

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (26)
Март 2020

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
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА

Редакционная коллегия

С.Г. КАЛГАНОВА
Н.В. БЕКРЕНЕВ
Ю.В. ГУЛЯЕВ

д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН,
Москва

В.Б. ДЕМИДОВИЧ
Л.С. ЗИМИН

д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

В.Н. ЛЯСНИКОВ
А.Н. МАКАРОВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь

Г.А. МОРОЗОВ
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
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

В.П. РУБЦОВ

д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва

Ф.Н. САРАПУЛОВ

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Г.Г. УГАРОВ

д.т.н., профессор, КТИ, Камышин

В.Н. ХМЕЛЕВ

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

В.О. ЮДИНА

ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (26)
March 2020

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:
Assistant to the Editor-in-Chief:
Chief Executive Officer

KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA
BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH
YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St.Petersburg
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
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
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu.B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
G.G. UGAROV	Dr.Sc., Professor, Kamishin
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.O. YUDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Перинский В.В., Перинская И.В.** Достижения ионной имплантации и перспективы использования ионно-лучевых методов в монолитно-интегральной технологии микроэлектроники СВЧ 5
- Захаров В.В., Тригорлый С.В.** Численные и экспериментальные исследования процессов СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны 14
- Рубцов В.П., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.** Использование имитационной модели для определения энергетических характеристик комплекса электрической печи сопротивления и тиристорного регулятора напряжения с фазоимпульсным управлением 23

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Долгих И.Ю., Марков М.Г.** Разработка микропроцессорной части системы мониторинга футеровки тигля и аварийного отключения индукционной печи 31

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Попов Д.И.** Определение коэффициента экономичности электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки 40

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Сивяков Б.К.** Математические модели для аналитического расчета маг-

нитного и электрического полей высоковольтных ЛЭП 46

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Герра Д.Д., Яковлева Э.В.** Математическое моделирование солнечной электростанции в климатических условиях Республики Куба 52
- Скамьин А.Н., Добуш В.С., Растворова Ю.В.** Влияние напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник 61
- Аминов Д.С.** Анализ теплового состояния гидрогенератора комбинированного возбуждения, предназначенного для освоения энергетики малых и средних рек 69
- Артюхов И.И., Мироедов Ф.П., Артюхов Д.И.** Актуальное состояние и направления развития систем электропитания установок катодной защиты 77
- Кремлев И.А., Терёхин И.А., Скоков Р.Б., Абишов Е.Г.** Проблемы внедрения системы тягового электро-снабжения переменного тока с опорами контактной сети, не заземленными на рельс, и пути их решения 88

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Федосеев М.Е., Фомин А.А.** Исследование микроструктуры и твердости инструментальной стали Х12МФ, подвергнутой электроискровому легированию цирконием и цементации в кремний-графитовой пасте 94

К сведению авторов 103

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Perinsky V.V., Perinskaya I.V.** Effectiveness of ion implantation and future of ion-ray methods in monolithic integration microelectronics technology 5
- Zakharov V.V., Trigorly S.V.** Numerical and field research of microwave thermal processing of dielectrics in microwave travelling wave chambers..... 14
- Rubtsov V.P., Ryazanova E.S., Chursin A.Yu.** Using a simulation model to determine the energy characteristic of an electric resistance furnace complex and a thyristor voltage regulator with a phase-pulse control 23

CONTROL SYSTEM

- Dolgikh I.Yu., Markov M.G.** A microprocessor segment to monitoring the crucible lining and emergency blackout of induction furnaces 31

ELECTROMECHANICS

- Popov D.I.** Determination of the cost-to-performance ratio of electrical systems in testing induction motors by the loading-back method 40

ELECTRODYNAMICS

- Siviyakov B.K.** Mathematical models for analytical calculation of magnetic and electric fields of high-voltage transmission lines 46

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Guerra D.D., Yakovleva E.V.** Mathematical modeling of solar power plants specified for the climate conditions of the Republic of Cuba 52
- Skamyin A.N., Dobush V.S., Rastvorova Yu.V.** The impact of voltage on electric consumption parameters under higher order harmonic 61
- Aminov D.S.** Analysis of thermal state of hydrogenerators with combined excitation applied in harnessing the hydro-power of minor and medium-width rivers 69
- Artyukhov I.I., Miroedov F.P., Artyukhov D.I.** Current status and new trends in designing cathodic protection power supply systems 77
- Kremlyov I.A., Teryokhin I.A., Skokov R.B., Abishov E.G.** Challenges and solutions to integration of ac traction power supply systems with ungrounded contact line supports 88

MATERIALS SCIENCE

- Fedoseev M.E., Fomin A.A.** Investigation into the microstructure and hardness of H12MF tool steel subjected to electric spark alloying with zirconium and cementation in the silicon-graphite paste 94
- Information for Authors 103

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.382

ДОСТИЖЕНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ В МОНОЛИТНО-ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ

В.В. Перинский, И.В. Перинская

EFFECTIVENESS OF ION IMPLANTATION AND FUTURE OF ION-RAY METHODS IN MONOLITHIC INTEGRATION MICROELECTRONICS TECHNOLOGY

V.V. Perinsky, I.V. Perinskaya

Исследованные эффекты микроконструирования свойств тонких металлических слоев ионно-лучевым модифицированием позволили разработать ряд оригинальных способов изготовления микрокомпонентов интегральных схем СВЧ, создать конкурентоспособные ионно-лучевые аналоги существующих технологических процессов, используя ионный синтез на поверхности металлов ультрадисперсного беспористого углеродного покрытия с уникальным сочетанием коррозионных, электрических и механических свойств. Ионная технология эффективно сочетается с вакуумными процессами металлизации и импульсного отжига, что позволяет реализовать как субмикронную ионную литографию, так и полный технологический цикл изготовления монолитных устройств.

Ключевые слова: имплантация ионов, ионно-лучевое модифицирование, электрически неактивные примеси, пассивация и улучшение свойств фоторезистивных покрытий, управление химической активностью металлических покрытий

Investigation into effects of microconstruction of thin metal layer properties using the ion-beam modification promoted the development of ingenious methods of fabricating the microcomponents to microwave integrated circuits, and create effective ion-beam analogues to the existing technological processes based on the ion synthesis over the metal surfaces of ultrafine non-porous carbon coatings with a unique combination of corrosive, electrical and mechanical characteristics. The ion technology effectively combines with the vacuum processes of metallization and pulse annealing, which enables realization of both submicron ion lithography and complete technological cycle in the production of monolithic devices.

Keywords: ion implantation, ion-beam modification, electrically inactive impurities, passivation and improvement of photoresistive coating characteristics, monitoring the chemical activity of metal coatings

Достижение – успех, положительный результат деятельности, достигнутый большими усилиями и трудом.

Методология науки и техники – учение о принципах построения, формах и способах научно-исследовательской деятельности.

(Толковый словарь Д.В. Дмитриева)

Достижения ионной имплантации.

В достижениях ионной имплантации полупроводников интегральных схем раскрыты принципиальные практические возможности применения ионных пучков. Опубликованы многочисленные книги и статьи по вопросам легирования полупроводников [1-8].

Ионная имплантация в настоящее время широко применяется как один из основных процессов изготовления интегральных схем на кремнии. Применение ионного легирования полупроводниковых соединений (например, арсенида галлия, антимонида индия, нитрида галлия) находится на стадии разработок и частично в производстве. Ионное легирование алмаза и других менее изученных полупроводников, а также диэлектриков находится в состоянии теоретического и экспериментального моделирования в приложениях к лазерам, жидкокристаллическим экранам, медицинской технике [7-10].

Технология ионной имплантации вписалась в маршрут кремниевых полевых транзисторов типа «металл-окисел-полупроводник» благодаря планарной геометрии таких транзисторов и интегральных схем на их основе.

В первую очередь метод ионной имплантации, позволяющий обрабатывать большие поверхности при очень малой глубине залегания примеси, применяется для выравнивания краев стока и истока с краями металлического электрода затвора, то есть металл затвора является преградой (маской) для ионов – на этом основана технология «самосовмещения» [7, 8].

Второе достижение ионно-лучевой технологии связано с применением имплантационной техники для снижения порогового напряжения на затворе полевых

транзисторов с индуцированным каналом. Постоянное напряжение необходимо для изменения типа проводимости (инверсии) подложки под затвором. Понижение порогового напряжения у p -канальных транзисторов на подложках кремния n -типа на 2-3 В достигается имплантацией бора (B^+) с дозой $\sim 1-3 \cdot 10^{11}$ ион/см² на один вольт (1 В) [7, 8].

У технологии ионной имплантации большие преимущества перед диффузией: возможность точного контроля количества легирующей примеси путем точного измерения переносимого ионами заряда. Это обеспечивает повышение воспроизводимости результатов легирования и надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем.

В настоящее время ионная имплантация в кремний является общепринятой промышленной технологией производства кремниевых приборов вследствие точности и универсальности легирования, включая возможность имплантации через тонкие слои окисла при изготовлении транзисторов, конденсаторов, резисторов и т.п.

Надо отметить обеспеченность полупроводниковой промышленности установками ионного легирования, в том числе отечественными, обрабатывающими за одну загрузку до 200 кремниевых пластин диаметром 150 мм с однородностью $\sim 1\%$, при этом время легирования в зависимости от вида операции – от 2 минут до 2 часов.

Создание приборов на арсениде галлия (GaAs) с применением ионного легирования – очень важная часть полупроводниковой технологии: подвижность электронов в n -GaAs значительно больше, чем в n -Si. Следовательно, полевые транзисторы на n -GaAs будут работать до сверхвысоких частот, а в логических микросхемах иметь

меньшие времена переключения. В настоящее время освоены почти все технологические процессы обработки GaAs, необходимые для производства быстродействующих логических микросхем на арсениде галлия [10-13]:

1) ионная имплантация играет ведущую роль для создания полевых СВЧ транзисторов, светоизлучающих диодов и лазеров на основе GaAs, имплантацией протонов, ионов гелия, серы, селена;

2) лавинно-пролетные сверхвысокочастотные генерирующие диоды изготавливаются исключительно имплантацией протонов в GaAs для образования высокоомной пассивной зоны.

На основе даже краткого обзора по ионной имплантации в GaAs можно сделать заключение, что это перспективная область полупроводниковой технологии СВЧ интегральных схем.

Известными исследователями в России (Е.Б. Соколов, Б.В. Козейкин, Ю.В. Стицей, П.В. Павлов, Е.И. Зорин, Д.И. Тетельбаум, В.С. Вавилов, М.А. Кумахов, Ф.Ф. Комаров, Г.А. Крысов) и за рубежом (Д. Палмер, Ф. Эйзен, Дж. Фоти, А. Гриноуолд, А. Керкнатрик, Р. Литтл, Дж. Миннуччи, Б. Мастерс, Р. Келли, Дж. Мейер, З. Лю, Дж. Паут, Д. Каллетта, О. Мейер) выражалась уверенность еще в конце прошлого века, что имплантационная технология на арсениде галлия в ближайшее время начнет переходить из исследовательских лабораторий в серийное производство СВЧ приборов и СВЧ микросхем.

Однако по техническим и нетехническим, известным и неизвестным причинам на предприятиях электронной промышленности РФ этого не произошло, хотя исследования технологии и разработка приборов и ИС продолжались.

Результаты этих исследований, полученных авторами в ряде НИР с радиоприборостроительными предприятиями в период реконструкции отечественной электронной промышленности с целью импортозамещения, особенно для предприятий оборонно-промышленного комплекса, опубликованы, собраны и систематизиро-

ваны в научно-технических отчетах и монографиях:

– «Создание базы данных, действующих и перспективных совершенных технологий, включая проведение НИР и ОКР в области применения в СВЧ электронике, наноматериалов и конкурентоспособной нанотехники» (ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» № 4/06 от 15.10.2006);

– «Исследование и анализ современных достижений нанотехнологий с целью использования их в твердотельной микроэлектронике» (ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон» № 8ПП-08 от 06.06.2008);

– «Аналитический обзор материалов, покрытий и технологий радиоприборостроительного комплекса» (ОАО «СРЗ», г. Саратов, договор № 336/185-37 от 14.06.2012);

– «Анализ современных материалов, наукоемких технологий, средств и методов контроля в радиоприборостроительном производстве» (ОАО «СРЗ», г. Саратов, договор № 333 от 01.07.2013);

– «Анализ современных высокоэффективных методов обработки материалов на радиоприборостроительном предприятии. Обзор приоритетных критических направлений развития электронной и радиоэлектронной промышленности» (ОАО «СРЗ», г. Саратов, договор № 362 от 27.06.2014);

– «Разработка справочной базы по эффективным технологиям и оборудованию в заготовительном, литейном и сборочном производстве радиоприборного предприятия» (ОАО «СРЗ», г. Саратов, договор № 388 от 20.04.2015);

– Перинская И.В. Ионно-лучевая нанотехнология и компоненты СВЧ устройств / И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников. Саратов: ИЦ «Наука», 2012. 142 с.;

– Перинская И.В. Ионно-лучевое конструирование материалов СВЧ микроэлектроники / И.В. Перинская, В.В. Перинский, И.В. Родионов. Саратов: ИЦ «Наука», 2016. 244 с.

Возможность использования ионного внедрения примесей в материалы ИС СВЧ представляет большой практический интерес, что стимулирует экспериментальные и теоретические исследования в области ра-

диационного модифицирования и сопутствующих ему физических явлений.

В ходе этих исследований изучены основные особенности метода ионного легирования, определяющие его уникальные преимущества по сравнению с известными способами модифицирования свойств [7, 10, 11, 13].

Во-первых, универсальность – используя пучки ускоренных ионов можно вводить атомы любого элемента в материал, включая легкие протоны, ионы гелия и ионы инертных газов.

Во-вторых, температурные условия технологии внедрения ионов – в процессе облучения материал находится при комнатной температуре или близкой к ней. В результате ионная имплантация позволяет сохранить неизменными основные электрофизические параметры в объеме исходных металлов, диэлектриков, полупроводников.

В-третьих, метод ионного легирования позволяет осуществлять операции локально, прецизионно, что обеспечивают либо методы литографии, либо сам пучок ионов остро фокусируется, а траектория его позиционирования управляется компьютером.

В-четвертых, возможно точно дозировать количество имплантируемых ионов и регулировать их энергию. Это важно, так как профиль распределения внедренной примеси влияет на физические и химические свойства имплантированных материалов.

В-пятых, вакуумные условия внедрения обеспечивают чистоту технологической операции.

В процессе исследований обнаружены эффекты, не наблюдаемые при традиционных способах обработки металлов. В частности, при ионно-лучевой обработке металлических слоев меди, хрома, алюминия, титана – металлических элементов топологии ИС СВЧ – наблюдается явление химической пассивации их поверхности, выражающейся в уменьшении скорости окисления и химического травления, увеличении коррозионной стойкости, износостойкости, твердости в 10^2 - 10^3 раз [13, 14].

Исследования эффектов ионной имплантации в металлы ведутся по многим

направлениям, начиная с моделирования нейтронных, протонных, гелиевых дефектов в стенках изделий ядерных реакторов и заканчивая проблемами повышения коррозионной стойкости медных слоев ИС СВЧ и повышения срока службы шарикоподшипников.

Для повышения эксплуатационных свойств металлов в различных отраслях промышленности широко используются механические, термические, деформационно-термические и химико-термические методы упрочняющей обработки и легирования. При использовании этих методов обработки материалов не всегда обеспечивается достаточно хорошая адгезия покрытий, и упрочнение происходит не только на поверхности, но и в объеме изделия. В то же время для защиты деталей от изнашивания и коррозии достаточно поверхностного упрочнения металла. Основной же объем металла испытывает лишь сравнительно незначительные разрушающие воздействия нагрузок и химически активных сред и не требует упрочнения. Ужесточение требований к структуре и свойствам поверхностных слоев стимулировало развитие методов ионной имплантации, применение которой оказывается настоящее время особенно целесообразным в микроэлектронике СВЧ.

Наиболее подробно первичные процессы ионной имплантации неоднократно обсуждались на международных и всероссийских конференциях по управлению свойствами поверхностей материалов с помощью ионных пучков, начиная с 1978 г. и в ряде статей первопроходцев ученых-физиков Палмера Д., Эйзена Ф., Фоти Дж., Гриноулда А., Керкнатрика А., Литтла Р., Миннуччи Дж., Мастерса Б., Келли Р., Мейера Дж., Лю З., Паута Дж., Каллетта Д., Мейера О., в фундаментальных монографиях, европейских и американских физических журналах, а также монографиях, научных статьях, патентах выдающихся российских ученых Кумахова М.А., Комарова Ф.Ф., Тетельбаума Д.И., Павлова П.В., Козейкина Б.В., Дорфмана В.Ф., Соколова Е.Б., Гусевой М.И., Африканова И.Н., Гусева В.М., Мансуровой А.Н., Мартынен-

ко Ю.В. и выявлены некоторые ограничения, лимитирующие возможности ионной имплантации [12, 13]:

- возможность введения любой примеси иногда ограничена свойствами рабочего вещества ионного источника: слишком высокая рабочая температура; химическая или температурная нестойкость; чрезмерная токсичность; коррозионная активность;

- возможность легировать любой материал в действительности означает только возможность ввести, внедрить атомы легирующего вещества внутрь объема мишени. Если понятие «легирование» означает еще и вполне определенное положение в кристаллической решетке мишени, то здесь возможности ионной имплантации во многих случаях не намного больше, чем, например, диффузии. Другое ограничение – радиационная стойкость материала мишени. Условия облучения таковы, что декомпозиция сложных материалов имеет место при имплантации почти всегда (из-за испарения или распыления какой-либо компоненты химического соединения);

- возможность вводить примесь в любой концентрации ограничена сверху коэффициентом распыления слоя. Кроме того, примесь, введенная сверх предела растворимости, при отжиге дефектов, как правило, выделяется в виде преципитатов другой фазы;

- низкие температуры легирования характерны только для таких систем, где состояние кристаллической решетки несущественно. Если же нарушенную решетку нужно восстановить после имплантации, то выигрыш в температуре по сравнению, например, с диффузионным легированием становится существенно скромнее;

- изотопная чистота ионного пучка отнюдь не означает изотопной же чистоты легирования. Распыление деталей имплантационной установки быстрыми ионами и неконтролируемое вбивание распыленных атомов в имплантируемый слой может существенно испортить свойства слоя, поэтому требуются операции, для исключения попадания на легируемую поверхность посторонних веществ;

- локальность легирования при имплантации обеспечивается маскированием фотоэлектронорезистом либо накладными трафаретами-масками. Здесь особенность связана с вбиванием материала маски в легируемый слой;

- малая толщина легированного слоя хороша в микроэлектронике, но отнюдь не является достоинством в металлургических применениях;

- большие градиенты концентрации примеси по глубине труднодостижимы. Расчетные градиенты (по распределению пробега ионов) реально сложно получить из-за размытия профиля, обусловленного радиационным стимулированием диффузии примеси;

- легкость контроля и автоматизации процесса во многих видах установок используется, но до полностью автоматизированной технологической линии еще далеко.

Итак, существует устойчивое мнение, что ионная имплантация с сепарацией по массам – уникальный по своим возможностям метод исследования и модификации поверхностных слоев, уникальный и по спектру легирующих примесей, и по спектру обрабатываемых материалов, и по диапазону концентраций примеси в легированном слое – хороша только для исследовательских, поисковых целей.

Настоящая статья выявляет перспективы и предлагает материаловедческий подход к практическому использованию ионно-лучевой технологии материалов интегральных схем, содержит фактические данные, которые будут полезны студентам, магистрантам, обучающимся физике твердого тела, материаловедению, электротехнологии.

Перспективы использования ионно-лучевых методов в монолитно-интегральной технологии микроэлектроники СВЧ. Перспективы совершенствования и расширения областей применения технологии ионного легирования полупроводниковых материалов в значительной мере определяются общими тенденциями в развитии микроэлектроники. Одна из таких тенденций в области тех-

нологии, наглядно проявляющаяся в микроэлектронике СВЧ диапазона, связана с интенсивными разработками монолитных интегральных схем (МИС), представляющих новое поколение интегральных схем, следующих за гибридными схемами. Основным преимуществом МИС является более полная реализация требований к радиокомпонентам – малая стоимость (в условиях массового производства), высокая надежность и воспроизводимость характеристик, малые габаритные размеры и масса, универсальность схемотехники, возможность размещения многофункциональных узлов на одном чипе [15, 16].

Примерами простых функциональных компонентов с низким уровнем интеграции, изготовление которых возможно в монолитном исполнении, являются маломощные и мощные усилители, смесители, генераторы, переключатели. Значительное повышение надежности, уменьшение габаритов и паразитных потерь, вносимых корпусами и переходами, ожидается при создании на одном кристалле приемных ВЧ-блоков, модуляторов и демодуляторов, фазовращателей. Более сложные схемы, например модули приемопередатчиков, на первой стадии будут создаваться путем интегрирования нескольких чипов.

Разработка МИС не только ставит новые задачи в области проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), но и обуславливает как поиск новых методов технологической реализации, так и смещение акцентов в использовании традиционных методов изготовления полупроводниковых устройств. В частности, создание МИС невозможно без учета специфических особенностей и принципов монолитно-интегральной технологии (МИТ), являющейся новым этапом в развитии технологических методов микроэлектроники.

В развитии технологии СВЧ устройств прослеживаются два направления. Первое связано с совершенствованием способов сборки или компоновки устройств. Оно обусловило переход от пайки к микросварке и в конечном итоге к созданию

устройств из отдельных чипов, то есть компонентов РЭА на одном кристалле, осуществляющих однократное преобразование сигнала. Второе направление связано с уменьшением числа компонентов, из которых создается сложное устройство, и с соответствующим усложнением функций и топологии отдельных компонентов (чипов). Первое направление отражает все более полную реализацию принципа схематической интеграции, второе находит логическое завершение в МИТ.

Существующее определение МИТ как способа формирования всех активных и пассивных элементов схемы, а также межсоединений в объеме или на поверхности полупроводящей подложки [15], не полностью учитывает содержание и отличительные признаки нового этапа в развитии технологии. Так, очевидным признаком МИС – исполнение на одном твердом носителе – обладают уже разработанные чипы и отдельные элементы схем. Неопределенным является и выделение МИС по функциональному признаку, то есть как компонентов, выполняющих достаточно сложную функцию, так как простейшие компоненты (реактивности, активные приборы) в принципе всегда могут быть изготовлены в монолитном исполнении, а для сверхсложных схем неизбежна схематическая интеграция нескольких компонентов. Кроме того, существующие чипы содержат несколько элементов схемы, а групповое изготовление приборов на одном кристалле является общей особенностью микроэлектроники. Следовательно, топологическая сложность и количество элементов на кристалле также не являются специфическими признаками МИС.

В общем случае МИС содержит элементы, различные не только по принципу работы и функциональным назначениям, но и по технологическому исполнению, то есть по числу и последовательности выполнения технологических операций. Технологическая неоднородность элементов, выполненных на одной пластине, является важнейшим признаком, отличающим МИС от других компонентов и определяющим требования к МИТ.

Технологическая неоднородность элементов, несущественная для простых компонентов (например, активный элемент плюс резистор), обязательно учитывается при выборе схемы сложных устройств и вынуждает в настоящее время создавать технологически несовместимые элементы (в частности, параметрический диод, полевой транзистор) на разных чипах. В современной технологии применяются, как правило, тотальные операции (например, полупроводниковые и диэлектрические слои наносятся на всю поверхность пластины), и формирование локальных элементов осуществляется лишь на стадии литографии. Такой подход при изготовлении МИС обуславливает их неконкурентоспособность из-за большого числа необходимых операций совмещения. В силу этого в МИТ становятся локальными (или локально-селективными) все основные операции (легирование, изоляция и пассивация и т.д.).

Выполнение таких операций на одном твердом носителе требует их максимальной совместимости между собой как топологически (на одной пластине), так и технологически (в одном техпроцессе). Поэтому важным требованием, предъявляемым к МИТ, является замкнутость технологического процесса. Оптимальным путем реализации замкнутого техпроцесса служит использование единых по физико-химической природе методов при проведении различных операций.

Условие создания замкнутого технологического цикла, дополненное требованием локальности, резко сокращает набор базовых физико-химических процессов. В настоящее время признается [15, 16], что МИТ будет основываться на процессах многослойной прецизионной металлизации (создание электродов и пассивных элементов), субмикронной литографии и локального травления (создание топологии), локально-селективной ионной имплантации (создание полупроводниковых структур), причем три последних процесса реализуются на базе ионно-лучевых методов.

Таким образом, МИТ связана с переходом от схмотехнической к технологиче-

ской интеграции и может быть определена как способ формирования технологически неоднородных схем в объеме или на поверхности одного твердого носителя, основанный на применении локально-селективных, полностью совместимых между собой операций и единого физико-химического метода, реализующего замкнутый технологический процесс.

Универсальная МИТ должна содержать набор стандартных операций. Технологические особенности различных устройств, созданных МИТ, состоят лишь в различной последовательности их выполнения, то есть каждый конкретный прибор имеет свой технологический код. При определении последовательности операций МИТ необходимо учитывать, что микроэлектронные устройства создаются путем послойного синтеза структуры МИС и литографического формирования топологии отдельных слоёв. Структура МИС состоит из металлических, полупроводниковых и диэлектрических областей, в общем случае выполненных в виде мез и подвергнутых защите от химических воздействий. Это требует операций создания активных полупроводниковых структур, металлизации, изоляции, пассивации и травления. Литография требует операции экспонирования, так как маскирование и перенос изображений дублируются операциями травления и формирования слоев с заданными свойствами. Принцип послойного формирования дополняет этот перечень операций совмещения изображений. Предшествуют технологическому процессу, завершают и обеспечивают его вспомогательные операции: контроль, изготовление подложек и литографических шаблонов, разделение матриц на отдельные схемы.

МИТ может эффективно применяться при изготовлении устройств как интегральной, так и функциональной микроэлектроники. По-видимому, можно считать, что определяющей тенденцией развития интегральной микроэлектроники является уменьшение размеров простейших элементов при неизменности выполняемой ими функции и их элементная интеграция для

реализации сложных функций. В функциональной микроэлектронике эта цель достигается при постоянном объеме устройств за счет интеграции рабочих полей различных физических эффектов, их одновременного и комбинированного применения. Поэтому в интегральной микроэлектронике МИТ является наилучшим, а в функциональной микроэлектронике – единственным способом создания элементной базы РЭА.

Ряд конструктивных и технологических особенностей МИС не позволяет подстраивать и регулировать их. Этот фактор может быть устранен только для отдельных типов МИС, однако для функциональных устройств он имеет, по-видимому, принципиальное значение. В этих условиях возрастает роль математического описания, компьютерного моделирования и оптимизации не только конструкции МИС, но и их технологии. Невозможность подстройки обуславливает относительную независимость МИТ от конструктивных особенностей прибора и требует минимальную зависимость не только рабочих характеристик прибора от технологических допусков, но и технологических операций от особенностей конструкции прибора.

При переходе к МИТ полупроводниковая подложка становится основой как активных, так и пассивных элементов схемы, что приводит к возрастанию роли полупроводникового материала, операций его обработки и отражает общую тенденцию, в соответствии с которой функциональные СВЧ устройства будут полностью основываться на использовании эффектов в нелинейных полупроводниковых средах.

В наибольшей мере требованиям, предъявляемым к МИТ, удовлетворяют технологические процессы, базирующиеся на ионно-лучевых методах. В частности, преимуществами ионно-лучевого легирования (ИЛЛ) при создании GaAs структур являются: нетермический характер легирования, строгий контроль и оперативное управление ионным внедрением примеси, чистота рабочей среды, однородность легирования по толщине и площади структуры, получение разнообразных профилей леги-

рования, необходимых для различных СВЧ устройств.

Локальное и локально-селективное ИЛЛ позволяет реализовать на одной подложке все многообразие приборов, а применение принципа самосовмещения способствует эффективному использованию поверхности кристалла. Поэтому ИЛЛ предпочитают традиционным эпитаксиальным методам, характеризующимися большей неоднородностью по площади, недостаточной контролируемостью и управляемостью процесса.

Использование ионно-лучевых процессов в качестве базового метода МИТ позволяет устранить ряд проблем изготовления МИС и обеспечивает как создание активных полупроводниковых слоев, так и выполнение других операций МИТ. Высокой эффективностью обладает процесс межэлементной изоляции путем локальной протонной, гелиевой бомбардировки [15-17] или имплантации ионов гелия. Применение метода локальной изоляции позволяет создать абсолютно планарную МИС, не требующую мезотравления, что сокращают технологический процесс и увеличивает процент выхода годных на этапе металлизации [15].

