний период при максимальном потреблении и составляет 168,8 % от ДДТН и 165,3 % от АДТН (табл. 5). В аналогичный период токовая

нагрузка линии 220 кВ ПС Центральная – ПС Балаковская составляет 140,5 % от ДДТН и 137,6 % от АДТН. Подобные перегрузки оборудования недопустимы и должны ликвидироваться максимально быстро.

Стоит отметить, что, в силу особенностей конфигурации энергосистемы, разгрузка линии 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская автоматически приведет к разгрузке ВЛ 220 кВ ПС Центральная – ПС Балаковская (рис. 2).

Выводы

В настоящее время момент линия 220 кВ Саратовская ГЭС – ПС Балаковская защищается автоматикой ограничения перегрузки оборудования (АОПО), реализующей не-

сколько уровней мероприятий по снижению токовой загрузки этой линии в аварийной ситуации. В условиях развития энергосистемы и увеличения потребления можно рас-

смотреть модернизацию существующей системы АОПО линии, при этом выбор мероприятий для изменения схемы работы АОПО требует дополнительного анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саратовское РДУ. URL: <https://www.soups.ru/odu-volga/odu-volga-rdu/rdu-saratov/> (дата обращения 10.05.2024).

2. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2023-2028 годы. Саратовская область. Обосновывающие материалы. Саратов, 2023. 48 с.

3. Приказ Минэнерго России от 28.02.2023 г. № 108 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2023-2028 годы». Москва, 2023. 120 с.

3. СТО 59012820.27.010.001-2017. Проведение расчетов электроэнергетических режимов и определение решений при перспективном развитии энергосистем. Основные требования. Москва, 2017. 19 с.

4. СО 153-34.20.118-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. Москва, 2003. 22 с.

5. Расчеты допустимых перетоков мощности в энергосистемах: учеб. пособие / С.А. Ерошенко, А.О. Егоров, В.О. Самойленко, А.И. Хальясмаа. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 86 с.

6. Приказ Минэнерго России от 03.08.2018 г. № 630 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок. Методические указания по устойчивости энергосистем. Москва, 2018. 16 с.

Дунаева Елена Александровна – магистрант направления «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А.

Дунаева Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А.

Elena A. Dunaeva – Master's student, Department of Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tatyana Yu. Dunaeva - PhD (Technical Sciences) Associate Professor, Department of Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.05.24, принята к опубликованию 12.06.24.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефону:

8 (8452) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

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

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

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

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

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

Публикации принимаются в течение всего года.

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

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

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

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

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

Подписано в печать 21.06.2024 Дата выхода в свет 27.06.2024

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 12,25 Уч. изд. л. 5,6

Тираж 500 экз. Заказ 22 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: izdat@sstu.ru

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

Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2024 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 into English 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: 21.06.2024 Date of publication: 27.06.2024

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 12,25 Publication base sheet 5,6

Circulation: 500 printed copies. Order 22 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