Обработка ионами электрически неактивной примеси (например, аргона) обеспечивает пассивацию и улучшение свойств фоторезистивных покрытий, а также эффективное управление химической активностью металлических покрытий [16]. Все большее применение находят процессы ионно-лучевого распыления и травления металлов, уникальными технологическими возможностями характеризуется ионная литография [10-13].

Существенно, что последовательное применение указанных процессов возможно в едином технологическом цикле путем простого изменения вида энергии и дозы ионов. Ионно-лучевая технология эффективно сочетается с вакуумными процессами металлизации, импульсного и радиационного отжига, что позволит реализовать полный технологический цикл изготовления МИС.

Принципиальным условием создания монолитно-интегральной технологии явля-

ется устранение разрывов технологической цепи и сокращение числа операций совмещения, на которых регистрируется основной технологический брак. Дополненное требованием селективности, это условие резко сокращает возможный выбор базовых технологических операций. В настоящее время методологически доказывается [16, 17], что монолитно-интегральная технология будет основываться на процессах селективной ионной имплантации (создание полупроводниковой структуры), многослойной ионной прецизионной металлизации (электроды и пассивные элементы), субмикронной ионной литографии (топология) и локального ионно-плазменного травления (создание конструкции МИС).

Использование ионно-лучевых процессов в качестве базового метода моно-

литно-интегральной технологии позволит устранить ряд проблем изготовления монолитных устройств и обеспечить создание легированных полупроводниковых слоев, ионную литографию, сухое ионное травление, ионную пассивацию и межэлементную изоляцию. Существенно, что последовательное применение указанных процессов возможно в перспективе в едином технологическом цикле путем простого изменения вида, энергии и дозы ионов. Ионная технология эффективно сочетается с вакуумными процессами металлизации и импульсного отжига, что позволяет реализовать как субмикронную ионную литографию, так и полный замкнутый технологический цикл изготовления монолитных СВЧ устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lindhard I.** // Phys. Rev. / I. Lindhard, M. Scharff. 1961. P. 124-125.
2. **Lindhard I.** Dan. Videusk. Selsk., Matt. / I. Lindhard, M. Scharff, H.E. Schiott // Phys. Medd. 1963. № 33. 14 p.
3. **Palmer D.W.** From Ideato Application (Ионная имплантация в полупроводники и другие материалы – русский перевод) / D.W. Palmer. М.: Мир, 1980. 13 с.
4. **Schiott H.E.** Videusk. Selsk., Matt. / H.E. Schiott, K. Dan // Phys. Medd. 1966. № 36. 9 p.
5. **Schiott H.E.** Rad. Effects / H.E. Schiott // Phys. Medd. 1970. № 6. 107 p.
6. **Кумахов М.А.** Энергетические потери и пробеги ионов в твердых телах / М.А. Кумахов, Ф.Ф. Комаров. Минск: БГУ, 1979. 290 с.
7. **Палмер Д.** Успехи ионной имплантации / Д. Палмер // Ионная имплантация в полупроводники и другие материалы: сб. статей. Вып. 10. М.: Мир, 1980. С. 7-57.
8. **Мейер Дж.** Ионное легирование полупроводников / Дж. Мейер, Л. Эрикссон, Дж. Дэвик. М.: Мир, 1973. 235 с.
9. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом / А.В. Павлов, П.В. Павлов,

Е.И. Зорин, И.М. Тетельбаум. Киев: Наукова думка, 1974. Т. 2. 136 с.

10. Обзор по электронной технике: физико-технологические особенности ионного легирования для монолитных СВЧ-устройств / Б.В. Козейкин, В.В. Перинский и др. // Сер. Технология, организация производства и оборудование. М., 1983. Вып. 5 (933). 49 с.

11. **Гусева М.И.** Ионная имплантация в металлах / М.И. Гусева // Поверхность. 1982. № 4. С. 27-50.

12. Кузьменко Т.Г. Особенности электрохимического и коррозионного поведения металлов и сплавов после ионного, лазерного и электронного легирования поверхности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.Г. Кузьменко. М., 1983. 27 с.

13. **Козейкин Б.В.** Субмикронная литография с применением потоков ионизирующего излучения: обзор по электронной технике / Б.В. Козейкин, А.И. Фролов, А.С. Чеботарев // Микроэлектроника. 1984. Вып. 2 (1021). 32 с.

14. **Перинская И.В.** Ионно-лучевая нанотехнология и компоненты СВЧ устройств / И.В. Перинская, В.В. Перин-

ский, В.Н. Лясников. Саратов: ИЦ «Наука», 2012. 142 с.

15. **Перинская И.В.** Субмикронная ионная литография без защитных покрытий / И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников // Известия ВолгГТУ. 2011. № 5 (78). Вып. 5. С. 109-111.

16. **Перинская И.В.** Ионно-лучевое конструирование материалов СВЧ микро-

электроники / И.В. Перинская, И.В. Родионов, В.В. Перинский. Саратов: ИЦ «Наука», 2016. 48 с.

17. Перинская И.В. Инженерное дело. Начала методологии научных исследований. Аспект электроники: учеб. пособие / И.В. Перинская, В.В. Перинский. С.Б. Вениг. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2019. 96 с.

Перинский Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir V. Perinsky – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Перинская Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Perinskaya – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УДК 621.365.5

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СВЧ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ КАМЕРАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

В.В. Захаров, С.В. Тригорлый

NUMERICAL AND FIELD RESEARCH OF MICROWAVE THERMAL PROCESSING OF DIELECTRICS IN MICROWAVE TRAVELLING WAVE CHAMBERS

V.V. Zakharov, S.V. Trigorly

Рассмотрены результаты численных и экспериментальных исследований процессов СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны на примере высокотемпературного нагрева керамических изделий и СВЧ сушки увлажненного песка в

The results of numerical and field tests of the processes relating microwave heat treatment of dielectrics in microwave traveling-wave chambers are considered based on the case of high-temperature heating of ceramic products and microwave drying of moistened

них. Приведены результаты анализа влияния учета изменения физических свойств объектов термообработки на характер тепловыделения в них при СВЧ нагреве.

Ключевые слова: математическое моделирование, СВЧ термообработка, нагрев, сушка, диэлектрики, физические свойства

Для СВЧ нагрева небольших диэлектрических объектов простой геометрической формы с определенными диэлектрическими свойствами находят применение камеры бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе [1, 2]. Преимуществом данных камер является повышенная равномерность нагрева. В таких процессах, как СВЧ сушка [3], спекание [4] и плавление [5], электрофизические свойства нагреваемых объектов существенно изменяются во времени, что приводит к перераспределению температурных полей и изменению равномерности нагрева.

В связи с этим представляет интерес проведение анализа влияния диэлектрических свойств нагреваемых объектов на температурные поля, возникающие при их СВЧ нагреве в камерах бегущей волны на базе нерегулярного прямоугольного волновода. Данный анализ целесообразно проводить путем проведения численного моделирования в сопоставлении с результатами натурных экспериментов. Обзор современных численных методов моделирования процессов СВЧ термообработки диэлектриков приведен в [6]. Одним из эффективных инструментов для проведения численного моделирования процессов СВЧ термообработки диэлектриков является программное обеспечение COMSOL Multiphysics [7], реализующее метод конечных элементов. Моделирование различных процессов СВЧ термообработки диэлектриков представлено в работах [8-10].

В настоящее время отсутствуют публикации, содержащие результаты трехмерного конечно-элементного моделирования процессов СВЧ термообработки диэлектриков в камерах бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе.

The analysis results of the impact of the changes in the physical properties of heat treatment objects on the nature of heat release during the microwave heating are presented.

Keywords: mathematical modeling, microwave heat treatment, heating, drying, dielectrics, physical properties

Результаты численных и экспериментальных исследований СВЧ камеры бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе для высокотемпературной термообработки керамических изделий. Экспериментальные исследования процессов СВЧ термообработки керамических материалов проводились для решения следующих задач: для определения температуры нагрева керамических заготовок в СВЧ камере бегущей волны с целью выбора оптимального расположения нагреваемого объекта и получения наилучшего согласования СВЧ рабочей камеры и СВЧ генератора, а также для сравнения с полученными результатами математического моделирования.

Экспериментальные исследования СВЧ нагрева керамических заготовок проводились с использованием рабочей камеры, схематическое изображение которой приведено на рис. 1. Фотография исследуемой установки приведена на рис. 2.

Выбор типа камеры, работающей преимущественно на основном типе волны TE_{10} , обусловлен относительно простым техническим воплощением. Применение двух волноводных секций позволяет подключать балластную нагрузку при неполном поглощении СВЧ энергии в процессе нагрева изделия.

Керамическая заготовка, которая представляет собой параллелепипед с геометрическими размерами 145×20×14 мм, помещается в разъемную огнеупорную форму. Для предохранения конструктивных элементов рабочей камеры от перегрева предусмотрена ее теплоизоляция.

Постановка задачи, методика, результаты конечно-элементного моделирования и экспериментов приведены в работе [11],

в которой были получены следующие выводы:

– температурное поле в процессе СВЧ нагрева имеет максимум в центре заготовки и спадает к периферии, что на

начальной стадии термообработки позволит интенсифицировать процесс удаления влаги и органических прекурсоров из внутренних областей заготовки к наружной поверхности;

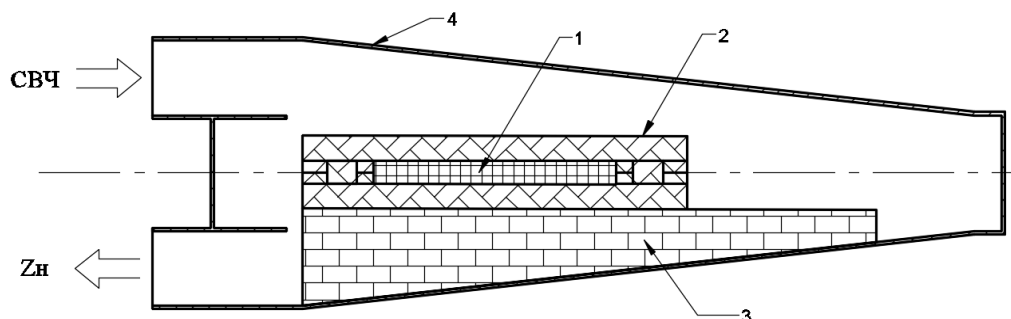


Рис. 1. Схематичное изображение СВЧ рабочей камеры: 1 – керамическая заготовка; 2 – огнеупорная форма; 3 – теплоизоляция; 4 – корпус камеры; СВЧ – ввод СВЧ энергии; Z_n – балластная нагрузка

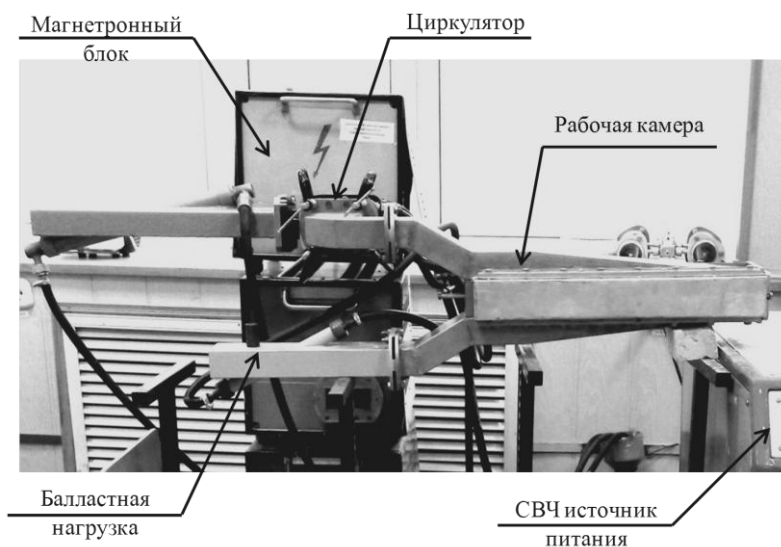


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

– выявлена качественная сходимость результатов математического моделирования и результатов натурного эксперимента. Расхождения, главным образом, связаны с методической погрешностью измерения температуры из-за необходимости отключения СВЧ мощности при проведении измерений;

– полученные экспериментальным путем температуры керамической заготовки (до 1000°C) показали возможность проведения спекания в данной установке отдельных видов керамик.

Фотография торца нагретой керамической заготовки приведена на рис. 3.

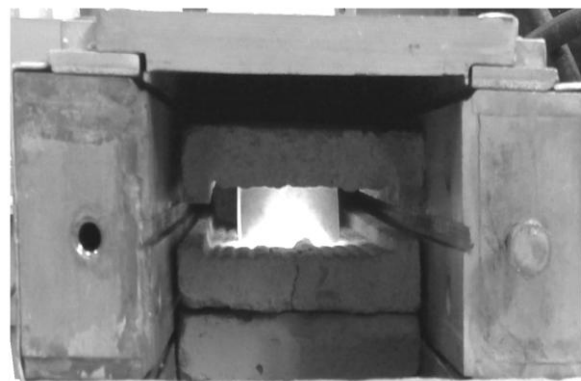


Рис. 3. Фотография торца нагретой керамической заготовки

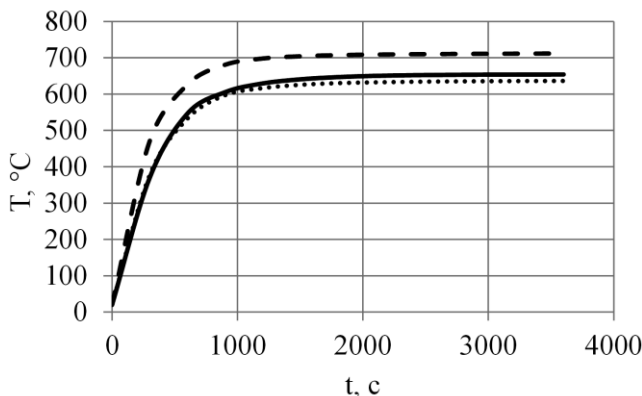
На рис. 4 приведены краткие результаты численного анализа влияния учета изменений физических свойств керамической заготовки и элементов рабочей камеры на характер тепловыделения в ней.

При проведении анализа сопоставлялись результаты моделирования, полученные при мощности СВЧ излучения 1 кВт, для следующих случаев:

– моделирование проводится с учетом изменения физических свойств;

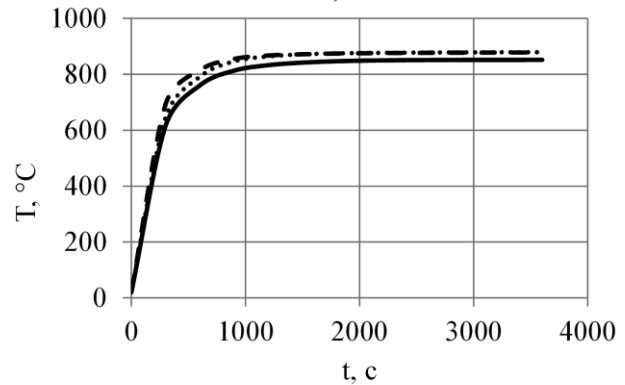
– моделирование проводится при средних значениях физических свойств в диапазоне температур нагрева, полученных в [11];

– моделирование проводится при значениях физических свойств для температуры 20°C.



..... С учетом изменений свойств
— Со средними значениями свойств
- - Со свойствами при T=20 град.С

а



..... С учетом изменений свойств
— Со средними значениями свойств
- - Со свойствами при T=20 град.С

б

Рис. 4. Результаты анализа влияния учета изменений физических свойств керамической заготовки и элементов рабочей камеры на характер тепловыделения в ней: изменения минимальной (а) и максимальной (б) температуры керамической заготовки во времени

В результате анализа установлено, что наибольшее влияние изменение физических свойств оказывает на минимальную температуру нагрева керамической заготовки. Максимальное отклонение результатов моделирования с учетом изменения физических свойств и при значениях физических свойств для температуры 20°C достигает 25%. Следует отметить, что для аналогичного сопоставления результатов моделирования максимальное отклонение средней температуры керамической заготовки (на рис. 4 не показано) достигает 15%, что весьма существенно. Абсолютные значения отклонений по температуре достигают 100°C.

Результаты численных и экспериментальных исследований СВЧ камеры бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе для низкотемпературной термообработки ди-

электриков. Экспериментальное определение полей температуры в камере бегущей волны при СВЧ нагреве проводилось на примере увлажненного песка с целью верификации результатов численного моделирования процесса нагрева в камере данного типа.

Температурные поля фиксировались в виде термограмм путем съёмки извлеченной из камеры кюветы с нагретым песком с помощью тепловизора.

Схематическое изображение рабочей камеры и фотография кюветы с песком приведены на рис. 5, 6.

Термограммы, полученные по результатам одной из трех серий экспериментов, а также температурные профили, построенные вдоль линий, проходящих через максимумы нагрева (слева направо – от торца кюветы к СВЧ генератору), приведены на рис. 7-10.

Анализируя термограммы и температурные профили на рис. 7-10, можно сделать вывод о перераспределении максимальных температур по ячейкам кюветы в зависимости от времени нагрева: для времени нагрева $\tau = 15-45$ с температурные максимумы приходятся на ячейку,

находящуюся со стороны ввода от СВЧ генератора; для момента времени $\tau = 60$ с максимум температуры приходится на ячейку у торца кюветы. При этом для момента времени $\tau = 30$ с в средней ячейке появляются два температурных максимума.

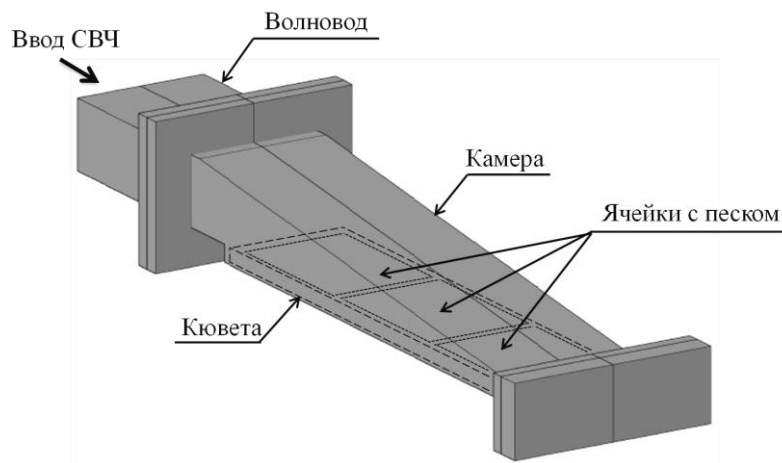


Рис. 5. Схематическое изображение рабочей камеры



Рис. 6. Фотография кюветы с песком

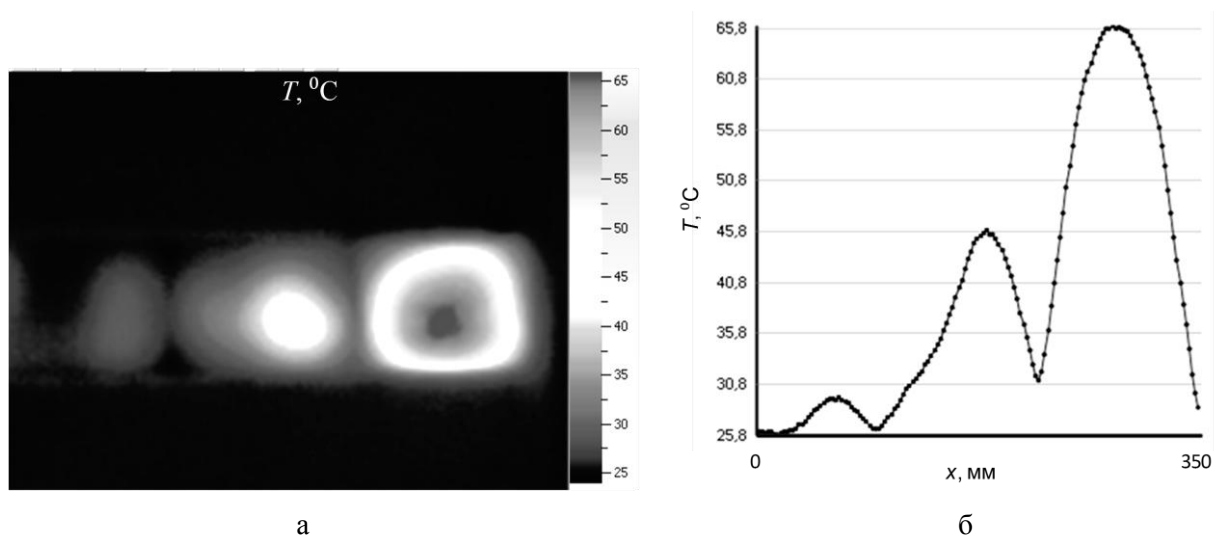
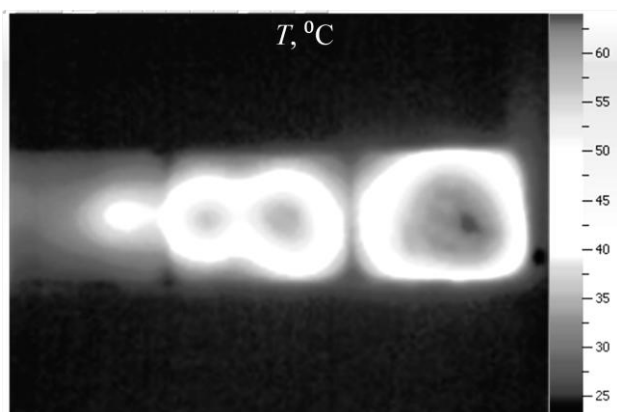
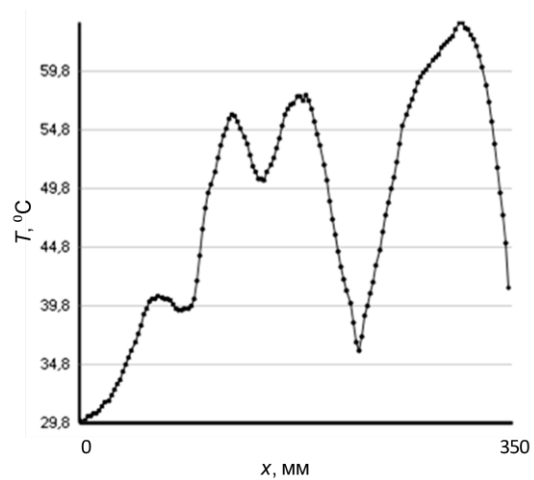


Рис. 7. Термограмма (а) и температурный профиль (б) для момента времени 15 с

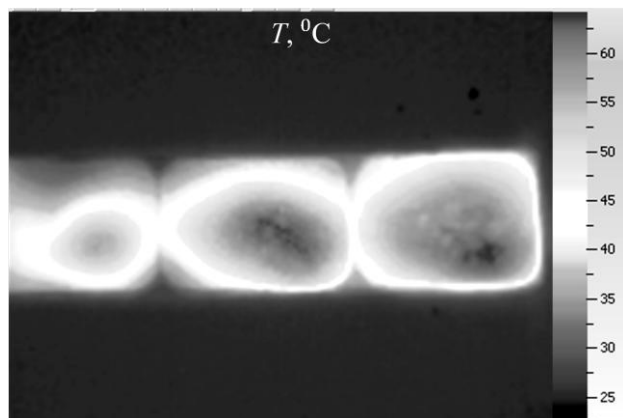


а

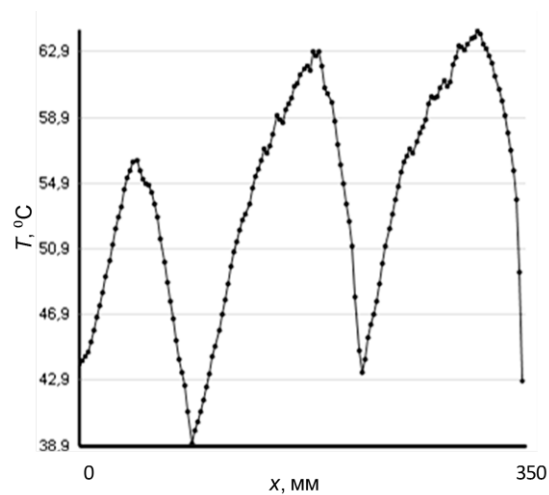


б

Рис. 8. Термограмма (а) и температурный профиль (б) для момента времени 30 с

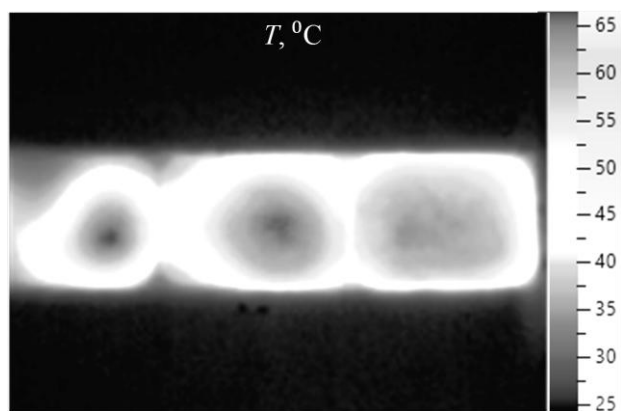


а

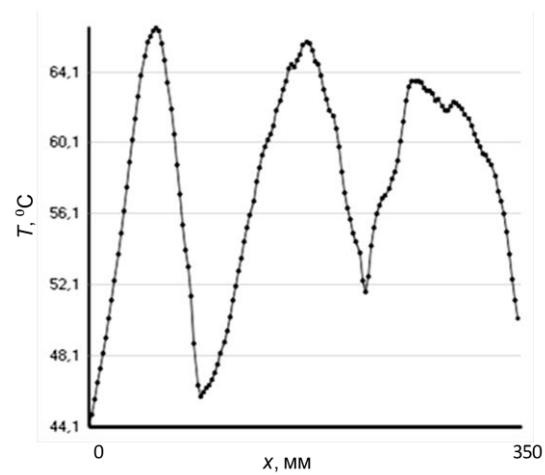


б

Рис. 9. Термограмма (а) и температурный профиль (б) для момента времени 45 с



а



б

Рис. 10. Термограмма (а) и температурный профиль (б) для момента времени 60 с

Отмеченные перераспределения температурных максимумов объясняются тем, что диэлектрические потери (ε'_r и ε''_r) в увлажненном песке обусловлены в основном его влагосодержанием, которое изменяется в процессе сушки. Таким образом, в начальные моменты времени наиболее интенсивно нагреваются области, расположенные на пути движения электромагнитной волны (т.е. ближайшая к СВЧ генератору ячейка с песком). В связи с этим песок в данной ячейке наиболее интенсивно высыхает, при этом его диэлектрические потери снижаются, позволяя электромагнитной волне распространяться в следующие ячейки кюветы, влагосодержание песка в которых, а следовательно, и диэлектрические потери, выше, чем у песка в ячейке у СВЧ генератора. Таким образом, песок в данных ячейках начинает нагреваться интенсивнее, чем в ячейке у СВЧ генератора.

В связи с вышерассмотренными результатами натурного эксперимента представляет интерес исследование влияния диэлектрических свойств песка (ε'_r и ε''_r) на количество и распределение температурных максимумов в кювете камеры.

Ввиду отсутствия возможности варьирования диэлектрических свойств песка (ε'_r и ε''_r) с их точным определением при проведении натурного эксперимента данное исследование проводилось с помощью численного эксперимента, реализованного в программе COMSOL Multiphysics на основании разработанных методик моделирования.

Рассмотрим методику задания электро- и теплофизических свойств элементов модели. Для задания электро- и теплофизических свойств песка воспользуемся моделью эффективных параметров двухкомпонентного материала [12]:

$$x_{eff} = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2, \quad (1)$$

где x_{eff} – эффективный параметр двухкомпонентного материала; θ_1 и θ_2 – объемная доля компонента 1 и 2 соответственно; x_1 и x_2 – параметры компонентов 1 и 2 соответственно. Для данной модели в качестве

компонента 1 выступает сухой песок, в качестве компонента 2 – вода. Усредненные в прогнозируемом интервале температур нагрева свойства сухого песка, воды и двухкомпонентной смеси (влажного песка по формуле (1)) приведены в таблице. Объемная доля песка, определенная при проведении натурного эксперимента $\theta_1 = 0,771$, воды – $\theta_2 = 0,229$.

Поскольку при одинаковых теплофизических свойствах песка во всех ячейках кюветы максимумы температурного поля соответствуют максимумам электрического поля, в рамках данного численного эксперимента при варьировании ε'_r и ε''_r в качестве теплофизических свойств песка для всех экспериментов применяются постоянные значения свойств влажного песка.

Основные свойства сухого песка, воды и влажного песка

Параметр	Значение параметра		
	сухой песок	вода	влажный песок
ε'_r	2,50	68,25	17,54
ε''_r	0,00275	5,75000	1,31730
ρ , кг/м ³	1385	989	1294
c_p , Дж/(кг·К)	800	4180	1573
λ , Вт/(м·К)	0,420	0,638	0,470

Для материала кюветы принимаются теплофизические свойства акрилового пластика, который условно принимается радиопрозрачным, что подтверждается результатами эксперимента.

Варьирование параметров ε'_r и ε''_r проводится для всех их сочетаний по таблице (9 сочетаний), при этом в предельных сочетаниях электрофизические свойства ε'_r и ε''_r принимают значения соответствующих свойств для сухого песка и воды. Остальные сочетания (за исключением вышеуказанных и сочетания для влажного песка $\varepsilon'_r = 17,54$ $\varepsilon''_r = 1,3173$) не имеют физического смысла, однако позволяют сделать более полные выводы о характере

влияния данных электрофизических свойств на распределение температурного поля по кювете.

Рассмотрим результаты моделирования. На рис. 11 приведены распределения температуры в кювете с песком по линии, проходящей по верхней поверхности кюветы с песком через точки, соответствующие температурным максимумам. На рис. 11 СВЧ генератор расположен слева, торец кюветы – справа.

Из графиков рис. 11 видно, что наилучшая равномерность нагрева вдоль кюветы с песком получена при $\varepsilon'_r = 2,5$, $\varepsilon''_r = 5,75$. При этом для ячейки у СВЧ генератора и средней ячейки неравномерность нагрева не превышает 6%, для торцевой ячейки – 15%. Повышение неравномерности нагрева у торцевой ячейки связано с отражением от торцевой металлической стенки рабочей камеры не полностью поглощенной при прямом прохождении электромагнитной волны.

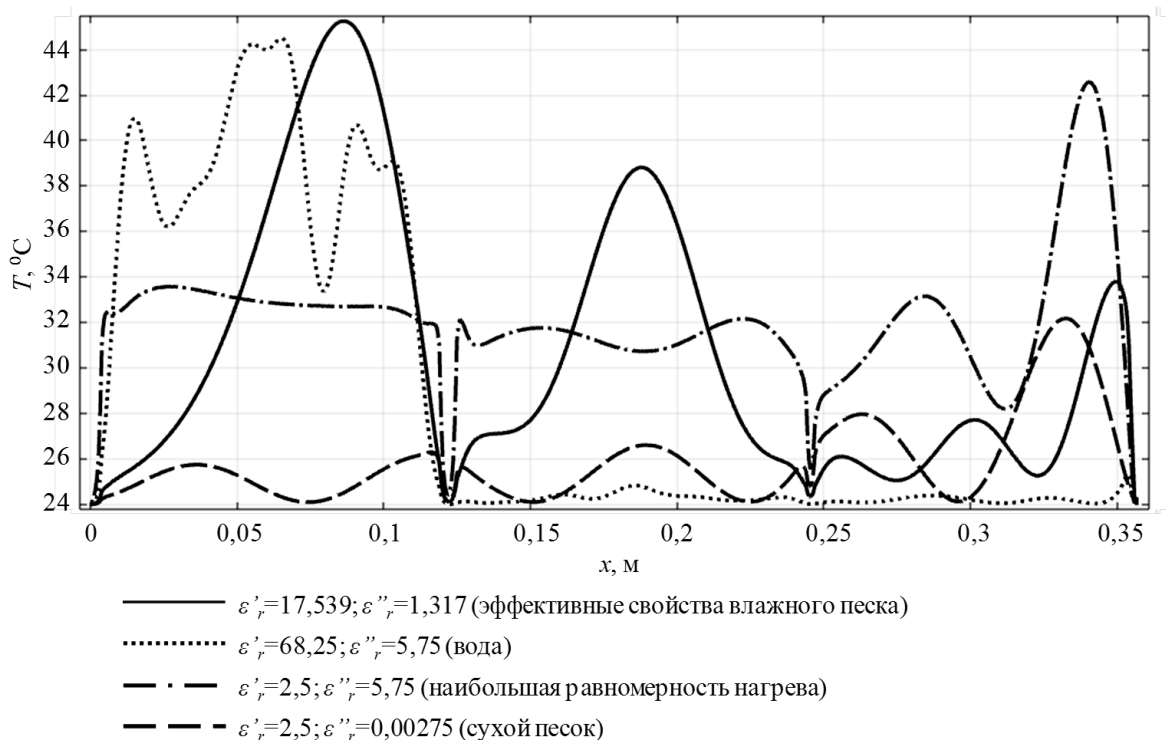


Рис. 11. Распределения температуры на поверхности кюветы с песком вдоль линии, соответствующей максимумам нагрева

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. При высокотемпературной СВЧ термообработке керамических изделий в рассмотренной СВЧ камере бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе не учет изменений физических свойств материалов может привести к отклонениям результатов моделирования, достигающим 25% (до 100°C по абсолютному значению) от аналогичных результатов, полученных с учетом изменения физических свойств. Изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь диэлектриков при сушке приводят к су-

щественному перераспределению температуры в объекте термообработки.

Таким образом, рассмотренные результаты численных и экспериментальных исследований процессов высоко- и низкотемпературной СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны подтверждают актуальность необходимости учета изменений физических свойств обрабатываемых диэлектриков и конструктивных элементов рабочих камер при их математическом моделировании с целью получения результатов, адекватных реальным процессам.

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. А.с. 362580 СССР, МПК H05B 6/00 (2000.01). Волноводная камера для термообработки диэлектриков / Ю.С. Архангельский [и др.]. №1709800; заявл. 28.10.1971; опубл. 17.09.1973; Бюл. № 37. 5 с.
3. Microwave Drying of Wet Processed Wood Fibre Insulating Boards / M. Bartholme, G. Avramidis, W. Viol, A. Kharazipour // Eur. J. Wood Prod. 2009. № 67. P. 357-360.
4. **Argawal D.** Microwave Sintering of Ceramics, Composites and Metallic Materials, and melting of Glasses / D. Argawal // Transactions of The Indian Ceramic Society. July-September, 2006. Vol. 65 (3). P. 129-144.
5. Alternative Crucibles for U-Mo Microwave Melting, https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-26479.pdf (09.01.2019).
6. **Захаров В.В.** Электротехнологические процессы СВЧ термообработки диэлектриков и методы их моделирования с учетом изменения физических свойств материалов, фазовых переходов и тепло-массопереноса / В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 23-32.
7. Численное моделирование электротехнологических процессов с применением программного пакета COMSOL Multiphysics / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлы, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 34-42.
8. **Kalganova S.** Computer Simulation of Microwave Heat Treatment of Dielectrics / S. Kalganova, S. Trigorly, V. Zakharov // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (INFORINO) / MPEI. М., 2018. P. 1-5.
9. **Trigorly S.** Numerical Modeling of Microwave Drying Dielectrics Processes with Regulation of Power Source Output Power / S. Trigorly, V. Zakharov // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) / SSTU. Saratov, 2018. P. 132-139.
10. **Trigorly S.** Mathematical Modeling of the Processes of Microwave Thermal Processing of Extended Dielectrics with the Use of Mobile Radiation Systems / S. Trigorly, V. Zakharov // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) / SSTU. Saratov, 2018. P. 125-131.
11. **Тригорлы С.В.** Моделирование и испытания СВЧ электротехнологической установки для высокотемпературной термообработки керамики / С.В. Тригорлы, В.Ю. Кожевников, В.В. Захаров // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2017. № 4 (56). С. 98-105.
12. **Богородицкий Н.П.** Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев; 7-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 304 с.

Захаров Вадим Валерьевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., начальник лаборатории научно-исследовательского центра АО «ГипроНИИГаз»

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

Vadim V. Zakharov – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Head of Laboratory of the Research Center АО «GiproNIIGaz»

Sergey V. Trigorly – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УДК 621.396

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТИРИСТОРНОГО
РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ
С ФАЗОИМПУЛЬСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

В.П. Рубцов, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин

**USING A SIMULATION MODEL TO DETERMINE THE ENERGY
CHARACTERISTIC OF AN ELECTRIC RESISTANCE FURNACE
COMPLEX AND A THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR
WITH A PHASE-PULSE CONTROL**

V.P. Rubtsov, E.S. Ryazanova, A.Yu. Chursin

Рассматриваются энергетические характеристики регулятора температуры электрической печи сопротивления, получающей питание от сети переменного тока с использованием тиристорного регулятора напряжения с фазоимпульсным управлением. Исследования проводятся применительно к комплексу, включающему собственно печь сопротивления, тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным управлением, датчик температуры и регулирующее устройство, вырабатывающее пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления. В отличие от традиционных исследований в статье анализируется совокупность электрических и тепловых процессов, протекающих в комплексе оборудования, включающем электрическую печь сопротивления и тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным управлением. С использованием разработанной имитационной модели рассчитываются такие виртуальные энергетические характеристики, как полная, активная и реактивная мощности, а также коэффициент мощности, определяющий эффективность работы комплекса и установленные мощности тиристорных регуляторов напряжения. Анализируется влияние на эффективность работы комплекса

The energy characteristics of the temperature controller of an electric resistance furnace that receives power from the AC network using a thyristor voltage regulator with phase-pulse control are considered. The research is carried out in relation to a complex that includes the resistance furnace itself, a thyristor voltage regulator with phase-pulse control, a temperature sensor and a regulating device that generates a proportional-integral-differential control law. In contrast to traditional research, the article analyzes the totality of electrical and thermal processes occurring in a complex of equipment that includes an electric resistance furnace and a thyristor voltage regulator with phase-pulse control. Using the developed simulation model, such virtual energy characteristics as total, active and reactive power, as well as the power factor that determines the efficiency of the complex and the installed power of thyristor voltage regulators are calculated. The influence on the efficiency of the complex of such an indicator as the excess of the installed power of the voltage regulator over the av-

такого показателя, как превышение установленной мощности регулятора напряжения над средней мощностью, потребляемой печью.

Ключевые слова: электрическая печь сопротивления, энергетические характеристики, фазоимпульсное регулирование напряжения, регулятор температуры

Введение

Современные системы регулирования температуры электрических печей сопротивления (ЭПС) включают комплекс разнородных по принципу действия и физическому составу элементов, обеспечивающих как измерение температуры, так и регулирование поступающей на нагреватели мощности. Для изменения вводимой в ЭПС мощности в настоящее время широко применяются тиристорные регуляторы переменного напряжения с широтно-импульсным (дискретным) или фазоимпульсным (непрерывным) управлением величиной питающего напряжения [1]. Характерно, что регулирование напряжения на нагревателях ЭПС при любом из указанных выше способов сопровождается искажением кривой питающего напряжения, что приводит, с одной стороны, к уменьшению коэффициента мощности установки, а с другой – к увеличению установленной мощности силовых элементов. Это приводит к необходимости учитывать искажения питающего напряжения при расчете потребляемой мощности и выборе комплектующих регулятора напряжения. Точный расчет потребляемой мощности ЭПС с тиристорным регулятором напряжения представляет значительные трудности, обусловленные искажениями напряжения на нагревателях.

Традиционно при исследовании режимов работы систем регулирования температуры в электрических печах сопротивления (ЭПС) ограничиваются рассмотрением только тепловых процессов и практически не рассматривают электрические процессы [2]. Это приводит к тому, что при таких исследованиях остается неизвестным, какова же реальная мощность, потребляемая ЭПС, и какова должна быть установленная мощность тиристорного регулятора напряже-

rage power consumed by the furnace is analyzed.

Keywords: electric resistance furnace, energy characteristics, phase-pulse voltage regulation, temperature controller

ния? Общеизвестно [3], что тиристорный регулятор напряжения, используемый в настоящее время повсеместно, при регулировании вводимой в ЭПС мощности искажает кривую сетевого напряжения, что приводит к снижению коэффициента мощности и появлению высших или субгармонических составляющих. Однако при проектировании систем управления ЭПС, как правило, эти факторы в расчетах не учитываются, что часто приводит к перегрузкам питающих трансформаторов и выходу из строя подводящих кабелей или недоиспользованию установленной мощности электрооборудования. В то же время обоснованный выбор электрооборудования крайне важен для производства и эксплуатации ЭПС, являющихся массовым оборудованием, применяемым в различных отраслях производства, а их мощности достигают значений до нескольких мегаватт [4].

Постановка задачи

Целью проводимого исследования является установление взаимосвязи между электрическими и тепловыми процессами в ЭПС. Поставленную задачу необходимо решать на основе уравнений электрического равновесия в системе электропитания нагревателей, теплопередачи в печи и процессов автоматического поддержания температуры в замкнутой системе автоматического управления. Математическое описание процессов в такой системе управления может быть получено при учете особенностей измерения таких электрических величин, как напряжение, ток и мощность с учетом искажений, вносимых в систему электропитания тиристорным регулятором напряжения при фазоимпульсном управлении.

Функциональная схема системы

Функциональная схема системы (рис. 1), в которую наряду с традиционно используемыми функциональными элементами введены блоки, вычисляющие действующие значения тока (БВТ), напряжения (БВН), активной мощности (БВАМ) и полной мощности (БВПМ).

Схема рис. 1 включает тиристорный регулятор напряжения с фазоимпульсным управлением ТФИР, который подключен к нагревателям печи сопротивления ЭПС через датчик тока ДТ. Напряжение на нагревателях ЭПС поступает также на датчик напряжения ДН. Регулятор температуры ЭПС представлен в системе регулирующим устройством РУ, на вход задания температуры которого подается заданное значение температуры печи Θ_3 , а на вход обратной связи – текущее значение температуры Θ , снимаемое с датчика температуры Д Θ . Регулятор температуры ЭПС поддерживает заданное значение тем-

пературы печи путем фазоимпульсного регулирования напряжения питания U_c , которое, как известно, сопровождается искажениями кривых напряжения и тока. Вопросы влияния искажений кривых напряжения и тока на энергетические характеристики регулятора температуры ЭПС в настоящее время изучены недостаточно.

При питании нагревателей ЭПС переменным напряжением несинусоидальной формы необходимо измерять действующие значения переменных. С этой целью в схему рис. 1 введены блоки выделения действующих значений тока БВТ, напряжения БВН, активной БВАМ и полной БВПМ мощностей. Необходимость выделения именно действующих значений активной и полной мощностей связана с расчетом такого важного для определения энергетических характеристик регулятора температуры ЭПС как коэффициент мощности.

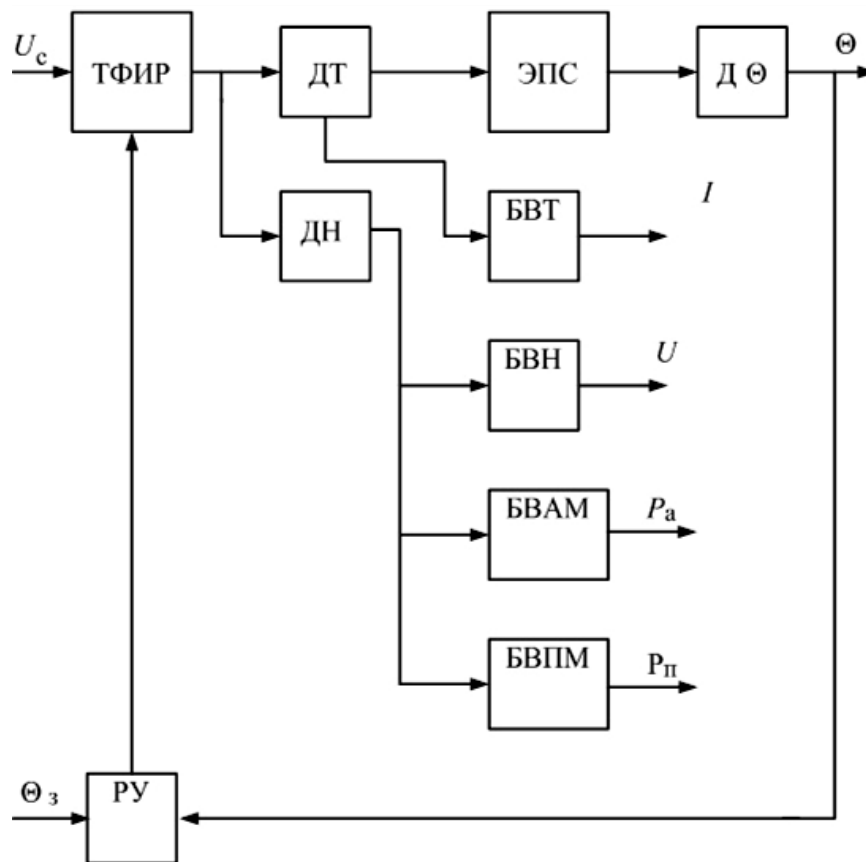


Рис. 1. Функциональная схема комплексной системы автоматического регулирования температуры ЭПС

чения величин P_a и P_n , используемых при расчете коэффициента мощности χ , определялись для установившихся значений температуры печи Θ .

Вычисление на имитационной модели коэффициента мощности χ регулятора температуры имеет важное значение для проектирования системы управления и определения установленной мощности источника питания ЭПС – тиристорного регулятора напряжения. Дело в том, что сложившая практика определения коэффициента мощности установки на основе вычисления (или измерения) $\cos \varphi$ пригодна только в тех случаях, когда электрические величины синусоидальны, отсутствуют их искажения и высшие гармонические составляющие. В этих случаях $\cos \varphi$ рассчитывается по выражению

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{P_n} = \frac{P_a}{\sqrt{(P_a^2 + Q^2)}},$$

где P_a – активная мощность, а Q – реактивная мощность.

В случаях, к которым относится и рассматриваемая установка, когда в системе питания имеют место искажения формы кривых напряжения и тока, использование $\cos \varphi$ некорректно, поскольку в этих случаях полная мощность должна определяться по выражению $P_n = \sqrt{(P_a^2 + Q^2 + T^2)}$, где T – мощность искажений [7-9].

Дело в том, что «естественный» $\cos \varphi$ резистивного нагревателя печи сопротивления лежит в пределах 0,85-0,95 и при питании от сети с синусоидальным (неискаженным) напряжением не зависит от режима работы регулятора температуры. Это обстоятельство, как правило, и вводит разработчиков систем электропитания ЭПС в заблуждение о «чисто активной» нагрузке, присущей печам сопротивления. Массовое применение тиристорных регуляторов напряжения в системах управления печами сопротивления, вызывающих искажения кривых напряжения и тока, приводит к необходимости обязательного учета этих особенностей тиристорных регуляторов температуры ЭПС.

Для исследования влияния тиристорного регулятора напряжения на коэффициент мощности ЭПС на имитационной модели рис. 3 был рассчитан коэффициент мощности χ для различных значений коэффициента превышения мощности $K_m = P_{a \max} / P_{cp}$, где $P_{a \max}$ – максимальное значение мощности тиристорного регулятора напряжения; P_{cp} – среднее значение активной мощности, выделяемой в нагревателях печи. Рассчитанные на имитационной модели рис. 3 действующие значения активной мощности P_a , полной мощности P_n и коэффициента мощности χ приведены в таблице.

Энергетические характеристики регулятора температуры ЭПС с фазоимпульсным тиристорным регулятором напряжения:
 K_n – коэффициент превышения мощности;
 $P_{акт}$ – активная мощность; $P_{пол}$ – полная мощность; χ – коэффициент мощности;
 Θ – температура

K_n	$P_{акт}$, Вт	$P_{пол}$, Вт	χ	Θ , °C
1	2193	2785	0,79	502
0,9	1973	2642	0,75	451,8
0,8	1754	2491	0,7	401,6
0,7	1535	2330	0,66	351,4
0,6	1316	2157	0,61	301,2
0,5	1096	1969	0,56	251

Как следует из анализа данных таблицы, значения коэффициента мощности χ регулятора температуры ЭПС при питании ее от тиристорного регулятора напряжения с фазоимпульсным регулятором напряжения значительно меньше в сравнении с «естественным» коэффициентом мощности $\cos \varphi$ резистивного нагревателя при питании его от синусоидального напряжения. Для наглядности проведенного сравнения на рис. 3 приведены зависимости, построенные по данным таблицы.

Имитационная модель (рис. 2) пригодна для анализа процессов регулирования в диапазоне изменения параметров печи и питающего напряжения, ограниченных только их

реализуемостью [8, 9]. В данном исследовании для получения более наглядных зависимостей использовались следующие значения параметров печи и системы управления: амплитудное значение напряжения на выходе фазоимпульсного модулятора $U_{c\max} = 100$ В;

частота питающей сети $f = 50$ Гц; активное сопротивление нагревателей печи $R = 10$ Ом; электрическая постоянная времени нагревателей $T_n = 0,01$ с; тепловая постоянная времени печи $T_n = 1000$ с; заданная температура печи $\Theta = 200^\circ\text{C}$.

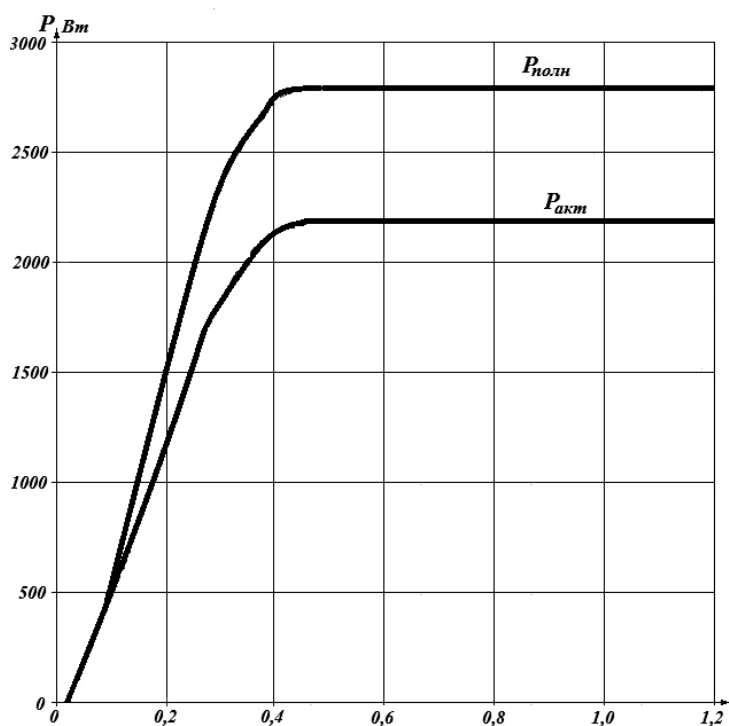


Рис. 3. Энергетические характеристики регулятора температуры ЭПС с тиристорным регулятором напряжения

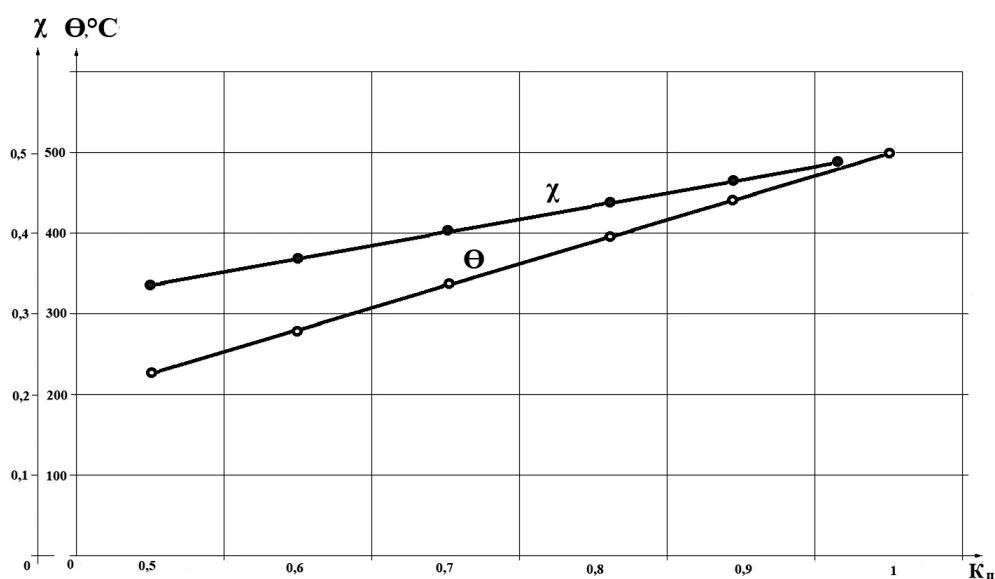


Рис. 4. Зависимости коэффициента мощности χ и температуры печи Θ от коэффициента превышения мощности K_n

Для оценки возможности анализа графических изображений осциллограмм с сильно различающимися временными характеристиками в рамках одного процесса регулирования были рассчитаны переходные функции электрических величин (напряжения, тока и мощностей), а также температуры печи Θ .

Заключение

На основании проведенных исследований установлены удобство и целесообразность использования имитационной модели для анализа и синтеза сложных неоднородных электротехнологических систем, включающих различные по быстродействию процессы. Разработанные модели вычисления действующих значений несинусоидальных напряжений и токов, характеризующих работу регуляторов температуры печей сопротивления, использующих для питания нагревательных элементов тиристорные регуляторы напряжения с фазоимпульсным регулированием, адекватно отражают протекающие в системе процессы и позволяют определять их энергетические и технологические характеристики.

Большое значение при использовании тиристорных регуляторов напряжения приобретает определение такого энергетического показателя работы электротехнического оборудования как коэффициент мощности, который используется как при

проектировании источников питания, так и при сравнении различных схем питания.

В статье акцентируется внимание исследователей на часто допускаемую ошибку в трактовке такого понятия как коэффициент мощности для линейной электрической цепи с индуктивной нагрузкой и нелинейной электрической цепи с тиристорным преобразователем напряжения, вызывающим искажения кривых напряжения и тока. В последнем случае при определении коэффициента мощности электротехнологической установки необходимо учитывать мощность искажений, наличие которой приводит к значительному снижению коэффициента мощности и, следовательно, увеличению требуемой установленной мощности источника питания.

В процессе исследований установлено, что имитационная модель некорректно вычисляет значение коэффициента мощности $\chi = P_a(t)/P_n(t)$, что вызвано, по-видимому, использованием операции деления нелинейных разрывных функций, которыми описываются функции $P_a(t)$ и $P_n(t)$. Поэтому вычисление коэффициента мощности χ в нелинейной системе электропитания с тиристорными регуляторами напряжения необходимо осуществлять путем деления вне модели численных значений величин активной и полной мощностей, полученных для установившихся значений температуры печи Θ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнический справочник. Т. 3. Кн. 2. Использование электрической энергии / под общ. ред. проф. И.Н. Орлова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 616 с.
2. Рубцов В.П. Системы автоматического управления электрическими печами сопротивления: учеб. пособие / В.П. Рубцов, А.В. Щербаков. М.: Изд-во МЭИ, 2015. Ч. 1. 56 с.
3. Рубцов В.П. Исследование влияния неоднородности электрической печи сопротивления как объекта управления / В.П. Рубцов, В.А. Щербаков, Е.В. Горячих // Электротехника. 2015. № 7. С. 41-45.
4. Бородачев А.С. Электрические печи сопротивления. Конструкции и эксплуатация электропечей сопротивления / А.С. Бородачев, В.Д. Артемьев; под ред. В.С. Чередниченко. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 572 с. (Современные электротехнологии. Т. 1).
5. Герман-Галкин С.Г. Matlab @ Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. СПб.: Корона-Век, 2008. 368 с.
6. Щербаков В.С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электрических систем в среде MATLAB и

SIMULINK: учеб. пособие / В.С. Щербаков, А.А. Руппель, В.А. Глушец. Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. 160 с.

7. **Рубцов В.П.** Влияние ограничения тока нагревателей на работу регулятора температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления / В.П. Рубцов, Ф.Е. Митяков // Вестник МЭИ. 2012. № 2. С. 80-84.

8. **Рубцов В.П.** Исполнительные элементы систем автоматического управления электротехнологическими установками / В.П. Рубцов. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 55 с.

9. **Рубцов В.П.** Разработка уточненной модели электрической печи сопротивления на основе экспериментальных исследований / В.П. Рубцов, Е.В. Горячих, Ф.Е. Митяков // Вестник МЭИ. 2015. № 3. С. 48-52.

Рубцов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» НИУ «МЭИ»

Рязанова Елена Сергеевна – ведущий инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» НИУ «МЭИ»

Чурсин Андрей Юлианович – заведующий учебной лабораторией кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» НИУ «МЭИ»

Viktor P. Rubtsov – Dr Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises and Electrical Technologies of the Scientific Research Institute MEI

Elena S. Ryazanova – Lead Engineer, Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies of Scientific Research Institute MEI

Andrey Yu. Chursin – Head of the Training Laboratory of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies of Scientific Research Institute MEI

Статья поступила в редакцию 20. 01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция готова опубликовать сведения о ваших вузах и предприятиях, об их истории, научных и производственных успехах, планах на будущее. Объем публикации – одна страница текста с фотографиями.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.365.5

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ФУТЕРОВКИ ТИГЛЯ И АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

И.Ю. Долгих, М.Г. Марков

A MICROPROCESSOR SEGMENT TO MONITORING THE CRUCIBLE LINING AND EMERGENCY BLACKOUT OF INDUCTION FURNACES

I.Yu. Dolgikh, M.G. Markov

Предложен вариант микропроцессорной системы, реализующей мониторинг состояния огнеупорной футеровки, отображение места и степени её разрушения, а также аварийное отключение индукционной плавильной печи при достижении критического уровня износа тигля. Разработаны структура, схема и алгоритмы функционирования многоканального монитора с одним концентратором. Составлены программы для микропроцессоров и выполнена их проверка с использованием отладчика MPLAB-Sim и среды симуляции Proteus.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, система мониторинга огнеупорной футеровки, аварийное отключение, термонара, микропроцессор, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП)

В настоящее время распространённым типом электротермических установок являются индукционные тигельные печи, представляющие собой сложную электромагнитную систему с многовитковым внешним индуктором и цилиндрическим сосудом (тиглем), внутрь которого помещается переплавляемый материал. Широкий спектр преимуществ таких печей делает актуальным их использование в области чёрной и цветной металлургии для плавки, удержания и раз-

A type of the microprocessor system is proposed to monitor the status of the refractory lining, its location and destruction degree, as well as emergency blackout of the induction melting furnace under the critical level of the crucible wear. The structure, schematic and operation algorithms for a multi-channel monitor with a single concentrator have been developed. The programs for microprocessors have been designed and verified using the MPLAB-Sim debugger and the Proteus simulation environment.

Keywords: induction crucible furnace, refractory lining monitoring system, emergency blackout, thermocouple, microprocessor, analog to the digital converter (ADC)

ливки металла при производстве высококачественных легированных сталей и чугуна, а также алюминия, меди и сплавов на их основе [1, 2]. Так, например, отсутствие промежуточных нагревательных элементов и интенсивная электродинамическая циркуляция расплава обеспечивают быстрое плавление мелкой шихты, выравнивание температуры в объёме ванны и получение многокомпонентных однородных сплавов заданного химического состава [3]. В то же время возможность

регулирования передаваемой в загрузку тепловой энергии позволяет создавать специализированные электротехнические комплексы [4, 5], обеспечивающие контроль режима работы используемого оборудования с целью получения требуемых параметров технологического процесса.

Одним из наиболее важных и ответственных элементов индукционных тигельных печей является огнеупорная футеровка тигля. При её изготовлении применяют различные материалы [6, 7], в основе выбора которых лежат вид выплавляемого металла и технологические особенности процесса плавки. В частности, материал тигля должен быть химически стойким по отношению к расплавляемому металлу и шлаку и сохранять электроизоляционные свойства во всём диапазоне рабочих температур [8, 9]. Кроме того, его конструкция должна обеспечивать достаточную механическую прочность в условиях воздействия большого гидростатического давления столба расплава и механических усилий при загрузке и осаживании шихты. В то же время, несмотря на многочисленные меры по предотвращению разрушения тигля, наличие термических, механических, эрозионных и химических воздействий обуславливает постепенный износ его внутренней поверхности [10, 11]. Неконтролируемое разрушение огнеупорной футеровки может стать причиной возникновения аварийной ситуации, опасной для оператора, что делает необходимым использование контрольно-измерительного оборудования и специальных средств защиты. При этом, помимо периодических методов обследования, заключающихся в визуальной проверке и ручном измерении диаметра тигля, рационально использование действующих непрерывно автоматизированных систем, основанных на фиксации отклонений технологических параметров печи при уменьшении остаточной толщины слоя футеровки. Однако традиционные методы идентификации уровня её износа, связанные с использованием подового электрода и индикацией тока утечки на землю, не обеспечивают постоянного отображения степени разрушения и дают возможность

регистрации только критического уровня, требующего аварийного выключения и опорожнения печи. Это обуславливает необходимость разработки новых технических решений и создания на их основе устройств, обеспечивающих возможность определения текущего состояния тигля, визуализации уровня его износа и в случае необходимости отключения печи от источника питания.

В основе разрабатываемой микропроцессорной системы контроля состояния футеровки лежит непрерывное измерение температуры в различных точках и сравнение полученных значений с теоретически рассчитанными. Чем выше температура в контрольной точке, тем тоньше остаточная толщина тигля в соответствующей области. Кроме того, дополнительной необязательной задачей может служить отображение текущих значений температур и осуществление записи в бортовой журнал.

Для реализации указанных требований система мониторинга должна состоять из одного или нескольких блоков измерения температуры и блока индикации. Поскольку уровень температур в футеровке достаточно высок, их измерение предполагается осуществлять посредством термоэлектрических датчиков в виде термопар, являющихся в данном случае концентраторами информации. При этом для устранения высокочастотных помех, излучаемых индуктором, целесообразно на входе измерительных каналов разместить фильтры низких частот. Многоканальные блоки измерения снимают данные с термопар и передают их по последовательному интерфейсу в блок индикации, который сравнивает температуры с уставками и отображает результаты на светодиодной матрице. Для каждой термопары необходимы несколько уставок по температуре, превышение которых будет приводить к зажиганию светодиода, соответствующего заданному уровню разрушения тигля. В то же время, если износ футеровки окажется критическим и появится опасность её прорыва до окончания плавки, в блоке индикации должно срабатывать реле, дающее команду на немедленное аварийное отключение печи от источника питания.

Упрощенная структурная схема системы контроля температуры показана на рис. 1. Сигналы термопар через коммутатор и усилитель поступают на вход АЦП. Микроконтроллер обрабатывает полученные данные и передаёт их по последовательному интерфейсу в блок индикации, контроллер которого сравнивает реальные температуры с уставками и в соответствии с результатами управляет светодиодной матрицей и аварийным реле. Для

исключения погрешности измерений, вызванных смещением нуля усилителя, его вход периодически подключается к точке нулевого потенциала 0 V. Микроконтроллер определяет усиленное смещение нуля и вычитает его из результатов измерений. Температура холодных спаев термопар измеряется при помощи полупроводникового датчика (например, LM335) и учитывается при вычислении температур горячих спаев.

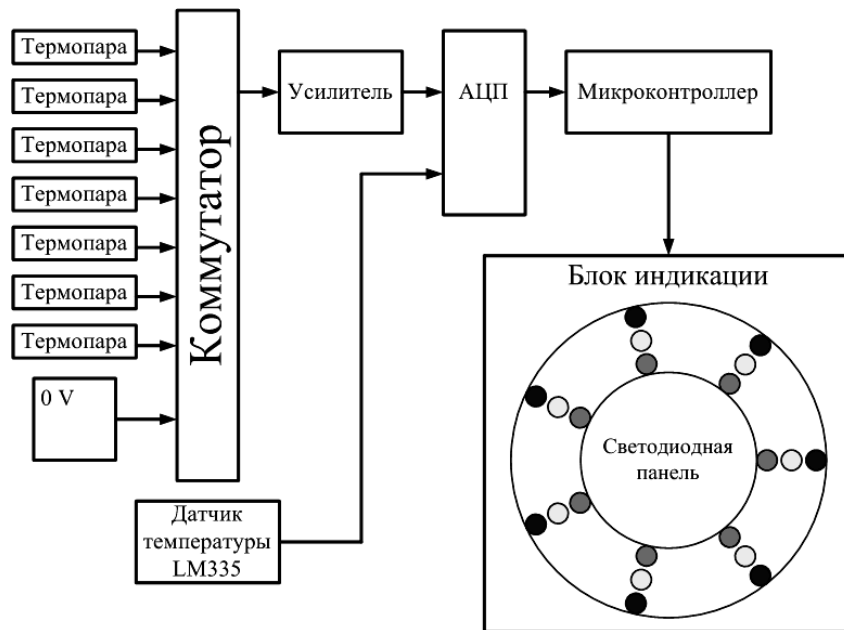


Рис. 1. Структура системы контроля температуры в футеровке печи

Модель установки (рис. 2), реализованная в программном комплексе Proteus, состоит из концентратора данных, построенного на микроконтроллере PIC16F688, и блока индикации на базе микроконтроллера PIC16F628A. Коммутация входов АЦП производится микросхемой типа 4051. В основе работы системы лежат семь измерительных термопар TC0...TC6. Температура холодных спаев измеряется микросхемой D24 и задаётся моделью термопары TC7. В схему заложен идеальный усилитель K1 и сумматор S1, на который подаётся напряжение, имитирующее смещение нуля усилителя.

Микроконтроллер U2 управляет аналоговым коммутатором U1 через выводы RA0, RA1, RA2. Установленный на них двоичный код задаёт номер выбранного

измерительного канала. При коде 111 коммутатор подключается к шине нулевого потенциала, что необходимо для измерения смещения нуля аналоговой части измерительного канала. Усиленный измерительный сигнал поступает на вывод AN7 микроконтроллера, сигнал датчика температуры холодных спаев — на вход AN6. Микроконтроллер циклически измеряет девять аналоговых сигналов (семь сигналов термопар, потенциал «нуля» и сигнал датчика температуры холодных спаев), обрабатывает результаты измерений и вычисляет температуры горячих спаев термопар. При этом для снижения случайной погрешности и подавления наводимых индуктором помех принято усреднение четырёх отсчётов по каждому каналу.

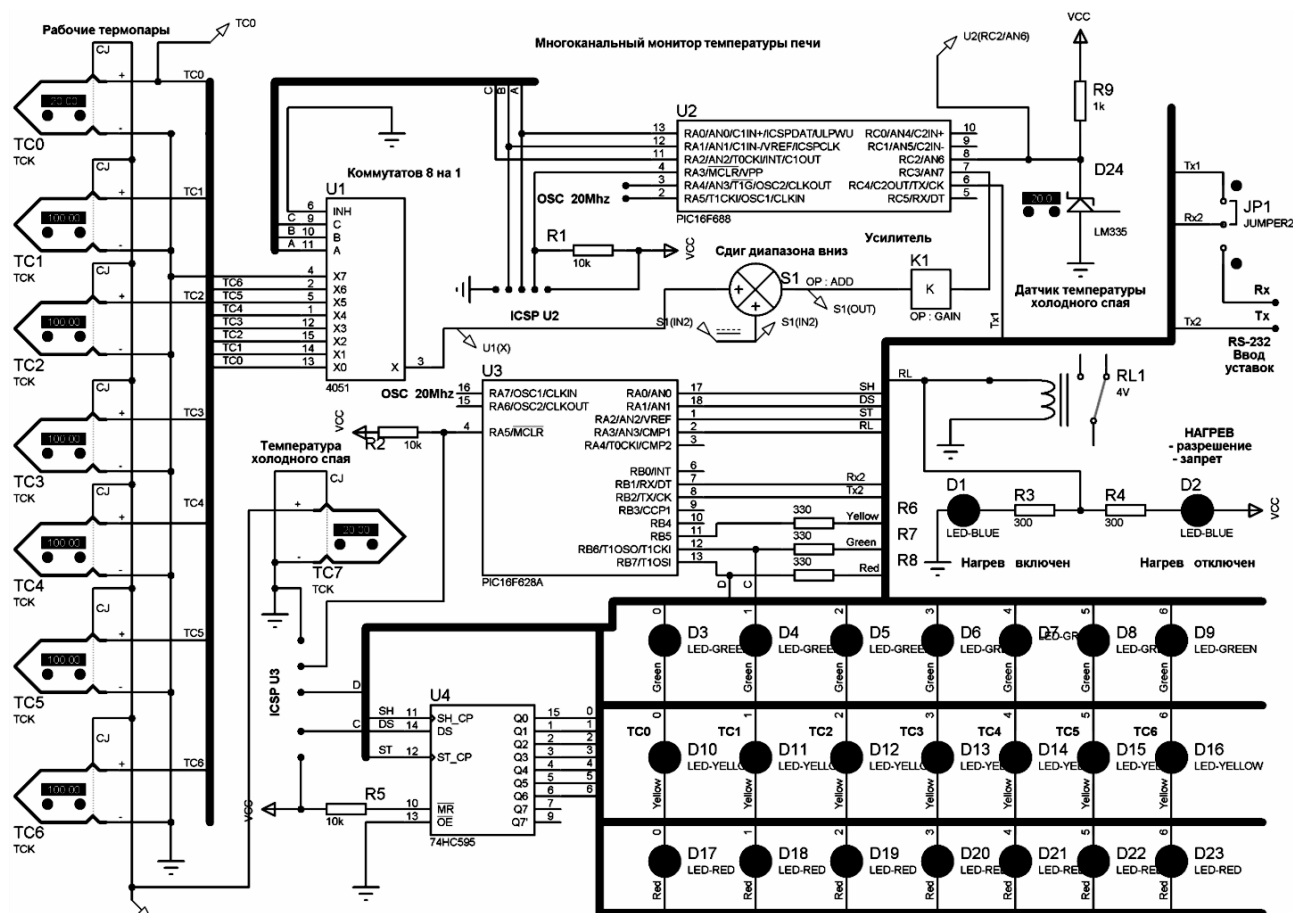


Рис. 2. Схема установки мониторинга температуры в футеровке печи

От контроллера U2, расположенного вблизи печи, информация по последовательному интерфейсу RS485 передается на удаленный блок индикации, построенный на микроконтроллере U3. Данные передаются в виде двухбайтовых пакетов, содержащих номер измерительного канала, температуру и служебные биты, позволяющие отличить первый байт пакета от второго. В рабочем режиме используется только одно направление передачи информации – от концентратора к блоку индикации. В режиме настройки концентратор имеет возможность двустороннего обмена информацией с ноутбуком, подключенным к нему через преобразователь RS-232/USB. Микроконтроллер U3 модуля индикации управляет светодиодами и аварийным реле на основании сравнения принятых по последовательному интерфейсу кодов с уставками. Для каждой точки наблюдения заданы четыре уставки. Первая соответствует температуре включения зеленого светодиода, вторая – желтого, третья – красного. Превы-

шение четвертой уставки ведет к срабатыванию реле немедленного аварийного отключения RL1.

Светодиодов в блоке индикации достаточно много, поэтому использована динамическая индикация. Матрица светодиодов разбита на семь столбцов и три строки. Номер столбца задается через сдвиговый регистр U4, а светящиеся в нем светодиоды выбирает контроллер U3 по выводам RB5, RB6, RB7. Токи светодиодов ограничены резисторами R6, R7, R8. На одном из выходов сдвигового регистра присутствует единица, а на остальных – ноль. Единица перемещается по регистру и поочередно выбирает столбцы матрицы индикации. В каждом столбце микроконтроллер может включить любое количество светодиодов от 0 до 3. Реле управляется через вывод RA3 микроконтроллера U3.

Математическая обработка данных в блоке индикации относительно проста – температуры сравниваются с уставками, и на осно-

ве полученных результатов принимается решение о включении и выключении светодиодов и аварийного реле. С этой целью для каждой контрольной точки печи создаётся структура, содержащая температуру в этой точке и значения четырёх уставок. Значительно более сложной является обработка данных в концентраторе, который должен исключать погрешности аналогового тракта, вычислять температуры горячих спаев термопар и готовить данные для передачи по последовательному интерфейсу.

Первой задачей обработки является коррекция погрешности измерения, вызванной неидеальностью источника, генерирующего опорное напряжение, значение которого в зависимости от выбора микросхемы стабилизатора питания может отличаться от заявленного в документации. Для расчёта измеряемого напряжения в вольтах необходимо умножить код АЦП на коэффициент H_1 , определяющий единицу младшего разряда (ЕМР):

$$H_1 = \text{ЕМР} = \frac{U_{r1}}{2^n - 1}, \quad (1)$$

где U_{r1} – предварительно измеренное реальное значение опорного напряжения, В; n – разрядность АЦП (в рассматриваемом случае $n = 10$).

Однако результат в вольтах придётся отображать с плавающей запятой, что сделает расчёты более медленными и увеличит требования к микроконтроллеру. В связи с этим напряжение предлагается выражать в милливольтках в диапазоне 0...5000 мВ, для которого достаточно 13 двоичных разрядов. В то же время как отмечалось ранее, перед математической обработкой контроллер накапливает сумму четырёх отсчётов по каждому каналу измерения. Это требует определения коэффициента H_2 , который используется при вычислении напряжения в милливольтках:

$$H_2 = \frac{U_{r1} \cdot 1000}{4 \cdot (2^n - 1)} = \frac{250 \cdot U_{r1}}{2^n - 1}. \quad (2)$$

Тогда сумма четырёх отсчётов, умноженная на H_2 , даст величину измеряемого

напряжения. Полученное значение H_2 необходимо представить в виде дроби H_3/H_4 , в которой для упрощения математической обработки требуется задать H_4 , в виде степени числа 2, что позволит при реализации в микроконтроллере свести деление к сдвигу двоичного числа вправо. При этом число H_3 должно быть целым и вычисляться для каждого контроллера индивидуально, в зависимости от величины реального опорного напряжения:

$$H_3 = H_2 \cdot H_4 = \frac{250 \cdot U_{r1} \cdot H_4}{2^n - 1}. \quad (3)$$

Следующая задача математической обработки заключается в определении температуры горячих спаев термопар. В основе их расчёта лежат данные, поступающие на АЦП с выхода усилителя, вход которого через коммутатор поочерёдно подключается к семи термопарам и общему проводу. Обработка результатов начинается после накопления суммы из четырёх отсчётов в каждой из ячеек $SCH0...SCH7$, соответствующих восьми измерительным каналам. Сначала коды АЦП пересчитываются в милливольты, и корректируется погрешность источника опорного напряжения. Далее следует устранить смещение нуля измерительного усилителя, для чего достаточно из чисел $SCH0...SCH6$ вычесть $SCH7$. Полученные значения необходимо пересчитать в напряжения термопар, посредством их деления на коэффициент усиления усилителя K_1 . Для этого требуется подобрать коэффициенты дроби H_5/H_6 таким образом, чтобы после умножения на них данных АЦП получить напряжение термопары:

$$U_t = \frac{SCHx}{K_1} = SCHx \cdot \frac{H_5}{H_6}, \quad (4)$$

где $SCHx$ – подводимые к входу АЦП напряжения семи измерительных каналов ($SCH0...SCH6$) с исключённым смещением нуля, мВ.

Измерение температуры холодных спаев термопары осуществляется посредством ввода внутрь корпуса концентратора датчика,

построенного на основе стандартной микросхемы LM335. Контроллер в ячейке SCH8 накапливает сумму четырёх отсчётов АЦП с кодами напряжения датчика температуры. Для определения её значений в градусах Кельвина необходимо пересчитать коды АЦП в напряжение в милливольтках U_{tc} с учётом реальной величины опорного напряжения и поделить полученный результат на 10. Для реализации указанных действий в микроконтроллере необходимо подобрать дробь H_7/H_8 , значение которой должно быть как можно ближе к 0,1, а коэффициент H_8 представлен в виде степени числа 2:

$$U_{tc} = SCH8 \cdot \frac{H_3}{H_4} \cdot \frac{H_7}{H_8} = SCH8 \cdot \frac{H_9}{H_{10}}. \quad (5)$$

Таким образом, напряжение U_{ts} термопары с учётом реальной температуры холодного спая определится из выражения

$$U_{ts} = U_t + U_{tc}. \quad (6)$$

Полученное значение пересчитывается по градуировке термопары в температуру рабочего спая в градусах Кельвина. При этом для исключения неадекватного поведения системы необходимо отслеживать особый случай, когда измеряемая температура ниже температуры холодного спая. В этом случае полученный результат следует заменить нижней границей диапазона измерений. Поскольку возникающая при этом погрешность относится к температурам, по которым индикатор не принимает никаких решений, его можно пренебречь.

Таким образом, для определения температуры горячих спаев термопар необходимы две функции. Первая функция вычисляет напряжение термопары по температуре, диапазон которой соответствует приблизительно возможному уровню температур в рабочем помещении:

$$U_{tp2}(T_k) = T_k \cdot \frac{H_{11}}{H_{12}} + H_{13}. \quad (7)$$

Здесь U_{tp2} – напряжение, мкВ; T_k – температура, К; H_{11} и H_{12} – целые двухбайтовые числа, определяемые по градуировочной характеристике термопары; H_{13} – целое

двухбайтовое число, представленное в виде степени числа 2.

Вторая функция должна вычислять температуру T_2 горячего спая по напряжению U в рабочем диапазоне термопары. Тогда при линейной аппроксимации одним отрезком получим

$$T_2(U) = U \cdot \frac{H_{14}}{H_{15}} + H_{16}, \quad (8)$$

где H_{14} , H_{15} и H_{16} – целые двухбайтовые числа, определяемые с учётом градуировочной характеристики и требований реализации математической обработки в микроконтроллере.

Среди множества возможных реализаций протоколов передачи данных от концентратора к индикатору выбран тот, где используются двухбайтовые пакеты данных. Каждой термопаре соответствует свой пакет, несущий информацию о её номере и температуре. Семи термопарам соответствуют номера от 0 до 6, номер 7 означает служебный пакет данных, в котором имеются код концентратора и биты самодиагностики. В системе с одним концентратором его номер игнорируется, а в многоконцентраторных – используется при объединении данных от различных источников в единый массив. Байты непрерывно поступают в приёмник, который должен выделять и обрабатывать двухбайтовые блоки. При этом в каждом байте выделяется один бит, используемый для определения номера байта в блоке данных и контроля байтов по чётности и нечётности. Приёмник ищет в потоке входных байтов тот, у которого число единиц чётное, и помещает его в буфер первого байта блока. Следующий байт помещается в буфер второго байта блока. Если число единиц во втором байте нечётное, то блок передаётся задаче расшифровки. Если чётное, то фиксируется ошибка протокола и возобновляется поиск первого байта блока. Из принятого двухбайтового блока выделяются номер термопары и температура в градусах Кельвина. Эта информация передаётся задаче обработки температур. Данная задача заполняет матрицу температур, сравнивает числа в ней с уставками и заполняет

буфер индикации. Задача индикации вынимает данные из буфера и управляет состоянием светодиодов и аварийного реле.

В соответствии с представленными алгоритмами были написаны программы для микропроцессоров, выполнена их компиляция и пошаговая проверка в программной среде MPLab с использованием отладчика MPLAB-Sim. Уставки по температуре (таблица) рассчитывались в семи контрольных точках индукционной тигельной сталеплавильной печи (рис. 3) с номинальной массой загрузки 400 кг. Расчёт выполнялся в программном комплексе COMSOL Multiphysics на двумерной осесимметричной модели в стационарном режиме при учёте температурной зависимости теплопроводности материалов слоёв и теплоотдачи в окружающую среду [12]. При решении за-

дачи анализировалось распределение температурного поля на границе слоёв подины, выполненной из шамотного кирпича, и основания тигля из кислой набивной массы на основе кварцита в исходном состоянии и при различном уровне его износа (рис. 4). Настройка блока индикации осуществлялась таким образом, что свечение зелёных светодиодов соответствует износу футеровки в пределах 5...10%, жёлтых – 10...20%, красных – 20...30%. При достижении последней уставки блок индикации через реле RL1 даёт команду на отключение оборудования от источника питания, что сопровождается миганием столбца светодиодов, связанных с термпарой, по сигналу которой прошла команда на прекращение нагрева.

Значения уставок по температуре, используемые при настройке блока индикации

Толщина основания тигля b_1 , м	Степень разрушения, %	Температура, К			
		Контрольные точки T_1 и T_7	Контрольные точки T_2 и T_6	Контрольные точки T_3 и T_5	Контрольная точка T_4
0,15	0	471	658	800	847
0,1425	5	480	678	827	876
0,135	10	491	701	857	908
0,12	20	515	750	922	975
0,105	30	541	806	994	1049

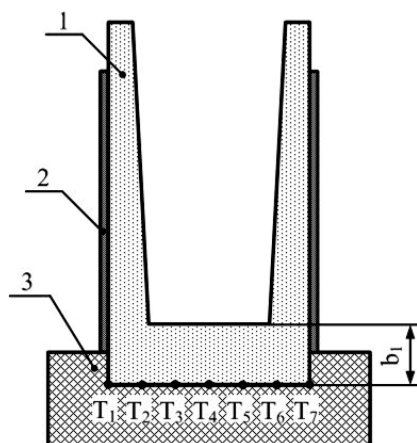


Рис. 3. Эскиз огнеупорной футеровки индукционной тигельной сталеплавильной печи: 1 – тигель; 2 – асбестовый теплоизолирующий слой; 3 – подина

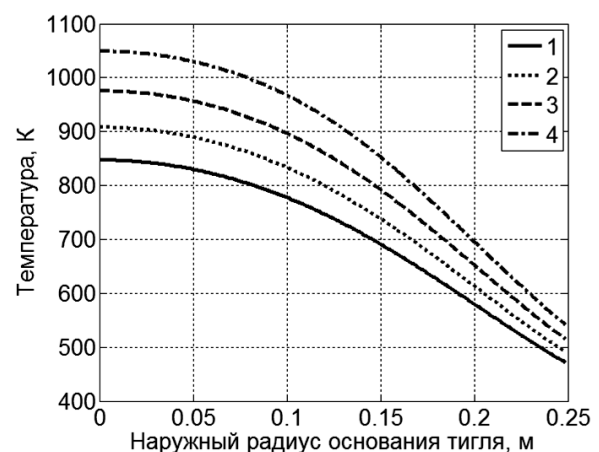


Рис. 4. Распределение температуры вдоль границы слоёв подины и основания тигля индукционной печи: 1 – исходная толщина основания тигля; 2 – разрушение 10%; 3 – разрушение 20%; 4 – разрушение 30%

При реализации модели концентратора принято отличное от номинального значение опорного напряжения $U_{r1} = 5,103$ В, для которого определены параметры $H_3 = 40864$ и $H_4 = 2^{15} = 32768$. Для задания коэффициента усиления усилителя K_1 , равного 100, принято $H_5 = 328$ и $H_6 = 2^{15} = 32768$. В основу математической обработки данных микросхемы LM335 положены коэффициенты $H_7 = 3277$ и $H_8 = 2^{15} = 32768$. В каче-

стве рабочих элементов разрабатываемой системы мониторинга приняты термопары типа К (хромель-алюмель). Аппроксимация их внешней характеристики выполнена одним линейным отрезком на основе коэффициентов $H_{11} = 41162$, $H_{12} = 2^{10} = 1024$, $H_{13} = -10980$ и $H_{14} = 805$, $H_{15} = 2^{15} = 32768$, $H_{16} = 268$, обеспечивающих приемлемую точность во всем диапазоне температур (рис. 5, 6).

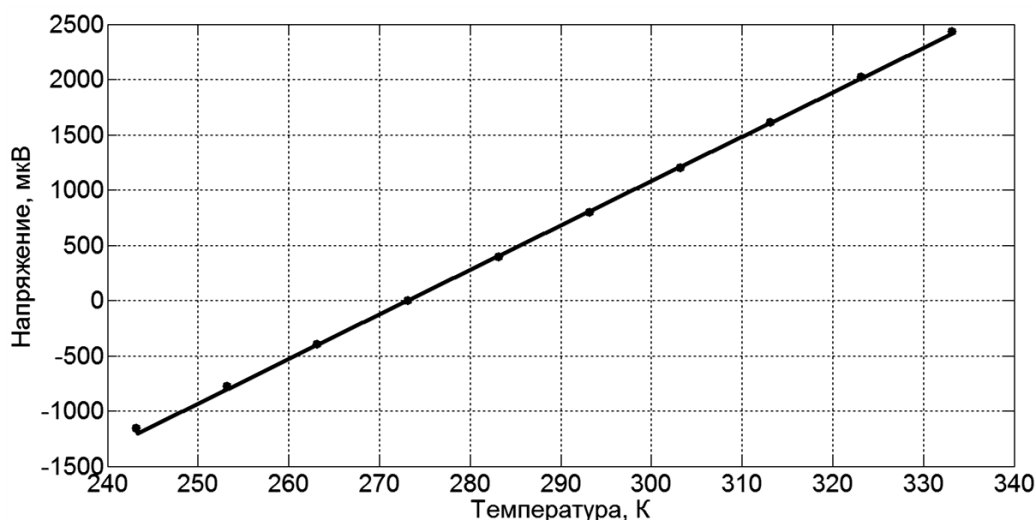


Рис. 5. Функция расчёта напряжения термопары по температуре

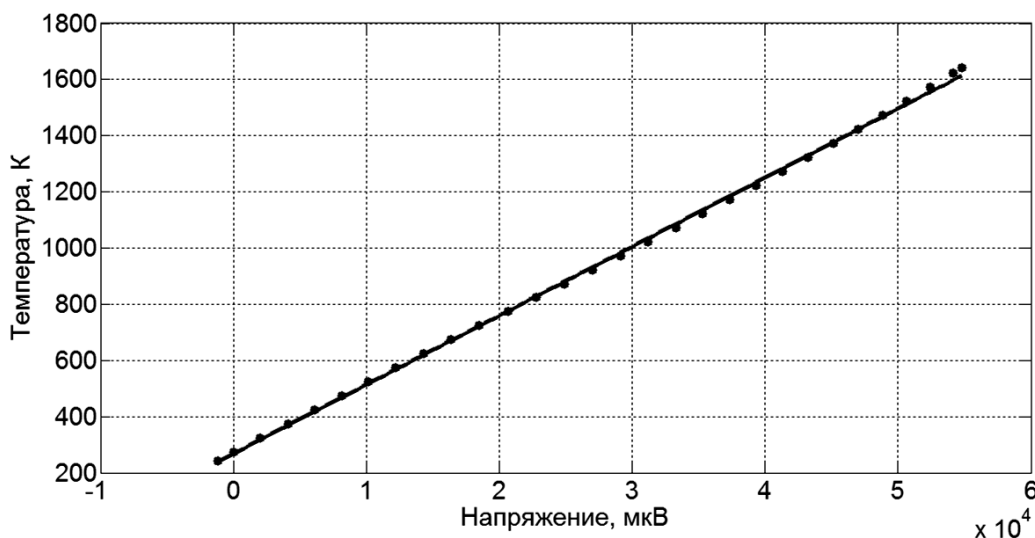


Рис. 6. Функция расчёта температуры горячего спая по напряжению термопары

Выполненная проверка функционирования аппаратно-программного комплекса в среде симуляции Proteus показала эффективность предложенной микропроцессорной схемы многоканального монитора с одним концентратором, что делает возмож-

ной практическую реализацию устройства на её основе. Достигаемый при этом технический результат заключается в повышении безопасности эксплуатации индукционных печей и продлении срока службы плавильного тигля за счёт непрерывного контроля

текущего состояния и отображения места и степени его износа на основании оценки превышения температуры контролируемых точек над допустимой. Тем самым обеспе-

чивается возможность осуществления своевременного ремонта огнеупорной футеровки а в случае необходимости – аварийное отключение питания установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомин Н.И.** Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. М.: Металлургия, 1979. 247 с.
2. **Кукарцев В.А.** Выплавка чугуна и стали в индукционных тигельных печах промышленной частоты / В.А. Кукарцев // Сталь. 2016. № 5. С. 26-28.
3. Теоретические основы и аспекты электротехнологий. Физические принципы и реализация. Интенсивный курс. Основы I. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 359 с.
4. **Кувалдин А.Б.** Особенности расчёта и управления индукционными плавильными тигельными печами и миксерами / А.Б. Кувалдин, М.Я. Погребиский, М.А. Федин // Электротехнология в первом десятилетии XXI века: сб. докладов науч.-техн. семинара, посвящённого 100-летию профессора М.Я. Смелянского. М.: ИД МЭИ, 2013. С. 227-241.
5. **Костюкова А.П.** Информационное обеспечение мониторинга процесса плавки в индукционных тигельных печах / А.П. Костюкова // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 6. С. 96-100.
6. Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий и др.; под ред. А.Е. Слу-
- хоцкого. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. 328 с.
7. **Сойфер В.М.** Выплавка стали в кислых электропечах / В.М. Сойфер. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
8. **Егоров А.В.** Электрические печи (для плавки сталей) / А.В. Егоров, А.Ф. Моржин. М.: Металлургия, 1975. 352 с.
9. **Сасса В.С.** Футеровка индукционных электропечей / В.С. Сасса. М.: Металлургия, 1989. 232 с.
10. Оптимизация и управление электротехнологическими системами. Интенсивный курс. Специализация III. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 266 с.
11. **Кукарцев В.А.** Причины разрушения кварцевой футеровки при эксплуатации индукционной тигельной печи и способы их предотвращения / В.А. Кукарцев // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 9. С. 7-9.
12. **Долгих И.Ю.** Разработка системы контроля состояния огнеупорной футеровки индукционной тигельной сталеплавильной печи / И.Ю. Долгих, М.Г. Марков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). 2019. Вып. 5. С. 58-66.

Долгих Иван Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина

Марков Михаил Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина

Ivan Yu. Dolgikh – Ph.D., Associate Professor, Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering and Electric Technologies, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin

Mikhail G. Markov – Ph.D., Associate Professor, Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering and Electric Technologies, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333:621.372.632

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭКОНОМИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Д.И. Попов

DETERMINATION OF THE COST-TO-PERFORMANCE RATIO OF ELECTRICAL SYSTEMS IN TESTING INDUCTION MOTORS BY THE LOADING-BACK METHOD

D.I. Popov

Обоснована актуальность вопроса оценки энергетической эффективности электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Введены понятия коэффициентов затрат и экономичности. Произведена оценка возможных значений коэффициента экономичности для широкого диапазона номинальных мощностей. Полученные значения коэффициента экономичности могут быть использованы при предварительном расчете параметров электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки.

Ключевые слова: коэффициент экономичности, испытания, асинхронные двигатели, взаимная нагрузка, энергоэффективность

Асинхронные двигатели как малой, так и большой мощности в течение жизненного цикла подвергаются испытаниям (приемочным, приемсдаточным и др.), наиболее энергозатратным видом которых являются испытания под нагрузкой. С целью экономии электроэнергии при проведении нагрузочных испытаний разработан ряд схем, позволяющих осуществить метод взаимной нагрузки асинхронных машин, обеспечи-

The article provides rationale for assessment of energy efficiency of electrical systems used in testing induction motors by the loading-back method. The concepts of input coefficient and cost-to-performance ratio are introduced. The possible values of the cost-to-performance ratio are estimated for a range of rated power capacity. The obtained cost-to-performance values can be used in sample calculations of parameters of electrical systems used in testing induction motors by the loading-back method.

Keywords: cost-to-performance ratio, testing, induction motor, loading-back method, energy efficiency

вающий использование электроэнергии, вырабатываемой нагрузочной машиной, для питания испытуемого двигателя [1-7].

Научные исследования, проводимые в данном направлении в настоящее время, направлены на разработку принципов проектирования испытательных комплексов, в основу которых заложен метод испытания асинхронных двигателей путем их взаимной нагрузки. Процесс проектирования

электротехнического комплекса неразрывно связан с выполнением оценки экономической эффективности его внедрения, которая в большой степени определяется его энергетической эффективностью [8]. Показатель энергетической эффективности, пригодный для применения проектировщиком, должен иметь понятный физический смысл и быть пригодным для численной оценки преимущества внедрения энергоэффективного оборудования по сравнению с аналогичными образцами техники.

Введем понятие коэффициента затрат испытательного комплекса, значение которого отражает долю электроэнергии, потребляемой из сети, по отношению к электроэнергии, потребляемой испытуемым двигателем:

$$K_{затр} = \frac{P_c}{P_1}, \quad (1)$$

где P_c – мощность, потребляемая испытательным комплексом из сети; P_1 – мощность, потребляемая испытуемым двигателем.

Физический смысл коэффициента затрат – отношение электроэнергии, необходимой для испытания асинхронного двигателя методом взаимной нагрузки, к электроэнергии, необходимой для испытания асинхронного двигателя методом, не использующим возврата мощности, генерируемой нагрузочной машиной, для питания испытуемого двигателя. Чем ближе коэффициент затрат к значению $K_{затр} = 1$, тем меньшую энергетическую эффективность будет иметь испытательный комплекс, работающий по методу взаимной нагрузки.

Введем также понятие коэффициента экономичности испытательного комплекса, работающего по методу взаимной нагрузки (далее – коэффициент экономичности $K_э$), позволяющего оценить разность между затрачиваемой на испытания электроэнергии с применением метода взаимной нагрузки и без него:

$$K_э = \frac{P_1 - P_c}{P_1}. \quad (2)$$

Данный параметр связан с величиной коэффициента затрат выражением

$$K_э = 1 - K_{затр}. \quad (3)$$

Чем ближе коэффициент экономичности к значению $K_э = 1$, тем большей энергетической эффективностью будет обладать испытательный комплекс, работающий по методу взаимной нагрузки. Физический смысл коэффициента затрат – это доля сэкономленной электроэнергии за счет применения метода взаимной нагрузки.

Для определения введенных коэффициентов необходимо определить состав мощности, потребляемой при испытаниях из сети.

Пара электрических машин, работающих по методу взаимной нагрузки, потребляет из электрической сети мощность, равную их суммарным потерям. Следовательно, электротехнический комплекс для испытания электрических машин по методу взаимной нагрузки будет потреблять из сети мощность, равную потерям во всех машинах и аппаратах, входящих в его состав [1, 2]. При этом следует учитывать, что различные схемы взаимной нагрузки имеют различный состав оборудования. Запишем выражение для мощности, потребляемой из сети испытательным комплексом, составленным по любой из двух схем, приведенных на рис. 1 и 2 [6, 7]:

$$P_c = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{инв1} + \Delta P_{инв2} + \Delta P_{вып}, \quad (4)$$

где ΔP_1 – потери мощности в испытуемом двигателе; ΔP_2 – потери мощности в нагрузочной машине; $\Delta P_{инв1}$ – потери мощности в инверторе, питающем испытуемый двигатель; $\Delta P_{инв2}$ – потери мощности в инверторе, питающем нагрузочную машину; $\Delta P_{вып}$ – полные потери мощности в двух параллельно включенных выпрямителях при схеме по рис. 1 [6] или в одном выпрямителе при схеме по рис. 2 [7].

Суммарные потери мощности в двух машинах могут быть найдены в виде разности мощности, потребляемой двигателем и вырабатываемой нагрузочной машиной:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = P_1 - P_2, \quad (5)$$

где P_2 – мощность, вырабатываемая нагрузочной машиной.

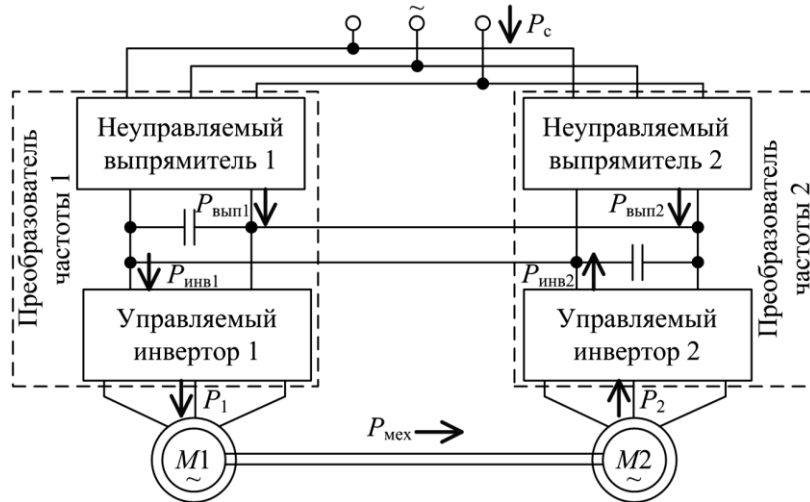


Рис. 1. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с двумя параллельно включенными неуправляемыми выпрямителями

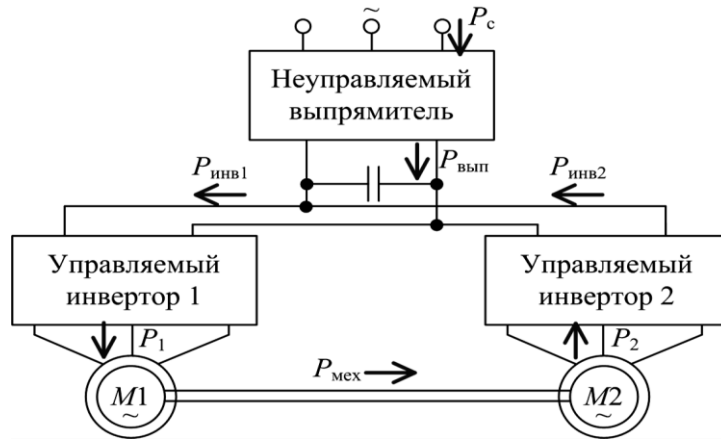


Рис. 2. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с одним неуправляемым выпрямителем

Мощность, вырабатываемая нагрузочной машиной:

$$P_2 = P_{\text{мех}} \eta_2 = P_1 \eta_1 \eta_2, \quad (6)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность, передаваемая по валу; η_1 – коэффициент полезно-

го действия испытуемого двигателя; η_2 – коэффициент полезного действия нагрузочной машины.

После подстановок коэффициент затрат может быть записан в виде

$$K_{\text{затр}} = \frac{P_1 - P_1 \eta_1 \eta_2 + \Delta P_{\text{инв}1} + \Delta P_{\text{инв}2} + \Delta P_{\text{вып}}}{P_1} = 1 - \eta_1 \eta_2 + \frac{\Delta P_{\text{инв}1}}{P_1} + \frac{\Delta P_{\text{инв}2}}{P_1} + \frac{\Delta P_{\text{вып}}}{P_1}. \quad (7)$$

Коэффициент полезного действия инвертора, питающего испытуемый двигатель в рассматриваемых схемах:

$$\eta_{\text{инв}1} = \frac{P_1}{P_1 + \Delta P_{\text{инв}1}}, \quad (8)$$

отсюда можно записать

$$\frac{\Delta P_{\text{инв}1}}{P_1} = \frac{1}{\eta_{\text{инв}1}} - 1. \quad (9)$$

Коэффициент полезного действия инвертора, питающего нагрузочную машину в рассматриваемых схемах:

$$\eta_{инв2} = \frac{P_2 + \Delta P_{инв2}}{P_2}, \quad (10)$$

тогда справедливо равенство

$$\frac{\Delta P_{инв2}}{P_1} = \eta_1 \eta_2 (1 - \eta_{инв2}). \quad (11)$$

Общий коэффициент полезного действия выпрямителей можно найти из выражения

$$\eta_{вып} = \frac{P_{вып}}{P_{вып} + \Delta P_{вып}}. \quad (12)$$

Тогда потери в выпрямителях могут быть выражены через их суммарную мощность и КПД следующим образом:

$$\Delta P_{вып} = P_{вып} \left(\frac{1}{\eta_{вып}} - 1 \right). \quad (13)$$

Суммарная мощность выпрямителей (в случае двух параллельно включенных выпрямителей $P_{вып} = P_{вып1} + P_{вып2}$, см. рис. 2) может быть определена как разность мощности потребляемой испытательным комплексом из сети и суммарных потерь в выпрямителях:

$$P_{вып} = P_1 - P_1 \eta_1 \eta_2 + \Delta P_{инв1} + \Delta P_{инв2}. \quad (14)$$

Подставив (14) в (13) и разделив на P_1 получим:

$$\frac{\Delta P_{вып}}{P_1} = \left(\frac{1}{\eta_{вып1}} - \eta_1 \eta_2 \eta_{инв2} \right) \left(\frac{1}{\eta_{вып}} - 1 \right). \quad (15)$$

После подстановок (9), (11) и (15) в (7) получим

$$K_{затр} = \eta_{вып}^{-1} \left(\eta_{инв1}^{-1} - \eta_1 \eta_2 \eta_{инв2} \right). \quad (16)$$

Тогда коэффициент экономичности

$$K_э = 1 - \eta_{вып}^{-1} \left(\eta_{инв}^{-1} - \eta_1 \eta_2 \eta_{инв2} \right). \quad (17)$$

Полученные выражения (16) и (17) для определения коэффициентов затрат и экономичности позволяют рассчитать их значения исходя из КПД всех устройств, входящих в состав испытательного комплекса.

Для расчета по выражению (17) возможных значений коэффициента экономичности для номинального режима нагрузки примем значения КПД электрических машин из справочной литературы [9]. В зависимости от серии (4А, АИР, 5А, 6А), числа пар полюсов и других параметров асинхронные машины при одинаковых значениях номинальной мощности имеют различные значения номинального КПД. Верхняя и нижняя границы диапазона значений номинального КПД серийных асинхронных двигателей, принятые в расчете, представлены на рис. 3.

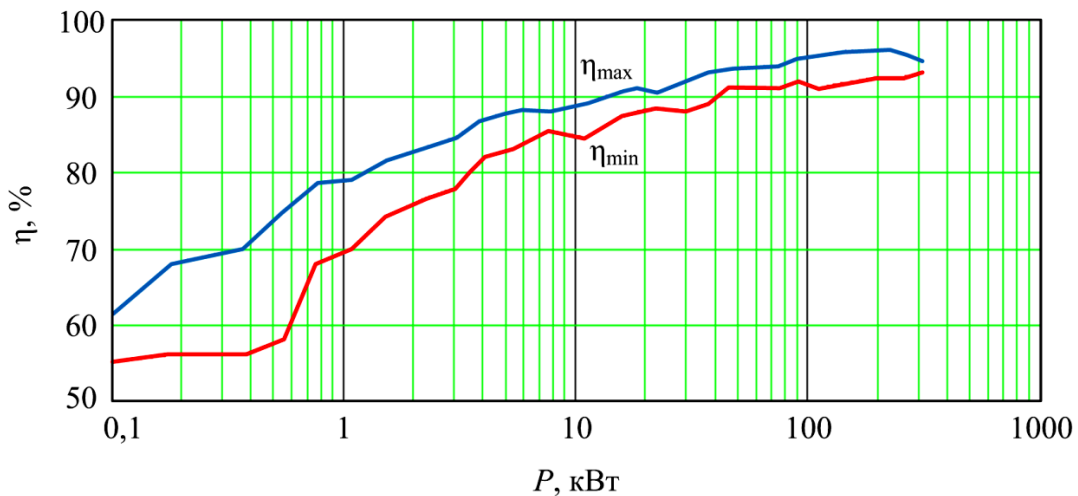


Рис. 3. Значения КПД выпрямителя и инверторов, принятые в расчете коэффициента экономичности

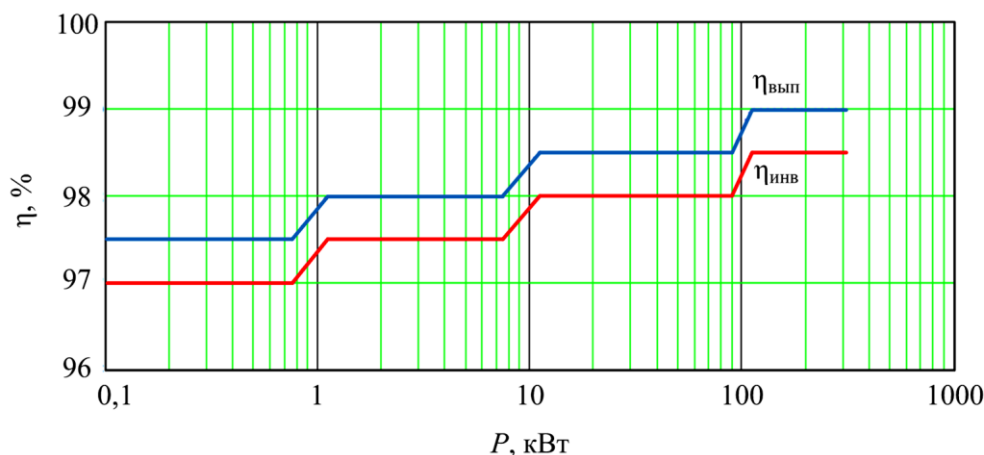


Рис. 4. Значения КПД выпрямителей и инверторов, принятые в расчете коэффициента экономичности

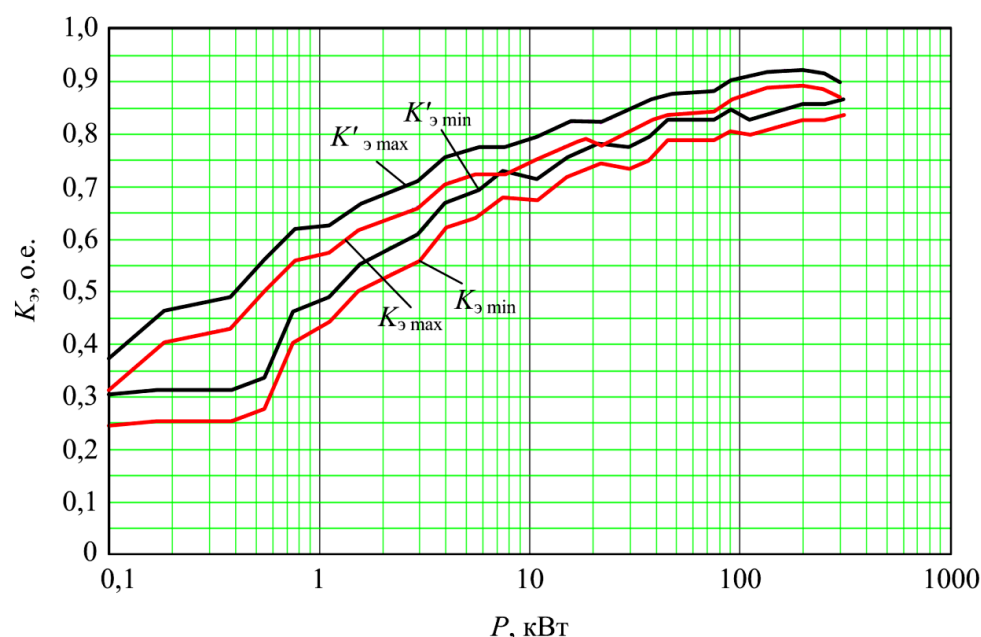


Рис. 5. Зависимости коэффициентов затрат и экономичности от номинальной мощности испытуемого двигателя

Значения КПД испытуемого двигателя и нагрузочной машины будем полагать равными друг другу (т.е. $\eta_1 = \eta_2$).

Исходя из экспериментальных данных, полученных на испытательной установке для машин номинальной мощностью $P_1 = 0,75$ кВт, и оценок из общедоступных литературных источников приближенно приняты значения номинальных КПД выпрямителей и инверторов [1, 10]. Принятые для расчета зависимости приведены на рис. 4.

Расчетный диапазон значений коэффициента экономичности (K_3) для приведенных диапазонов значений номинальных

КПД асинхронных двигателей приведен на рис. 5.

Для оценки влияния потерь в полупроводниковых преобразователях, входящих в состав испытательного комплекса, произведен расчет диапазона изменения коэффициента экономичности при значениях $\eta_{инв1} = \eta_{инв2} = \eta_{вып} = 1$. Полученные диапазоны значений коэффициента экономичности (K'_3) приведены на рис. 5.

Выражение для расчета коэффициента экономичности без учета потерь в преобразователях частоты принимает вид

$$K'_3 = \eta_1 \eta_2. \quad (18)$$

При расчете коэффициентов затрат и экономичности для испытательных комплексов, имеющих только один инвертор [3, 5], необходимо значения КПД отсутствующих преобразователей в выражениях (16) и (17) приравнять единице.

Выводы: 1) введены понятия коэффициентов затрат и экономичности для электротехнических комплексов, предназначенных для нагрузочных испытаний асинхронных

двигателей методом взаимной нагрузки; 2) произведена оценка влияния потерь в преобразователях частоты на коэффициент экономичности; 3) полученные диапазоны значений коэффициента экономичности в зависимости от номинальной мощности испытуемого двигателя могут быть использованы при предварительном расчете параметров электротехнических комплексов для испытания асинхронных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Харламов В.В.** Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов / В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. 160 с.

2. **Попов Д.И.** Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д.И. Попов. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. 175 с.

3. Пат. 178716 РФ. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В.В. Харламов, Д.И. Попов. Оpubл. 17.04.2018. Бюл. № 11.

4. **Харламов В.В.** Универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока / В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов / Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 58-66.

5. Пат. 143348 РФ. Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Оpubл. 20.07.2014. Бюл. № 20.

6. Пат. 140678 РФ. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Оpubл. 20.05.2014. Бюл. № 14.

7. Пат. 145998 РФ. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Оpubл. 27.09.2014. Бюл. № 27.

8. Актуальные направления исследований метода взаимной нагрузки при испытаниях асинхронных тяговых электродвигателей / В.Д. Авилов, В.Т. Данковцев, Д.И. Попов, А.В. Литвинов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. С. 199-203.

9. **Кацман М.М.** Справочник по электрическим машинам / М. М. Кацман. М.: Академия, 2005. 480 с.

10. Физическая модель испытательной станции асинхронных тяговых двигателей с использованием метода взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, В.Т. Данковцев, Д.И. Попов и др. // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч.-практ. конф. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. С. 69-73.

Попов Денис Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения

Denis I. Popov – Ph.D., Associate Professor, Department of Electrical Machines and General Electrical Engineering, Omsk State Transport University

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 629.067.8 : 621.315.1

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛЭП

Б.К. Сивяков

MATHEMATICAL MODELS FOR ANALYTICAL CALCULATION OF MAGNETIC AND ELECTRIC FIELDS OF HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES

B.K. Sivyakov

Приведены аналитические математические модели, позволяющие осуществлять анализ магнитного и электрического полей промышленных высоковольтных воздушных линий в окружающем пространстве для принятия последующих решений в области обнаружения ЛЭП летательными аппаратами и оценки электромагнитного загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: магнитное и электрическое поля, высоковольтные линии электропередачи промышленной частоты, безопасность полетов, электромагнитное загрязнение окружающей среды

Введение

Высоковольтные воздушные линии электропередач (ЛЭП) получили в мире широкое распространение из-за дешевизны и простоты. Однако они, особенно их провода, являются источником опасности для летательных объектов и источником загрязнения окружающей среды своими полями, оказывающими нежелательное воздействие на человека и чувствительные к ним технические объекты, мешая их нормальной работе.

В связи с этим возникает задача создания достаточно простых аналитических математических моделей квазистатических

The article presents analytical mathematical models required in the analysis of magnetic and electric fields of industrial high-voltage transmission lines in the surrounding space. The models enable the subsequent decisions important in the detection of high-voltage transmission lines using flight vehicles, and allow for estimation of electromagnetic pollution of the environment.

Keywords: magnetic and electric fields, high-voltage power lines of industrial frequency, flight safety, electromagnetic pollution of the environment

(50 Гц в России или 60 Гц в США) магнитного и электрического полей высоковольтных воздушных линий (ВЛ) электропередач в окружающем их пространстве, позволяющих осуществлять оценки интенсивности полей для принятия последующих решений по возможности обнаружения ВЛ летательными аппаратами [1] и расчета уровней электромагнитного загрязнения окружающей среды [2].

Магнитное и электрическое поля вдали от ВЛ

Для решения поставленной задачи в работах [3, 4] были получены формулы, поз-

воляющие определить индукцию магнитного и напряженность электрического поля на удаленном расстоянии, превышающем в десятки раз максимальное расстояние меж-

ду проводами трехфазной ВЛ (практически от 100 м и далее).

Индукция магнитного поля вычисляется по следующей формуле:

$$B[\text{нТл}] = 1,26 \cdot 10^3 \frac{I}{2\pi R^2} \times \left[\sqrt{(d_1 - d_2)^2 + (d_1 - d_3)^2} - (d_1 - d_2)(d_1 - d_3) + \frac{1}{2R} \sqrt{(h_0 - h_2)^4 + (h_0 - h_3)^4} \right], \quad (1)$$

где I – ток, А; R – расстояние от ближнего провода до точки наблюдения индукции магнитного поля; d_1 , d_2 и d_3 – горизонтальные координаты проводов трехфазной линии, м; h_0 – высота точки наблюдения над землей, h_1 , h_2 и h_3 – расстояние от земли до первого, второго и третьего проводов линии, м.

Напряженность электрического поля:

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 R^3} \left[q_{01}(h_0 + h_1)^2 + q_{02}(h_2^2 + 2h_0 h_2) + q_{03}(h_3^2 + 2h_0 h_3) + \right. \\ \left. + 3 \left[q_{02}(h_2^2 + 2h_0 h_2) - q_{03}(h_3^2 + 2h_0 h_3) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где q_{0n} ($n = 1, 2, 3$) – погонные заряды проводов ($q/\text{м}$).

Погонные заряды $\dot{q}_{0n}$ при известных напряжениях на проводах трёхфазной линии погонные заряды проводов равны: $\dot{q}_{0n} = C_{0n}\dot{\Phi}_n = C_{0n}\dot{U}_n$, где C_{0n} – погонная рабочая ёмкость провода, Ф; $\dot{U}_n = \dot{\Phi}_n - 0$ – напряжение провода относительно земли, В.

В свою очередь, погонная рабочая ёмкость провода трёхфазной линии из трёх проводов равна $C_{0n} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2hd}{R_{\text{пл}} D}}$, где $R_{\text{пл}}$ –

радиус провода, м; $h = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}$ – среднее геометрическое от высот подвеса проводов относительно земли; $D = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами и зеркальными изображениями соседних проводов относительно земли; $d = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$ – среднее геометрическое расстояние между соседними проводами. Последние формулы для $\dot{q}_{0n}$ и C_{0n} известны из теоретической электротехники.

Как следует из приведенной формулы, для напряженности электрического поля, оно убывает на удалении быстрее магнит-

ного и не зависит от горизонтальных координат подвеса проводов. В данном случае земля играет экранирующую роль, поэтому чем ближе к земле точка наблюдения и высота проводов, тем меньше поле.

Электрическое поле в отличие от магнитного убывает обратно пропорционально кубу расстояния до точки наблюдения. Характерной особенностью электрического поля ВЛ, отличающей его от естественного поля в большинстве мест на Земле, где присутствует вертикальное электрическое поле напряженностью до 100 В/м, является то, что оно имеет строго фиксированную частоту ($f = 50 \pm 0,2$ Гц в России) и направление вектора напряженности поля на провода ВЛ.

Экспериментом подтверждена адекватность этих формул на расстояниях свыше 100 м от проекции ближнего провода на землю и высотах точки наблюдения от поверхности земли до двух высот верхнего провода ВЛ [3, 4].

Формулы были получены с использованием закона полного тока и теоремы Гаусса при следующих допущениях: граница раздела воздух – земля при расчете магнитного поля не учитывалась, поскольку у них практически одинаковые магнитные проницаемости, а при расчете электрического поля – считалась идеальным проводником,

и использовался метод зеркальных изображений; поскольку точка наблюдения находится далеко от ВЛ применялась линеаризация уравнений по малому параметру – отношению расстояния между проводами к расстоянию до точки наблюдения, а напряженности полей от отдельных проводов считались коллинеарными векторами.

В результате на основании полученных приближенных выражений для полей были установлены аналитические закономерности их убывания с расстоянием.

Результаты расчета по формулам и эксперимента представлены на рис. 1 и в таблице. Измерения проводились для ВЛ с высоковольтными опорами типа ПБ 2т у села Сторожевка Саратовской области РФ, марка провода – АС 400/51, напряжение ВЛ $U = 500$ кВ, ток в линии $I = 327$ А.

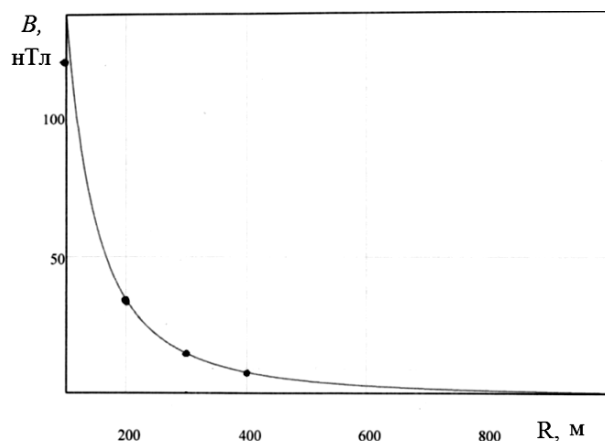


Рис. 1. Сравнение результатов расчета и эксперимента. Экспериментальные значения нанесены точками. $h_0 = 1,5$ м, точки – эксперимент

Напряженность электрического поля

Тип ВЛ	500 кВ, $h_0 = 1,15$ м.	
Расстояние R, м	E, В/м	Эксперимент E, В/м
100	49,6	49
200	6.2	4
300	1.8	1

Приведенные экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с теоретическими. Следует также отметить, что в связи с малой высотой от земли, на

которой осуществлялись измерения (она определялась ростом человека, в руках которого был прибор), величина электрического поля меньше, чем на высоте верхнего провода ВЛ, который представляет наибольшую опасность для летательных аппаратов. Приведенные данные свидетельствуют об адекватности приведенных выше формул для вычисления полей на расстояниях от 100 м и далее и высот наблюдения от поверхности земли до удвоенной высоты верхнего силового провода.

Магнитное и электрическое поля в окружающем пространстве высоковольтной ВЛ

Для повышения точности вычислений и расширения области применения были построены новые аналитические математические модели для полей свободные от ограничений на положение точки наблюдения при сохранении остальных основных допущений, которые оправдали себя, как подтвердил эксперимент.

При описании ВЛ сохранены принятые выше и введены дополнительно следующие обозначения: h_i – высота подвеса и d_i – горизонтальные координаты проводов в принятой системе координат, R_i – расстояние от провода до точки наблюдения, i – номер провода в трехфазной ВЛ; h_0 – высота и d – координата точки наблюдения.

Напряженность магнитного поля в точке наблюдения от n -го провода согласно закону полного тока: $H_n = I_n / (2\pi R_n)$. Здесь I_n – ток в n -м проводе; $R_n = \sqrt{\Delta x_n^2 + \Delta y_n^2}$ – расстояние от точки наблюдения до провода ВЛ, где $\Delta x_n = d_n - d_0$ и $\Delta y_n = h_n - h_0$.

На основании простых геометрических построений и формул тригонометрии определен угол α_n относительно поверхности земли, под которым провод виден из точки наблюдения: $\alpha_n = \arctg(\Delta y_n / \Delta x_n)$.

Соответственно, проекции напряженности магнитного поля на оси прямоугольной системы координат: $H_{nx} = H_n \sin \alpha_n$ и $H_{ny} = H_n \cos \alpha_n$.

Для дальнейшего расчета трехфазной ВЛ использовался символический метод теоре-

тической электротехники. Токи в трехфазной цепи при симметричном режиме работы ВЛ, к которому всегда стремятся:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= I, \quad \dot{I}_2 = Ie^{-j2\pi/3}, \\ \dot{I}_3 &= Ie^{j2\pi/3}, \quad j = \sqrt{-1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_x &= H_x e^{j\varphi_x} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{R_1} \sin \alpha_1 - \frac{1}{2R_2} \sin \alpha_2 - \frac{1}{2R_3} \sin \alpha_3 + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2R_3} \sin \alpha_3 - \frac{\sqrt{3}}{2R_2} \sin \alpha_2 \right) \right] = \\ &= a_H + b_H j; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_y &= H_y e^{j\varphi_y} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{R_1} \cos \alpha_1 - \frac{1}{2R_2} \cos \alpha_2 - \frac{1}{2R_3} \cos \alpha_3 + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2R_3} \cos \alpha_3 - \frac{\sqrt{3}}{2R_2} \cos \alpha_2 \right) \right] = \\ &= c_H + d_H j; \end{aligned} \quad (4)$$

Модули координатных составляющих напряженности магнитного поля

$$H_x = \sqrt{a_H^2 + b_H^2} \quad H_y = \sqrt{c_H^2 + d_H^2}.$$

В итоге напряженность магнитного поля в точке наблюдения

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}. \quad (5)$$

Аналогичным путем получены формулы для вычисления электрического поля, позволяющие вычислить его напряженность в любой точке окружающего ВЛ пространства.

Далее на основании закона полного тока в комплексном виде получим следующие выражения для проекций напряженности магнитного поля:

Для вычисления воспользуемся теоремой Гаусса: $\dot{E}_n = \frac{\dot{q}_{0n}}{2\pi\epsilon_0 R_n}$.

Точно так же, как и в случае магнитного поля на основании простых геометрических построений и формул тригонометрии определим угол α_n : $\alpha_n = \arctg(\Delta y_n / \Delta x_n)$.

Соответственно, проекции напряженности электрического поля на оси прямоугольной системы координат: $E_{nx} = E_n \cos \alpha_n$ и $E_{ny} = E_n \sin \alpha_n$.

Далее на основании теоремы Гаусса получим следующие выражения для проекций напряженности электрического поля:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= E_x e^{j\varphi_x} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \times \\ &\times \left[\frac{q_{01}}{R_1} \cos \alpha_1 - \frac{q_{02}}{2R_2} \cos \alpha_2 - \frac{q_{03}}{2R_3} \cos \alpha_3 + j \left(\frac{q_{03}\sqrt{3}}{2R_3} \cos \alpha_3 - \frac{q_{02}\sqrt{3}}{2R_2} \cos \alpha_2 \right) \right] = a_E + j b_E; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_y &= E_y e^{j\varphi_y} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \times \\ &\times \left[\frac{q_{01}}{R_1} \sin \alpha_1 - \frac{q_{02}}{2R_2} \sin \alpha_2 - \frac{q_{03}}{2R_3} \sin \alpha_3 + j \left(\frac{q_{03}\sqrt{3}}{2R_3} \sin \alpha_3 - \frac{q_{02}\sqrt{3}}{2R_2} \sin \alpha_2 \right) \right] = c_E + j d_E. \end{aligned} \quad (7)$$

Модули координатных составляющих напряженности электрического поля

$$E_x = \sqrt{a_E^2 + b_E^2} \quad E_y = \sqrt{c_E^2 + d_E^2}.$$

В итоге напряженность электрического поля в точке наблюдения

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \quad (8)$$

Величины с двойными индексами относятся к зеркальным отражениям проводов ВЛ относительно поверхности земли.

Полученные формулы позволяют вычислить электрическое и магнитное поля

ВЛ во всей вертикальной полуплоскости от ближнего к точке вычисления провода до точки наблюдения.

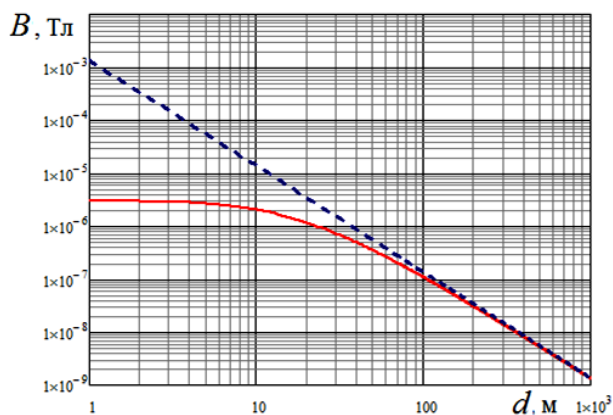


Рис. 2. Зависимости индукции магнитного поля от расстояния, опора типа ПБ 2т, $I = 327 \text{ А}$, $h_0 = 1,5 \text{ м}$
 — — — — — расчет по формуле (1),
 ————— расчет по формулам (3)-(5)

Из рис. 2 и 3 следует, что до расстояния в 10 м от крайнего провода ВЛ поля убывают слабо.

Результаты вычислений показывают, что более приближенные формулы применимы при вычислении полей на больших расстояниях от ВЛ. Вблизи ВЛ применимы более точные формулы. При вычислении магнитного поля источником погрешности остается пренебрежение различием в значениях магнитных проницаемостей земли и воздуха, электрического поля – использование метода зеркальных отражений.

Заключение

В результате получены новые более точные аналитические математические мо-

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов по формулам (2), (3) и более точным формулам (3-8).

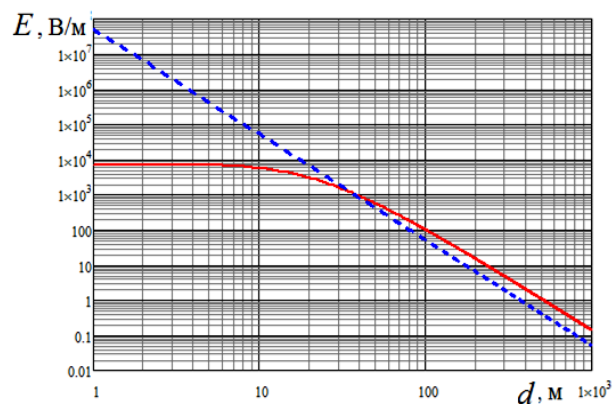


Рис. 3. Зависимости напряженности электрического поля от расстояния опора типа ПБ 2т, $U=500 \text{ кВ}$, $h_0 = 1,5 \text{ м}$.
 — — — — — расчет по формуле (2),
 ————— расчет по формулам (6)-(8)

дели, позволяющие осуществлять расчет магнитного и электрического полей высоковольтных ВЛ в окружающем их пространстве и пригодные для оценки интенсивности полей для принятия последующих решений в области создания пассивных устройств обнаружения ВЛ маловысотными авиаобъектами (вертолетами, дронами) в целях предотвращения столкновений их с проводами ВЛ, а также для оценки электромагнитного загрязнения окружающей среды ВЛ. Сравнение результатов вычислений по разным аналитическим моделям теоретически подтвердило адекватность более простых, полученных ранее, моделей для вычисления полей на расстояниях свыше 100 м от ВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. РФ № 150934. Устройство для предупреждения столкновения вертолета с высоковольтными линиями электропередач / Б.К. Сивяков, А.А. Скрипкин, Д.Б. Сивяков. Опубликовано 10.03.2015 г. Бюл. № 7.
2. World Health Organisation. EMF Project. URL: www.who.int/peh-emf/project/en/.

3. Сивяков Б.К. Обнаружение воздушных высоковольтных линий электропередач по магнитному и электрическому полям промышленной частоты / Б.К. Сивяков, Д.Б. Сивяков, А.А. Скрипкин // Известия вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 69-72 (Sivyakov B.K. Detection of the air high-voltage power lines by electric and

magnetic fields of the industrial frequency / B.K. Sivyakov, D.B. Sivyakov, A.A. Skripkin // Aircraft Instruments And Instrumentation Computer Complexes. July 2015. Vol. 58. Issue 3. P. 321-324).

4. Электрическое и магнитное поля высоковольтной воздушной линии на удалении от нее / Б.К. Сивяков, А.А. Скрипкин, Д.Б. Сивяков, А.В. Цыганков // Вестник СГТУ. 2015. № 3 (80). С. 200-206.

Сивяков Борис Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris K. Sivyakov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20. 01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

1. Полные имена и отчества всех авторов.
2. Место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.311.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ КУБА

Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева

MATHEMATICAL MODELING OF SOLAR POWER PLANTS SPECIFIED FOR THE CLIMATE CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF CUBA

D.D. Guerra, E.V. Yakovleva

В статье представлены результаты моделирования в среде Matlab/Simulink различных электрических компонентов, составляющих солнечную электростанцию (СЭС) мощностью 5 кВт, подключенных к электрической сети региона Сантьяго-де-Куба (Республика Куба). Разработанная модель позволяет исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) солнечных модулей в зависимости от таких метеорологических условий как интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды, относительная влажность и скорость ветра как для стационарных СЭС, так и для СЭС с системами слежения за солнцем. Кроме того, с помощью математической модели однофазного солнечного инвертора и однофазного электрического трансформатора, реализованного в программе, возможно исследовать поведение электрических переменных системы, таких как активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности системы. В заключение следует отметить, что разработанная модель позволяет исследовать системы подключения СЭС к сети с учетом специфических климатических условий региона.

Ключевые слова: моделирование, солнечная электростанция, система слежения за солнцем, ВАХ солнечного модуля

The article presents the simulation results based on Matlab/Simulink environment of the various electrical components to the solar power plant (SES) with the capacity of 5kW connected to the power grid of Santiago de Cuba (Republic of Cuba). The developed model allows for a research into the V-I characteristic (V-I) of the solar modules depending on meteorological conditions such as solar radiation intensity, ambient temperature, relative humidity and wind speed important both for the stationary SES and for the SES with solar tracking systems. In addition, mathematical models for a single-phase solar inverter and a single-phase electric transformer can be applied to investigate the behavior of electrical variables of the system, such as active, reactive and gross capacitance, and the system power factor. The developed model allows for a research into the systems of SES connection to the grid with account for specific climatic conditions of the region.

Keywords: modelling, solar plant, solar tracking system, solar module V-I characteristic

В данной статье описаны следующие этапы проведенных исследований – анализ существующей системы электроснабжения в регионе, моделирование солнечного модуля и системы слежения, включающее моделирование движения солнца по небосводу в данном регионе, произведенные на основании анализа метеорологических особенностей региона, моделирование инвертора и трансформатора. Заключительным этапом было экспериментальное исследование СЭС в метеорологических условиях региона Сантьяго-де-Куба.

В настоящее время экспериментальная фотоэлектрическая СЭС мощностью 5 кВт в провинции Сантьяго-де-Куба вырабатывает около 13,2 МВтч электроэнергии в год, которая поступает в электросеть региона.

Она имеет 20 солнечных модулей с максимальной мощностью 250 Вт, которые образуют две цепи из 10 фотоэлектрических модулей с максимальной мощностью 2,5 кВт каждая. Каждая цепь подключена к однофазному инвертору с максимальной мощностью 5 кВт, который подключен к низковольтной электрической сети напряжением 240 В. Затем через 500 м система подключается к национальной электрической системе через распределительный трансформатор 75 кВт, который подает питание на другие электрические нагрузки, подключенные к электрической системе.

На рис. 1 показаны составляющие, которые входят в состав фотоэлектрической СЭС.

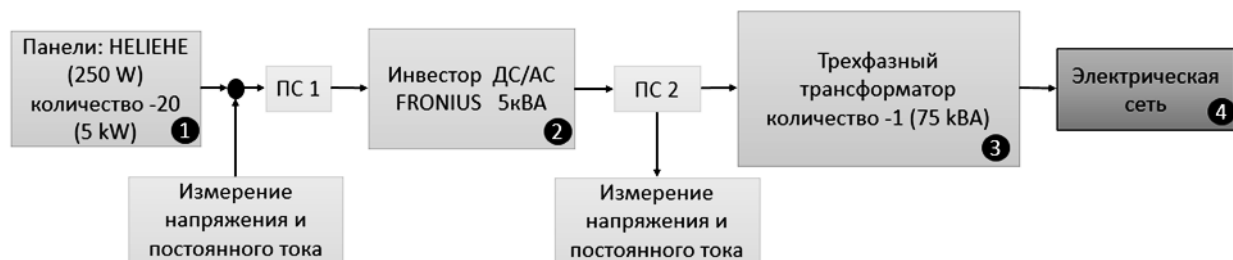


Рис. 1. СЭС в Сантьяго-де-Куба, Республика Куба (ПС – электрические доски)

Рядом с СЭС находится метеорологическая станция, которая измеряет данные глобальной горизонтальной радиации, скорости ветра, температуры окружающей среды, относительной влажности и атмосферного давления (рис. 2).

Модель, реализованная в программном обеспечении Matlab для моделирования фотоэлектрической системы мощностью 5 кВт, представлена на рис. 3. Модель позволяет изучать основные электрические переменные, составляющие систему подключения к солнечной сети, с учетом конкретных погодных условий в регионе. Для исследований был использован стандартный модуль кремния, который состоит из солнечных элементов, соединенных последовательно и/или параллельно через металлический проводник [11]. Каждый солнечный элемент ведет себя в темноте аналогично диодному р/п выпрямителю,

а при падении света создается электрический фототок (рис. 4).



Рис. 2. Метеорологическая станция в регионе

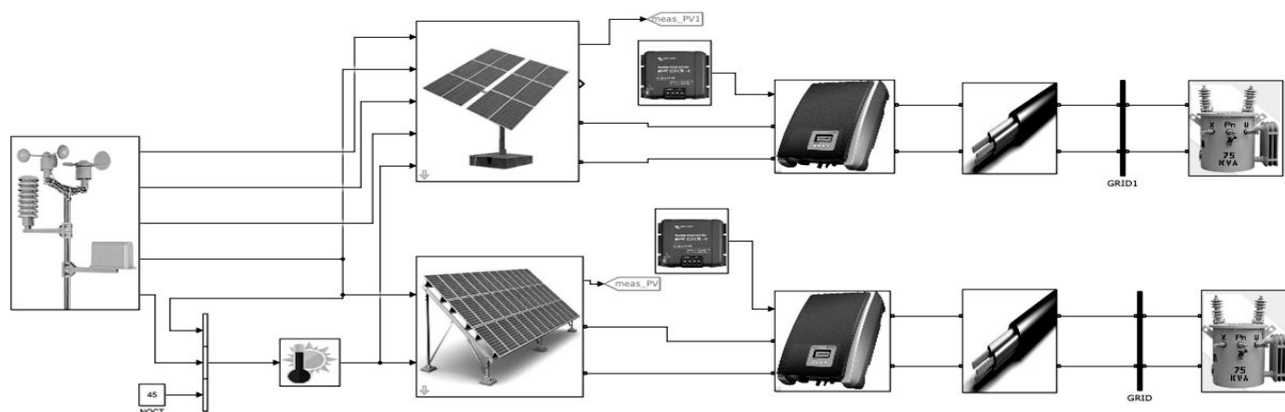


Рис. 3. Модель фотоэлектрической системы мощностью 5 кВт в программной среде MATLAB / SIMULINK

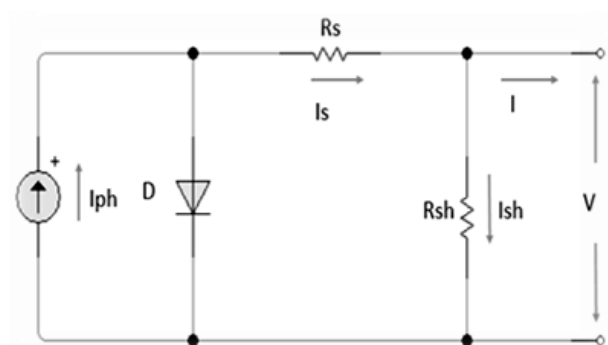


Рис. 4. Эквивалентная схема солнечной батареи [2]

Уравнения, описывающие модель солнечной батареи представлены далее:

$$A = e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot V_T}} - 1; \quad (1)$$

$$B = e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1; \quad (2)$$

$$I_{sc} = I_{scm} \cdot N_{cp} + \beta \cdot (T_c - T_{stc}); \quad (3)$$

$$V_{oc} = V_{ocm} - 0,0023 \cdot (T_c - T_{stc}) \cdot N_{cs}; \quad (4)$$

$$I = \frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{os} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)}{1 - \frac{B}{A}} \cdot \frac{G}{G_{stc}} - \left[\frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)}{A - B} - \frac{V_{oc}}{A \cdot R_{sh}} \right] \cdot \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (5)$$

где R_s – последовательное сопротивление, Ом; R_{sh} – параллельное сопротивление, Ом; n – диод; I_{sc} – ток короткого замыкания при нормальных условиях работы (СТУ), А; V_T – напряжение тепловое диодное, мВ, V – рабочее напряжение, В; I – рабочий ток, А; V_{oc} – напряжение разомкнутой цепи при стандартном тестовом условии (СТУ), В; β – температурный коэффициент тока короткого замыкания; G_{stc} – солнечное излучение при нормальных условиях работы (СТУ), Вт/м²; G – солнечное излучение,

Вт/м²; N_{cs} – количество солнечных элементов, соединенных последовательно в солнечном модуле, Ом; N_{cp} – число солнечных элементов, соединенных параллельно в солнечном модуле, Ом; T_c – температура батареи, °C; T_{stc} – температура батареи при стандартных тестовых условиях, 25°C.

Технические характеристики солнечной панели HELIENE (модель HEE215M): максимальная мощность – 250 Вт, напряжение холостого хода – 37,4 В, ток короткого замыкания – 8,72 А, напряжение при макси-

мальной мощности – 30,3 В, ток при максимальной мощности – 8,22 А, коэффициент температуры по току $I_{sc} - 0,0156\%/^{\circ}\text{C}$, коэффициент температуры по напряжению

$V_{oc} - 0,315\%/^{\circ}\text{C}$, последовательное сопротивление – 0,3347 Ω , параллельное сопротивление – 422,06 Ω , тип кремния – монокристалл (рис. 5).

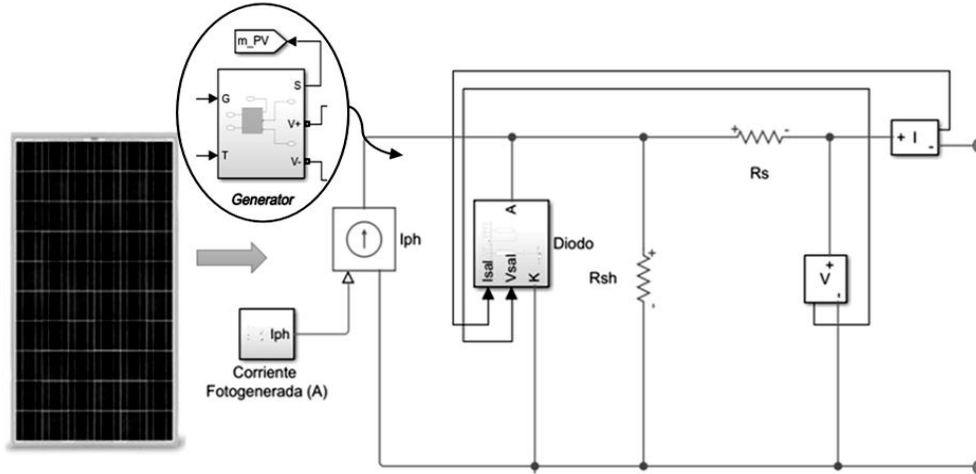


Рис. 5. Математическая модель солнечного модуля HELIENE (модель HEE215M)

Система слежения за солнцем, используемая в данном исследовании, функционирует следующим образом. Специальные направляющие ориентируют солнечные панели таким образом, чтобы угол падения солнечных лучей на поверхность солнечной панели составлял 90 градусов для того, чтобы максимизировать улавливаемую

энергию (рис. 6). В фотоэлектрических системах направляющие позволяют минимизировать угол падения лучей, то есть угол, который луч света создает с линией, перпендикулярной поверхности, между входящим светом и панелью, что увеличивает количество энергии, которую Система производит [1, 8].

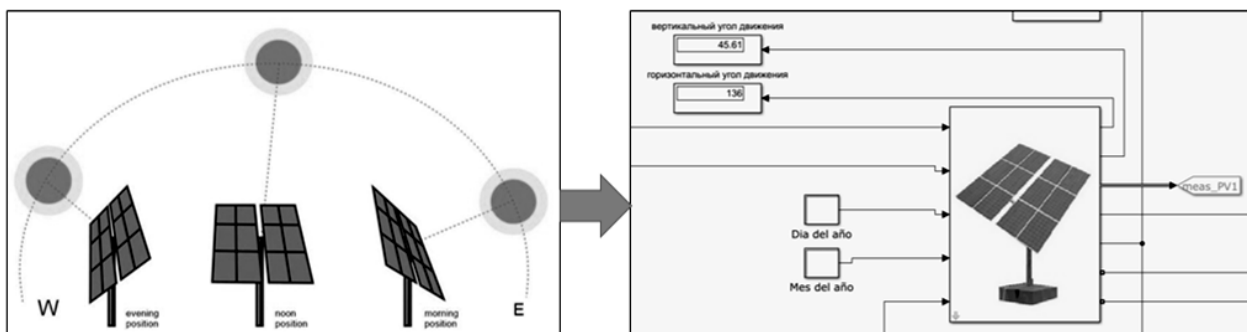


Рис. 6. Система слежения за солнцем, реализованная в среде MATLAB / SIMULINK

Углы, которые определяют движение солнечного трекера в горизонтальном движении (α) и вертикальном движении (γ), описываются следующими уравнениями [3, 6]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right); \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E = & 9,87 \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{360}{364} \cdot (n - 81) \cdot n\right) - \\ & - 7,53 \cdot \cos\left(\frac{360}{364} \cdot (n - 81) \cdot n\right) - \\ & - 1,5 \cdot \sin\left(\frac{360}{364} \cdot (n - 81) \cdot n\right); \end{aligned} \quad (7)$$

$$HS = HF + E + 4 \cdot (L_{Lef} - L_{Loc}); \quad (8)$$

$$w = -\left(\frac{15}{h}\right) \cdot HS + 180; \quad (9)$$

$$\varphi = \arcsin(\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)); \quad (10)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(w)}{\tan(\delta) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\varphi) \cdot \cos(w)} \right), \quad (11)$$

где δ – угол солнечного склонения, град.; n – дни года, 1-365 дней; E – уравнение времени; HS – солнечное время, ч.; HF – официальное время, ч; L_{lef} – длина опорного меридиана; L_{loc} – длина меридиана; w – угол солнечного времени, град.; φ – солнечный угол высоты, град.; γ – угол Asimut, град.

Поток солнечной радиации на горизонтальной поверхности Земли зависит от нескольких факторов, наиболее значимыми из которых являются: широта, время года, время суток и состояние атмосферы. Из-за присутствия атмосферы мы отличаем от глобальной радиации (G), падающей на любую поверхность, прямую и диффузную фракции [4, 7, 9].

Для расчета солнечного излучения на горизонтальной поверхности на земле необходимо записать тригонометрические зависимости между положением солнца на небе и координатами на земле (рис. 7).

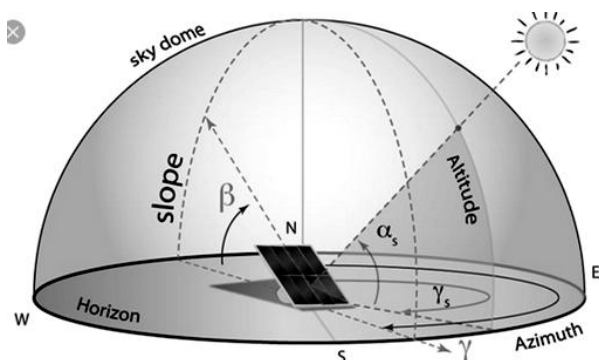


Рис. 7. Схема движения излучения Солнца по поверхности Земли

Ниже приведены уравнения для расчета падающего горизонтального излучения на наклонной плоскости [4, 5, 12]:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos((h-12) \cdot 15); \quad (12)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cdot \cos(\theta_z) + \sin(\beta) \cdot \sin(\theta_z) \cdot \cos\left(\frac{\cos(\delta) \cdot \sin((h-12) \cdot 15)}{\cos(90 - \theta_z)}\right); \quad (13)$$

$$k = \frac{G}{G_0 \cdot \cos(\theta_z)}; \quad (14)$$

$$(0,22 < k < 0,8) \rightarrow f = 0,9511 - 0,1604 \cdot k + 4388 \cdot k^2 - 16,638 \cdot k^3 + 12,336 \cdot k^4 \quad (15)$$

$$(k \leq 0,2) \rightarrow f = 1 - 0,09$$

$$(k > 0,8) \rightarrow f = 0,165;$$

$$I_t = (1 - f) \cdot G \cdot \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + f \cdot G \cdot \frac{1 + \cos(\varphi)}{2} + G \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos(\varphi)}{2}, \quad (16)$$

где δ – угол солнечного склонения, град.; θ_z – зенитальный угол, град.; φ – широта местности, град.; h – время суток, ч; β – угол наклона солнечной панели относительно горизонтали, град.; k – фактор; G – солнечное излучение в горизонтальной плоскости, Вт/м²; $G_0 = 1365$ – солнечная постоянная, Вт/м²; ρ – коэффициент отражения почвы.

Важным компонентом СЭС является преобразователь, который имеет в своем составе повышающий преобразователь напряжения (DC/DC-преобразователь) от 200 до 700 В, трехфазный инвертор, выполненный на основе IGBT-модулей по трехфазной мостовой схеме, пропорционально-интегральные регуляторы тока и напряжения (ПИ). Время открытия и закрытия IGBT-модулей составляет несколько миллисекунд, что позволяет эффективно использовать принцип широтно-импульсной модуляции для получения синусоидальных напряжений на выходе инвертора.

Генератор PWM отвечает за доставку сигнала переключения на полупроводнико-

вые устройства питания. Для этой системы использовалась синусоидальная модуляция по ширине униполярного импульса. Основная частота модулированной волны должна иметь значение, равное значению желаемого выхода, в этом случае желаемая частота равна 60 Гц [5, 10]. Ступень питания состо-

ит из полупроводниковых переключающих устройств, в этом случае смоделирована полная система мостового преобразования типа постоянного тока в переменный, как показано на рис. 8, сигналы управления переключением устройств доставляются генератором PWM.

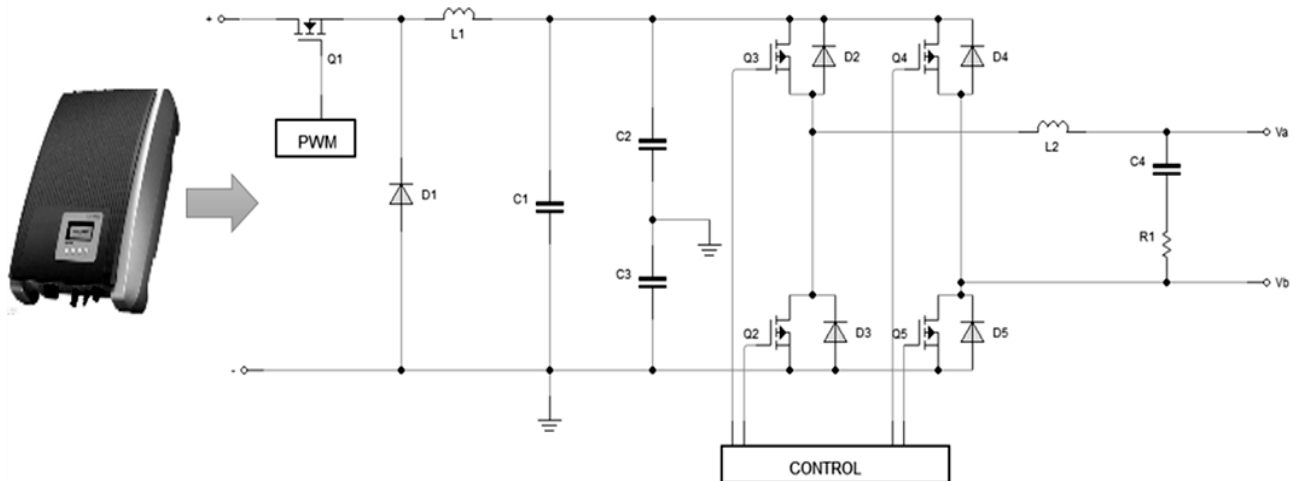


Рис. 8. Представление электрической цепи инвертора

Напряжение на каждой из клемм инвертора представлено в следующих уравнениях (17)-(23) [5, 7]:

$$V_a = \begin{cases} V_s, (u_m \geq u_c) \\ 0, (u_m < u_c) \end{cases}, \quad (17)$$

$$V_b = \begin{cases} V_s, (-u_m \leq u_c) \\ 0, (-u_m > u_c) \end{cases}.$$

Выходное напряжение описывается следующим образом:

$$V_c = (V_a - V_b); \quad (18)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = (2u - 1) \cdot (1 - m) \cdot V_p + m \cdot V_s - i_L \cdot R - V_c; \quad (19)$$

$$C \frac{dv_s}{dt} = (1 - 2u) \cdot m \cdot i_L; \quad (20)$$

где v_2 – напряжение конденсатора, V ; v_3 – напряжение конденсатора, V ; V_0 – выходное напряжение инвертора, V ; i_0 – выходной ток инвертора, A ; E – входное напряжение инвертора, V ; u – управляющий сигнал.

Уравнение преобразования мощности BOOST:

$$\frac{L di_i}{dt} = V_i - (1 - D) \cdot V_c; \quad (21)$$

$$\frac{C dv_v}{dt} = (1 - D) \cdot I_L - \frac{V_c}{R}; \quad (22)$$

$$V_0 = \frac{V_i}{1 - D}, \quad (23)$$

где V_i – входное напряжение преобразователя, V ; v_c – напряжение конденсатора, V ; V_0 – выходное напряжение преобразователя, V ; I_L – ток индуктора, A ; D – сигнал управления преобразователем.

На рис. 9 показана структурная схема однофазного преобразователя, реализованного в Matlab.

Трансформатор представляет собой устройство, состоящее из стального сердечника и двух обмоток (рис. 10). При подаче в первичную обмотку переменного напряжения, во вторичной обмотке индуцируется ЭДС той же частоты. Если ко вторичной обмотке подключить некоторый электроприемник, то в ней возникает электрический ток и

на вторичных зажимах трансформатора устанавливается напряжение, которое несколько меньше, чем ЭДС и в некоторой относительно малой степени зависит от нагруз-

ки. Отношение первичного напряжения ко вторичному (коэффициент трансформации) приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной.

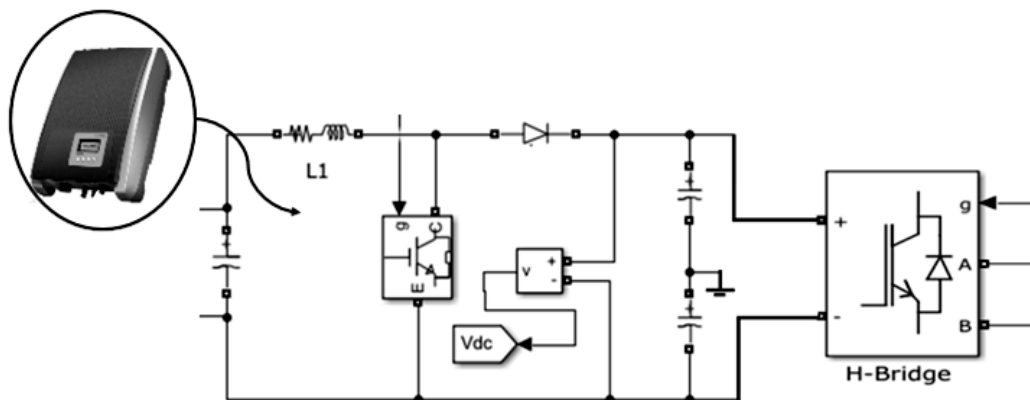


Рис. 9. Блок-схема инвертора

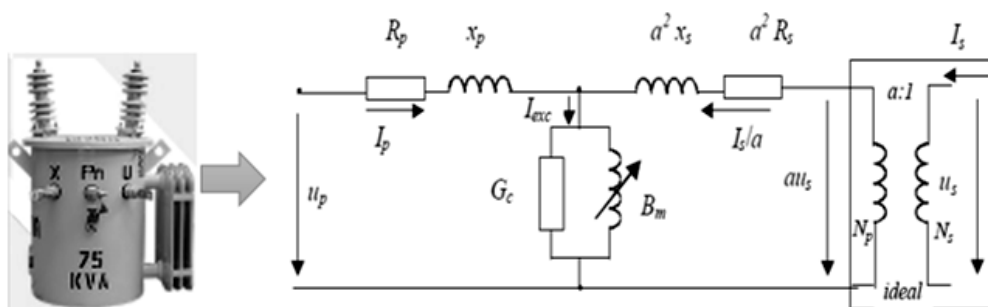


Рис. 10. Однофазный трансформатор, схема замещения трансформатора (тип Т)

Стадия преобразования состоит из компактного трехфазного трансформатора – из двух обмоток, одна из которых расположена на стороне низкого напряжения, а другая – на стороне высокого напряжения.

Математические выражения, которые описывают эквивалентную схему рис. 10, можно записать следующим образом:

$$u_p = R_p \cdot i_p + L_{dp} \cdot \frac{di_p}{dt} + N \cdot \frac{d\phi_{Fe}}{dt}; \quad (24)$$

$$u_s = R_s \cdot i_s + L_{ds} \cdot \frac{di_s}{dt} + N_s \cdot \frac{d\phi_{Fe}}{dt}; \quad (25)$$

где R_p – сопротивление первичной обмотки, Ом; R_s – вторичное сопротивление, Ом; I_p – первичный ток, А; I_s – вторичный ток, А; L_{dp} – первичная индуктивность; L_{ds} – вторичная индуктивность; N_p – число витков первичной обмотки; N_s – число витков вторичной обмотки.

Для того чтобы проверить эффективность моделирования с помощью MATLAB/SIMULINK, был проведен эксперимент с использованием сетевого анализатора модели Fluke 430. С помощью измерительного оборудования были получены данные об энергии, которая поступает на вход инвертора солнечной СЭС мощностью 5 кВт, данные об окружающей среде, были получены с метеостанции (рис. 2).

На рис. 12 представлены результаты экспериментальных натурных исследований и компьютерного моделирования. Синяя кривая представляет данные, рассчитанные программой MATLAB, а красная кривая представляет значения, полученные экспериментально, эти две кривые были получены при одинаковых климатических условиях исследуемого региона.

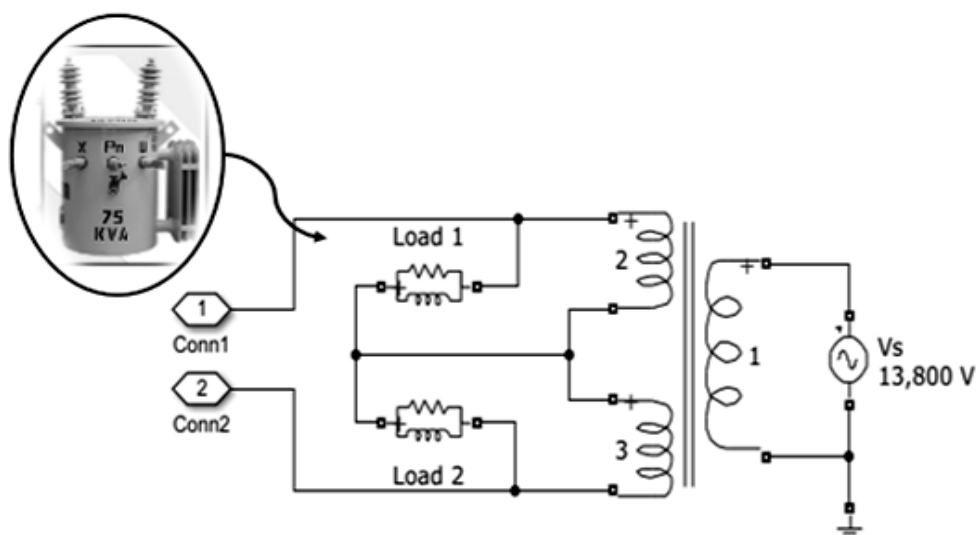


Рис. 11. Схема математической модели трехфазного трансформатора, разработанной в MATLAB / SIMULINK



Рис. 12. Валидация данных, рассчитанных по математической модели СЭС мощностью 5 кВт в MATLAB / SIMULINK

Результаты, показанные на рис. 12, показывают эффективность математической модели, разработанной для солнечной системы мощностью 5 кВт, поскольку разница между средней рассчитанной энергией (1,48 МВт·ч) и средней измеренной реальной энергией (1,37 МВт·ч) составляет 0,11 МВт·ч. Разница между обеими кривыми составляет 8% от фактической измеренной энергии.

Результаты, полученные при моделировании солнечной исследовательской систе-

мы мощностью 5 кВт в MATLAB/SIMULINK приведены на рис. 13.

Как видно на рис. 13, для тех же смоделированных климатических условий в регионе Сантьяго-де-Куба, энергия, получаемая с помощью системы слежения за солнцем, на 24 выше по сравнению со стационарной системой, что подтверждает тот факт, что системы слежения являются эффективной альтернативой улучшения параметров эффективности солнечных электростанций и увеличения производства энергии.

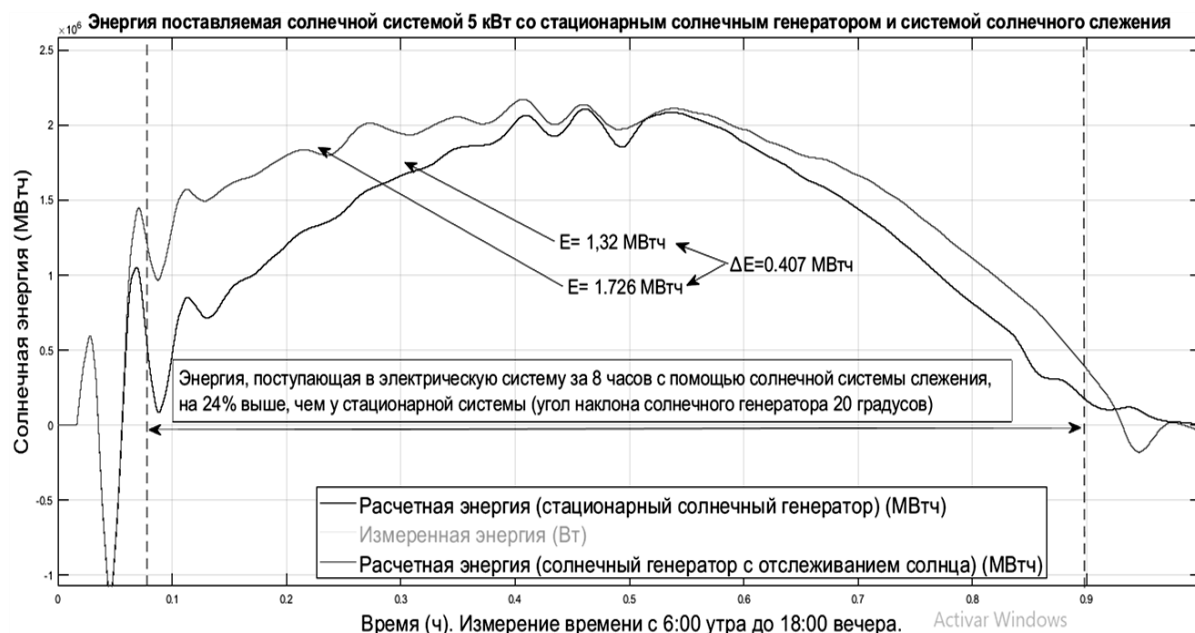


Рис. 13. Сравнение энергии, вырабатываемой солнечной системой мощностью 5 кВт с системой слежения за Солнцем и стационарным солнечным генератором с наклоном 20 градусов

Выводы

Согласно результатам проведенного исследования, было подтверждено, что системы слежения за солнцем являются альтернативным способом повышения эффективности солнечных электростанций, увеличения генерации объемов электрической энергии, доставляемой в электроэнергетическую систему региона, к которому

подключена электростанция. Исследование показывает, что энергия, улавливаемая солнечной электростанцией с системой слежения за солнцем, увеличивается на 24% по сравнению с системами, в которых отсутствует система слежения. Эти результаты были получены в конкретных климатических условиях региона Сантьяго-де-Куба, Республика Куба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонатан С.Ф. Проектирование и строительство фотоэлектрической системы мониторинга / С.Ф. Джонатан // Технологический университет Микстека. 2012.
2. Жуан С.С. Проектирование и анализ производительности преобразователя напряжения с использованием интеллектуальных контроллеров / С.С. Жуан // Эквадор. 2011.
3. Мора И.А.Э. Методология технического анализа массивификации фотоэлектрических систем как вариант распределенной генерации в сетях низкого напряжения / И.А.Э. Мора. Богота, Колумбия: Национальный университет, инженерный факультет, 2012.
4. Сьерра Э. Основы солнечной энергии / Э. Сьерра // CI 4230513-5. 2010.
5. Acevedo-Luna A. Study of validity of the single-diode model for solar cells by I-V curves parameters extraction using a simple numerical method / A. Acevedo-Luna, A. Morales-Acevedo // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. 1–7.
6. Evaluation of methods to extract parameters from current-voltage characteristics of solar cells / Y. Li, W. Huang, H. Huang et al. // Solar Energy. 2013. № 90. P. 51-57.
7. Modeling and Simulation of a hybrid system Solar panel and wind turbine in the locality of Molleturo in Ecuador / D. Icaza-Alvarez, C.J. Calle-Castro, F. Cordova-Gonzalez et al. // 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. 2017. (5). P. 620-625. San Diego: IEEE. doi: <http://doi.org/10.1109/DISTRA.2017.8191134>.

8. **Muñoz J.** On-site characterisation and energy efficiency of grid-connected PV inverters / J. Muñoz, F. Martínez-Moreno, E. Lorenzo // Progress in photovoltaics: research and applications. IES. UPM. España, 2010.

9. **Reyes-Caballero F.** Panorama energético / F. Reyes-Caballero, F. Fernández-Morales, J. Duarte // Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación. 2016. № 7 (1). P. 151-163. doi: <http://dx.doi.org/10.19053/20278306.v7.n1.2016.5605>.

10. **Rezk H.** A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems / H. Rezk, E.S. Hasaneen // Ain Shams Engineering Journal. 2015. № 6 (3). P. 873-881. doi: <http://doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.001>.

11. **Setiawan E.A.** Analysis on solar panel performance and PV-inverter configuration for tropical region / E.A. Setiawan, A. Setiawan, D. Siregar // Journal of Thermal Engineering. 2017. № 3 (3). P. 1259-1270. doi: <http://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.323392>.

12. Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems / A. Smets, K. Jager, O. Isabella et al. UK: Uit Cambridge, 2016.

13. **Silvestre S.** Herramientas de Simulación para Sistemas Fotovoltaicos en Ingeniería / S. Silvestre, L. Castanar, D. Guasch // Formacion Universitaria. 2008. № 1 (1). P. 13-18. doi: <http://doi.org/10.4067/S0718-50062008000100003>.

Герра Диаз Даниэль – аспирант кафедры «Общая электротехника» Санкт-Петербургского горного университета

Яковлева Эмилия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая электротехника» Санкт-Петербургского горного университета

Daniel D. Guerra – PhD student, Department of Electrical Engineering of Saint Petersburg Mining University

Emilia V. Iakovleva – PhD, Associate Professor, Electrical Engineering Department of Saint Petersburg Mining University

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УДК 621.317.18

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

А.Н. Скамьин, В.С. Добуш, Ю.В. Растворова

THE IMPACT OF VOLTAGE ON ELECTRIC CONSUMPTION PARAMETERS UNDER HIGHER ORDER HARMONIC

A.N. Skamyin, V.S. Dobush, Yu.V. Rastvorova

Данная работа посвящена изучению влияния напряжения на параметры электропотребления или наличия гармонических искажений в напряжении и токе. В

This work is devoted to investigating the impact of voltage on the parameters of power consumption or existence of harmonic distortions in voltage and current systems. The pow-

лабораторных условиях на разработанном стенде были измерены параметры электропотребления нагрузки для трех различных режимов работы и рассчитаны их статические характеристики по напряжению. Активная, реактивная и полная мощности вычислялись на основании выбранных теорий мощности. Выявлено, что при суммарном коэффициенте гармонических искажений напряжения менее 5% основную роль в возникновении и изменении мощности искажений играет коэффициент гармонических искажений тока, в то время как при значении выше 5% значительный эффект наблюдается при изменении напряжения потребителя, что может стать инструментом для регулирования величины потребляемой мощности искажений.

Ключевые слова: высшие гармоники, нелинейная нагрузка, гармонические искажения, качество электрической энергии, мощность искажения

1. Введение

В настоящее время на многих предприятиях активно вводится в эксплуатацию электрооборудование, функционирование которого приводит к возникновению высших гармоник в сетях потребителей и промышленных предприятий [1, 2, 6, 7, 13, 14]. Данный факт затрудняет расчет потребляемой мощности и энергии, который традиционно проводится по активным и реактивным составляющим [11]. В то время как данный подход справедлив для цепей с синусоидальными напряжениями и токами, при наличии высших гармоник возникает ряд трудностей при проведении подобных расчетов [8, 9]. На сегодняшний день многими учеными предложены различные теории вычисления и определения мощности для цепей с несинусоидальными и несимметричными параметрами, споры о целесообразности применения которых актуальны до сих пор [12, 15, 16]. Каждая теория имеет свои достоинства и недостатки и применима для определенных условий.

Большинство теорий предполагают, помимо расчета активной и реактивной мощностей, учет влияния мощности искажений,

er consumption parameters for three different operating modes and their static voltage characteristics have been estimated using the developed laboratory installation. The active, reactive, and total capacity were calculated based on the defined power capacity theories. It has been found that with a total coefficient of voltage harmonic distortion lower than 5% the main role in the occurrence and changes of distortion capacity plays the current harmonic distortion coefficient. Meanwhile, with the voltage harmonic distortion higher than 5%, a significant effect is observed under the changes in consumer voltage that can become a tool for regulating the amount of consumed distortion capacitance.

Keywords: higher-order harmonic, non-linear load, harmonic distortion, electric power quality

вызванной наличием высших гармоник напряжений и токов [4]. В таком случае возникает возможность измерения и анализа потоков мощности искажения в зависимости от напряжения. С точки зрения повышения надежности и экономичности функционирования электроэнергетических систем такие характеристики представляют незначительный интерес ввиду малого содержания гармоник в высоковольтных сетях. Однако для потребителей такие характеристики важны и необходимы при выборе средств компенсации высших гармоник и их влияния на электрооборудование [10, 11].

С другой стороны, корректная оценка потребляемой мощности позволит осуществлять ее точное регулирование, что, в свою очередь, имеет большое значение при поддержании показателей качества электроэнергии в требуемых пределах.

Существует несколько способов регулирования параметров электропотребления, одним из которых является изменение напряжения на шине потребителя. При изменениях напряжения проявляется регулирующий эффект нагрузки, который заклю-

чается в изменении потребляемой активной и реактивной мощности. Очевидно, что для моделирования влияния параметров режима электроэнергетической системы необходимо использовать статические характеристики нагрузки. Кроме того, статические характеристики нагрузки по напряжению используются при расчетах установившихся режимов и статической устойчивости электроэнергетических систем. Таким образом, определение статических характеристик нагрузок является одной из важнейших задач современной электроэнергетики.

Данная работа посвящена изучению и расчетам статических характеристик нагрузок по напряжению (СХН) при наличии высших гармоник. При этом рассматриваются как линейные, так и нелинейные электрические нагрузки. Построение СХН осуществляется на основании данных, полученных в ходе лабораторного эксперимента, а также согласно выбранным выражениям для вычисления активной, реактивной, полной мощностей при наличии высших гармоник.

2. Методы исследования

Необходимо описать методы, используемые в проводимом исследовании. В ходе работы вычислялись полные, активные, реактивные мощности, а также мощности искажений, необходимые для построения статических характеристик нагрузки по напряжению. При этом важно определить, каким образом будут проводиться расчеты.

Формулы, определяющие активную и реактивную мощности, могут быть представлены различными выражениями согласно ряду теорий. Выбор теории, в свою очередь, осуществляется в зависимости от поставленных задач, которые могут включать в себя определение рациональной степени компенсации реактивной мощности, выявление долевого вклада источника высших гармоник, снижение вычислительной погрешности при измерении реактивной мощности, построение статических характеристик нагрузки и т.д.

Рассмотрим вопросы относительно активной мощности. Известно, что при генериро-

вании высших гармоник собственной нелинейной электрической нагрузкой активные мощности высших гармоник имеют отрицательное значение, и наоборот, при возникновении высших гармоник со стороны электрической сети относительно точки общего присоединения активные мощности высших гармоник имеют положительное значение [5]. Такой подход представляется несправедливым при расчете стоимости потребляемой электроэнергии. Однако при определении виновника ухудшения показателей качества электроэнергии в точке общего подключения потребителей по мощности искажения на вводном присоединении целесообразно рассчитывать активную мощность на высших гармониках именно в соответствии с таким принципом. Например, увеличение собственной нелинейной нагрузки приводит к уменьшению потребляемой активной мощности и увеличению мощности искажения. Это свидетельствует об увеличении долевого вклада в суммарные искажения.

Что касается расчета реактивной мощности, то стоит упомянуть работу [16], в которой проводилось моделирование различных режимов работы электротехнического комплекса предприятия при наличии высших гармоник. При этом реактивная мощность вычислялась по выражениям, которые наиболее часто встречаются в литературе. Данные расчеты проводились с целью решения следующих задач:

1. Определение вычислительной погрешности расчета реактивной мощности по разным выражениям при наличии высших гармоник и компенсирующих устройств.

2. Выявление математического выражения, при использовании которого полученный результат обеспечивает минимум затрат для реализации максимальной степени компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных установок при наличии высших гармоник.

В результате проведенных исследований оказалось, что наиболее приемлемым с точки зрения поставленных задач является определение реактивной мощности согласно теории Кастерса-Мура и стандарту IEEE 1459-2010.

Кроме этого, в указанной работе проводятся исследования по определению составляющей полной мощности, которая характеризует параметры нелинейной электрической нагрузки. Показано, что отношение полной мощности нелинейных нагрузок двух предприятий, подключенных к точке общего присоединения, с некоторой погрешностью характеризуется отношением мощностей искажения на вводном присоединении этих потребителей. Это справедливо только для однотипных выпрямителей двух предприятий.

Таким образом, при наличии высших гармоник предлагается строить статические характеристики нагрузки, используя активную мощность P , учитывая активную мощность высших гармоник P_H , реактивную мощность основной частоты Q_1 и мощность искажений D :

$$P = P_1 + P_H, Q = Q_1, \quad (1)$$

$$D = (S^2 - Q_1^2 - P^2)^{0.5}.$$

В [3] показано, что при расчете мощностей методом эквивалентных синусоид, при котором реактивная мощность определяется как разность квадратов полной мощности и активной мощности с учетом всех гармоник, баланс реактивных мощностей сходится с достаточной для практических

расчетов точностью при значениях THD_U и THD_I до 15-20%. Рассмотренный в (1) подход согласуется с методом эквивалентных синусоид с учетом разложения реактивной мощности на составляющую первой гармоники и мощность искажения.

3. Лабораторный эксперимент

Построение статических характеристик нагрузки по напряжению осуществляется тремя основными методами: расчетный метод, метод пассивного эксперимента и метод активного эксперимента, основанный на проведении измерений. В данной работе применяется метод активного эксперимента, который реализуется на смонтированной установке (рис. 1) в лабораторных условиях.

Лабораторный стенд включает: трехфазный лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), асинхронный двигатель с нагрузкой в виде генератора постоянного тока (АД), конденсаторную батарею с антигармоническим реактором (С), неуправляемый трехфазный выпрямитель (В) с подключенной нагрузкой в виде активного сопротивления (АН). Измерение потребляемой энергии производится анализатором качества электрической энергии «Ресурс УФ2М».

Структура стенда, на котором проводились эксперименты, показана на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда

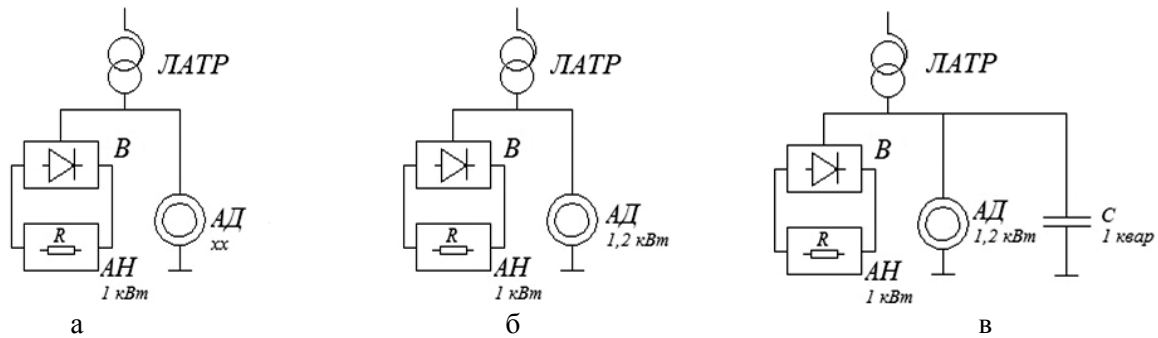


Рис. 2. Обобщенная принципиальная однолинейная схема лабораторной установки:
а – первый эксперимент; б – второй эксперимент; в – третий эксперимент

Задавались три режима работы электрооборудования:

- Режим 1 – подключенный электродвигатель номинальной мощностью 1,5 кВт на холостом ходу и неуправляемый трехфазный выпрямитель с нагрузкой в виде активного сопротивления потребляемой мощностью около 1,0 кВт (режим 1);
- Режим 2 – режим 1 с дополнительно подключенной механической нагрузкой к электродвигателю (режим 2);
- Режим 3 – режим 2 с дополнительно подключенной конденсаторной батареей 1 квар (режим 3).

Во всех трех режимах выходное напряжение автотрансформатора варьировалось

от 200 до 240 В. Кроме того, проводились измерения напряжений и токов, потребляемых выпрямителем.

4. Обработка результатов

При анализе полученных данных были построены зависимости активной и реактивной мощности от напряжения с применением выражений (1).

Указанные зависимости (рис. 3) не представляют значительного интереса и подтверждают известные закономерности изменения потребляемой мощности от напряжения для принятых параметров нагрузки.

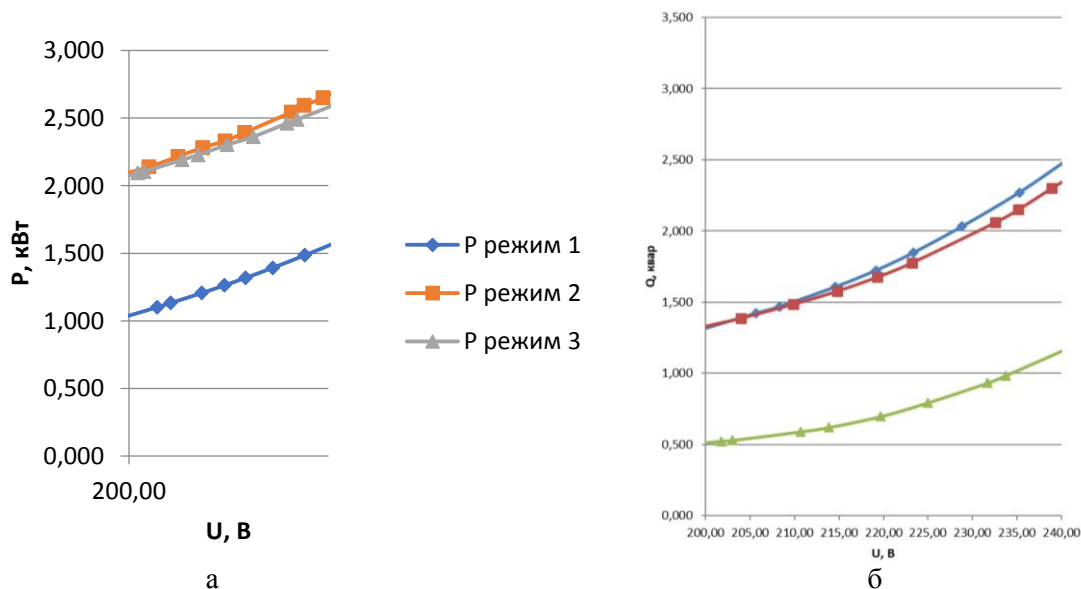
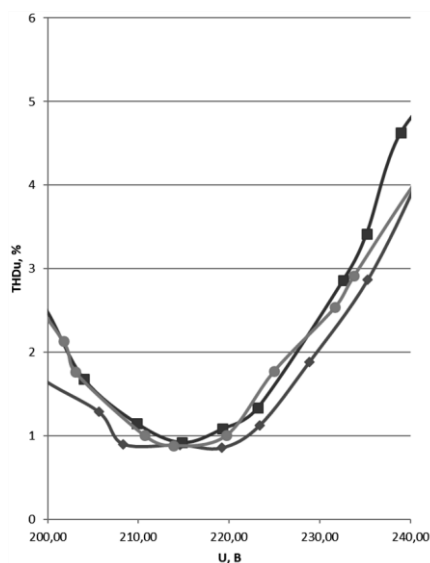


Рис. 3. Расчетные мощности для режимов 1-3: а – активная мощность; б – реактивная мощность

Изменение мощности искажения в зависимости от напряжения представляет более сложный процесс, в котором необходимо

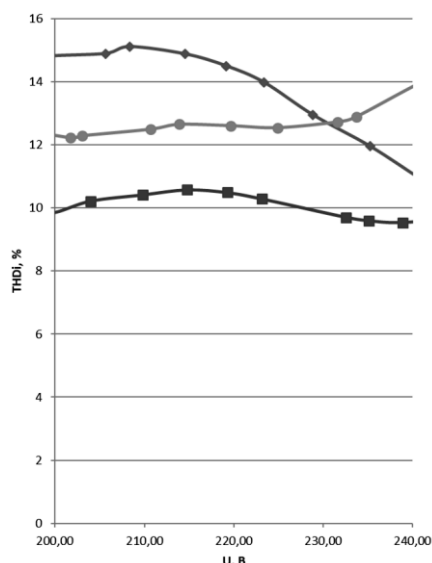
учитывать искажения по току и напряжению. На рис. 4 представлены зависимости суммарного коэффициента гармонических

составляющих напряжения (THD_U) и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока (THD_I) от напряжения.



а

На рис. 5 построены зависимости мощностей искажений для каждого из экспериментов рассчитанные исходя из формул (1).



б

Рис. 4. Показатели качества в точке измерения для режимов 1-3:
а – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения;
б – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока

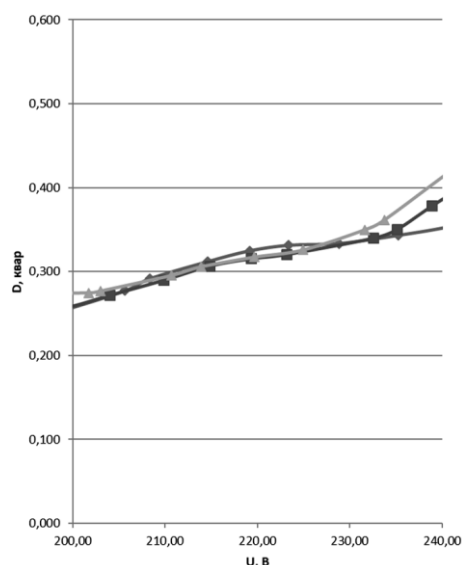


Рис. 5. Мощность искажений в точке измерения для режимов 1-3

THD_U изменяется в пределах от 1 до 5%, THD_I изменяется в пределах от 9 до 15% для рассматриваемых условий. Мощность искажения варьируется от 250 до 400 вар. При этом из графика видно, что мощность искажения возрастает при увеличении напряжения. То есть возможно осуществлять регулирование мощности искажения

за счет изменения напряжения на шинах потребителя, что связано с изменением сопротивления питающего трансформатора.

Характер зависимости THD_U от U нелинейный, с минимумом при значении напряжения около 220 В. Для диапазона $U < 220$ В при уменьшении напряжения THD_U увеличивается, что связано с увели-

чением сопротивления системы. В этом диапазоне THD_I незначительно возрастает, либо остается практически на одном и том же уровне. Повышение напряжения выше 220 В приводит к насыщению трансформатора, что выражается в увеличении THD_U и разнонаправленном изменении THD_I .

Кроме этого, можно сделать вывод о том, что на мощность искажения в данном случае более значительный вес оказывает THD_I в сравнении с THD_U . Это видно из графика в диапазоне работы трансформатора без насыщения: THD_U уменьшается, а мощность искажения при этом возрастает, как и THD_I . Это, в свою очередь, коррелируется с выражением согласно стандарту IEEE 1459-2010, где кажущаяся (полная) мощность высших гармоник S_N может быть рассчитана по уравнению

$$S_N = S_1 (THD_I^2 + THD_U^2)^{0.5}, \quad (2)$$

где THD_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока; THD_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения. Из выражения следует, что при значениях THD_U от 1 до 2,5% (в диапазоне работы трансформатора без насыщения значения) и THD_I от 10 до

15%, характер мощности искажения будет определяться искажениями по току.

Выводы

Таким образом, в работе выявлено влияние напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник. При этом характер изменения активной и реактивной мощности не представляет интереса, так как подтверждает известные закономерности. Изменение мощности искажения при варьировании напряжения в допустимых ГОСТ пределах достигает 60%. Полученные зависимости показывают, что увеличение напряжения приводит к уменьшению мощности искажения, что может применяться при внедрении мероприятий по компенсации высших гармоник, а также снижению долевого вклада в искажения напряжения в точке общего присоединения потребителей.

Стоит отметить, что наличие зоны насыщения при проведении лабораторных исследований, отсутствие четкой закономерности изменения THD_U и THD_I в этом диапазоне, невысокие значения искажений в напряжении и токе позволяют наметить дальнейшее направление исследований в этой области с целью подтверждения и уточнения полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки / А.А. Бельский, В.А. Моренов, К.С. Купавых, М.С. Сандыга // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 2. С. 146-154.
2. Электротехнический комплекс слежения за солнцем для обеспечения эффективной работы фотоэлектрических батарей / Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева, И.Н. Войтюк, А.В. Коптева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 556-562.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Сравнительный анализ счетчиков реактивной энергии при наличии высших гармоник в электрических сетях / Д.И. Иванченко, О.С. Васильков, Д.Е. Батуева, О.Е. Батырев // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. 2017. С. 410.
5. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.
6. Соловьев С.В. Влияние конструктивных особенностей ветрогенераторов на их эффективность / С.В. Соловьев // Введение в энергетику: сб. материалов II Всерос. (с международным участием) молодежной науч.-практ. конф. 2016. С. 227.
7. Шклярский А.Я. Экономическое обоснование метода регулирования электропотребления предприятия с применением ак-

кумуляторных батарей на примере обога-
тельной фабрики ОАО «УРАЛКАЛИЙ» /
А.Я. Шклярский, Д.И. Иванченко,
Э.В. Яковлева // Российский экономический
интернет-журнал. 2018. № 2. С. 104.

8. **Шклярский Я.Э.** К вопросу оплаты
предприятиями потребляемой электроэнер-
гии при наличии искажений в сети /
Я.Э. Шклярский, Т.В. Пудкова, Е.О. Замя-
тин // Известия Тульского государственного
университета. Технические науки. 2019.
№ 9. С. 611-617.

9. **Шклярский Я.Э.** Влияние высших
гармоник на измерение реактивной энер-
гии в электрических сетях / Я.Э. Шкляр-
ский, О.С. Васильков, Д.Е. Батуева // Из-
вестия Тульского государственного
университета. Технические науки. 2018.
№ 1. С. 381-389.

10. **Шклярский Я.Э.** Оценка добавоч-
ных потерь мощности в электрических се-
тях с нелинейной и несимметричной
нагрузкой / А.А. Белицкий, Я.Э. Шкляр-
ский // Известия Тульского государственного
университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 86-93.

11. **Шклярский Я.Э.** Влияние графика
нагрузки на потери в электрической сети
предприятия / Я.Э. Шклярский, С. Пирог // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 858-863.

12. **Akagi H.** Instantaneous power theory
and applications to power conditioning /

H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. IEEE
Press, 2009.

13. Power quality in industrial isolated
generation power systems with powerful
nonlinear consumers / I.I. Artyukhov,
I.I. Bochkareva, S.V. Molot et al. // Proceed-
ings of the 9th International Scientific Sym-
posium on Electrical Power Engineering.
Slovakia. Elektroenergetika 2017. 2017.
P. 44-49.

14. Voltage quality problems in power
supply system of boiler stations using pumps
with variable-frequency drive / I.I. Artyukhov,
S.V. Molot, S.E. Stepanov et al. // 2018 19th
international scientific conference on electric
power engineering, EPE 2018 – proceedings.
2018. P. 1-6.

15. **Filipski P.S.** Evaluation of reactive
power meters in the presence of high harmonic
distortion / P.S. Filipski, P.W. Labaj // IEEE
Trans. Power Deliv. 1992. Vol. 7. № 4.
P. 1793-1799.

16. **Skamyin A.N.** Power components cal-
culation and their application in presence of
high harmonics / A.N. Skamyin, O.S. Va-
silkov // Electric Power Quality and Supply
Reliability Conference and Symposium on
Electrical Engineering and Mechatronics, PQ
and SEEM. 2019. P. 1-4.

17. **Willems J.L.** The IEEE standard 1459:
What and why? / J.L. Willems // IEEE Interna-
tional Workshop on Applied Measurements
for Power Systems. 2010. P. 41-46.

Скамьин Александр Николаевич – канди-
дат технических наук, доцент кафедры
«Электроэнергетика и электромеханика»
Санкт-Петербургского горного университета

Добуш Василий Степанович – кандидат
технических наук, доцент кафедры «Общая
электротехника» Санкт-Петербургского
горного университета

Растворова Юлия Владимировна – аспи-
рант кафедры «Общая электротехника»
Санкт-Петербургского горного университета

Aleksander N. Skamyin – PhD (Engineering),
Associate Professor, Department of Electric
Power and Electromechanics of Saint Petersburg
Mining University

Vasiliy S. Dobush – PhD (Engineering), As-
sociate Professor, Department of Electrical
Engineering of Saint Petersburg Mining Uni-
versity

Yulia V. Rastvorova – PhD student at Depart-
ment of Electrical Engineering of Saint Peters-
burg Mining University

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УДК 621.311

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЕК

Д.С. Аминов

ANALYSIS OF THERMAL STATE OF HYDROGENERATORS WITH COMBINED EXCITATION APPLIED IN HARNESSING THE HYDROPOWER OF MINOR AND MEDIUM-WIDTH RIVERS

D.S. Aminov

Освоение энергетики малых и средних рек представляет собой актуальную задачу, поскольку суммарный энергетический потенциал этого ресурса во много раз превышает данный показатель для больших рек. В статье рассмотрен гидрогенератор уникальной конструкции. Он полностью погружен в воду, что позволяет не нарушать экологию и эстетику окружающей среды. Для обеспечения гидроизоляции генератор наполнен маслом. Основу его составляет электрическая машина комбинированного возбуждения, на которую имеется патент Российской Федерации. Для проектирования гидрогенераторов данного типа разработана проектная система, которая включает в себя синтез оптимальной геометрии и электромагнитный и тепловой анализ рассчитанной конструкции. В статье представлен заключительный этап анализа – оценка установившегося теплового состояния генератора при номинальной нагрузке. Тепловые расчеты проведены в два этапа. На первом этапе оценка велась на основе метода тепловых схем замещения, на втором этапе оценка осуществлялась с использованием метода конечных элементов. В статье приведены результаты анализа для гидрогенератора 3 кВт 350 об/мин.

Ключевые слова: тепловой анализ, генератор комбинированного возбуждения, микро-ГЭС, метод схем замещения, метод конечных элементов

В последнее время в мире возрастает интерес к альтернативным источникам

Harnessing the power of minor and medium-width rivers is an urgent task, since their total energy resource is many times over the given indicator for large rivers. The article describes a hydrogenerator of unique design. It is completely dipped in the water, and therefore does not cause damage to ecology or environmental aesthetics. To ensure the waterproofing, the generator is filled with oil. Its core is an electric machine of combined excitation, which is patented in the Russian Federation. To make the design project for this type of hydrogenerators, a design system has been developed that synthesizes the optimal geometry, and electromagnetic and thermal analysis of the calculated construction design. The article presents the final stage of the analysis, i.e. assessment of the thermal state of the generator at the rated load. The thermal calculations were divided into two stages. At the first stage, the assessment was based the thermal equivalent circuit method; at the second stage, the assessment was made using the finite element method. The article presents the analysis results for the 3 kW 350-rpm hydrogenerator.

Keywords: thermal analysis, combined excitation generator, micro-hydroelectric power station, equivalent circuit method, finite element method

энергии, использующим энергию ветра, солнца, прилив и отлив, волн, геотермаль-

ную энергию. Одним из наиболее эффективных направлений развития нетрадиционной энергетики является использование энергии небольших водотоков с помощью микро- и малых гидроэлектростанций (микроГЭС). Практически в любой стране существует большое количество рек с небольшой величиной водотока, которые с успехом могут быть использованы для строительства мини- и микроГЭС. В настоящее время наблюдается тенденция уменьшения доли традиционных источников энергии в энергобалансе ведущих развитых стран и возрастание доли альтернативных источников энергии.

Это обусловлено:

- истощением запасов углеводородных источников;
- требованиями экологии по уровню выброса углекислого газа.

Сжигание углеводородов наносит большой вред окружающей среде. Использование энергии больших рек приводит к затоплению территорий, сокращению земель для сельского хозяйства. Не все страны имеют запасы угля, нефти и газа. Поэтому они попадают в энергетическую зависимость от стран производителей электроэнергии [1].

Альтернативные источники энергии экологически безопасны, они равномерно распределены по земному шару. В последнее время они становятся все более экономически выгодными [2].

Разработка надежного и экономичного оборудования для малых ГЭС является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение при строительстве малых автономных гидроэлектростанций. Гидрогенераторы для малых рек – это надежные, экологически чистые, компактные, быстро окупаемые источники электроэнергии. Они экономически целесообразны для деревень, дачных поселков, фермерских хозяйств, а также мельниц, хлебопекарен, небольших производств в отдаленных, горных и труднодоступных районах, где нет линий электропередач, а их строительство требует больших финансовых затрат и времени [3].

Для решения поставленной задачи предлагается конструкция мини-ГЭС, в которой турбина совмещается с генератором, и весь агрегат помещается в воду. Такое техническое решение не нарушает экологию и эстетику окружающей среды. В качестве водопогружного гидрогенератора предлагается уникальная электрическая машина генератор комбинированного возбуждения [4-11]. Индуктор генератора имеет мощные постоянные магниты и обмотку возбуждения.

Таким образом, в машине при наличии постоянных магнитов остается функция регулирования магнитного потока по цепи возбуждения. Такая конструкция за счет использования постоянных магнитов имеет сравнительно малые габариты, а за счет использования электромагнитного возбуждения – упрощенную электронную систему стабилизации выходного напряжения за счет регулирования по маломощной цепи возбуждения. Генератор имеет обращенную конструкцию, то есть статор находится внутри, а ротор – снаружи. Это упрощает общую компоновку гидротурбины.

Конструкция генератора представлена на рис. 1.

Генератор состоит из двух основных частей: статора и ротора. Статор содержит шихтованные из электротехнической стали пакеты 1 и 2 с пазами. Паза пакеты в осевом направлении совпадают. В пазах пакета расположена многофазная обмотка 3.

Пакеты крепятся к массивным частям магнитопровода 4 и 5. Части 4 и 5 напрессованы на втулку 6. Между пакетами магнитопровода расположена неподвижная обмотка возбуждения 7. Ротор генератора расположен снаружи статора. Он имеет массивный ферромагнитный полюс 8 и постоянные магниты 9 и 10. Постоянные магниты и полюса чередуются друг с другом и расположены по кругу. Они образуют два кольца, которые охватывают пакеты 1 и 2. Кольца индуктора расположены таким образом, что в осевом направлении напротив полюса 8 расположен постоянный магнит 9 или 10. Магниты 9 и 10 имеют радиальную намагниченность, при этом в одном кольце

магниты имеют «южную» намагниченность 9 на поверхности, обращенной к пакету,

в другом кольце – «северную» намагниченность 10 [5, 19].

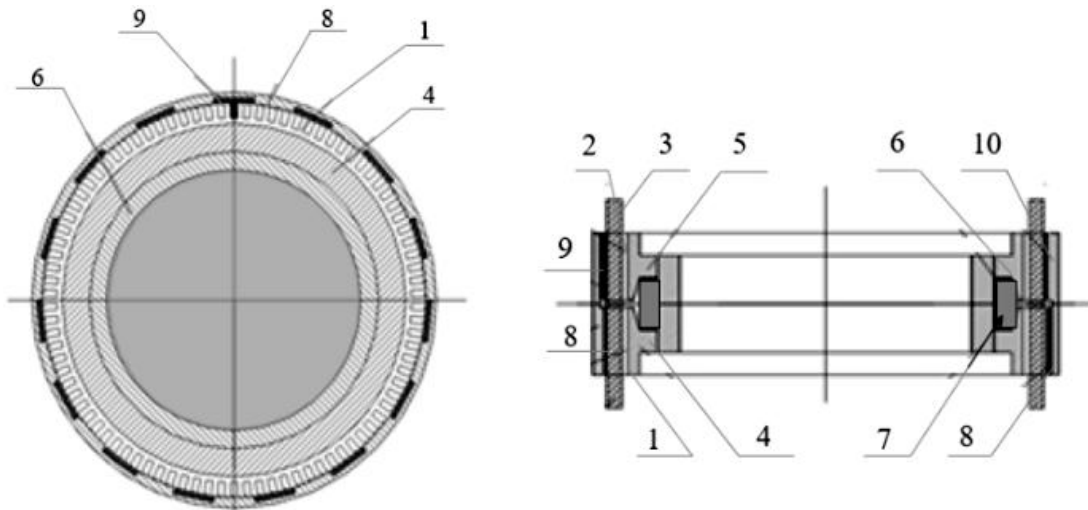


Рис. 1. Эскиз генератора комбинированного возбуждения

Для проектирования гидрогенераторов данного типа разработана проектная система, которая включает синтез оптимальной геометрии и электромагнитный и тепловой анализ рассчитанной конструкции. В статье представлен заключительный этап анализа – оценка установившегося теплового состояния генератора при номинальной нагрузке.

Постановка задачи. Термический анализ генератора очень важен, потому что изоляция обмоток и постоянные магниты имеют температурные пределы, которые определяют срок службы машины и ее надежность [12-14].

Основными источниками тепла в генераторе с постоянными магнитами являются: потери в меди (электрические) и потери в стали (магнитные). Наиболее значительными из них являются потери меди. Это потери в якорной обмотке переменного тока и потери в обмотке возбуждения, питающейся от источника постоянного тока.

В конструкции с внешним ротором статор размещается внутри машины, что затрудняет отвод тепла от внутренней части машины.

Уменьшение потерь в меди может быть достигнуто путем увеличения поперечного сечения проводников в обмотке статора и обмотки возбуждения.

В машинах переменного тока поверхностный эффект оказывает влияние на сопротивление обмотки и, следовательно, на величину потерь меди. Влияние поверхностного эффекта можно уменьшить, выбрав более низкую частоту тока в обмотке. Кроме того, можно уменьшить поверхностный эффект, разделив эффективные проводники обмотки статора на элементарные проводники с меньшим эквивалентным диаметром.

Потери в стали сильно зависят от конструкции магнитопровода генератора. Как правило, потери в стали создаются изменением магнитного поля вследствие вращения постоянного магнита и изменения магнитного поля, замыкающегося по магнитопроводу. Наибольшие магнитные потери можно обнаружить в зубцах статора машины с постоянными магнитами, поскольку на этих участках плотность магнитного потока максимальна [15].

Следует отметить, что тепловой анализ представляет собой сложную техническую задачу. Проведем его в два этапа.

На первом этапе сделаем анализ теплового состояния на основе метода тепловых схем замещения.

На втором этапе для расчета поля температур генератора применим метод конечных элементов, реализованный программой Ansys Icepak [17-18].

Анализ теплового состояния генератора на основе метода тепловых схем замещения. На рис. 2 представлен эскиз генератора и направление тепловых потоков от электрических и магнитных потерь.

На основе данного эскиза можно составить тепловую схему замещения генератора (рис. 3).

Определим тепловые сопротивления схемы замещения.

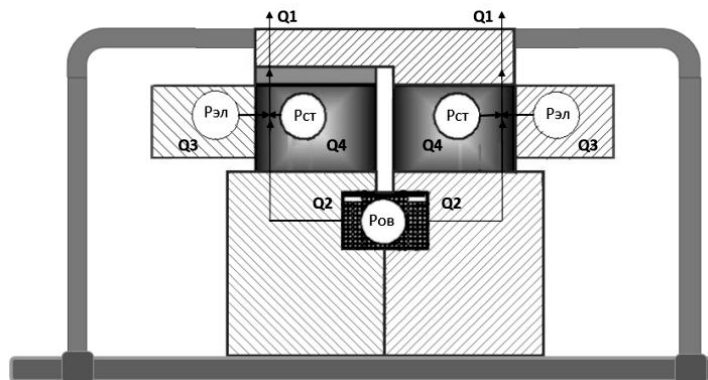


Рис. 2. Схема передачи электрических и магнитных потерь в генераторе комбинированного возбуждения

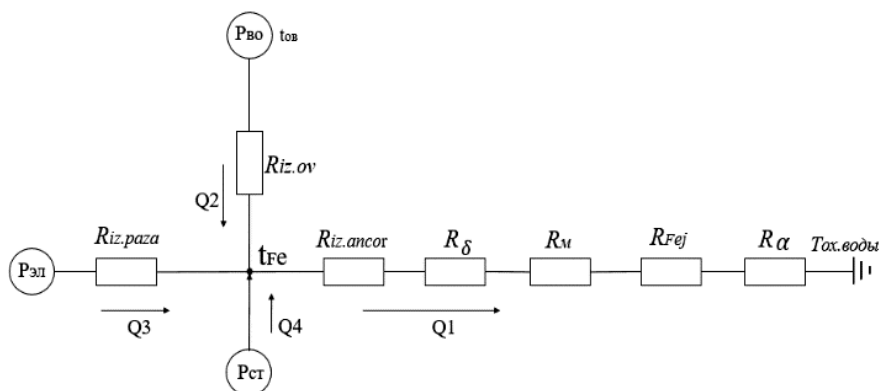


Рис. 3. Тепловая схема замещения генератора комбинированного возбуждения

Тепловое сопротивление потока, идущего через стенки пазов якоря в зубцовую зону и спинку статора:

$$R_{iz.paza} = \frac{\Delta_{iz.paza}}{\lambda_{iz} \cdot S_{iz.paza}}, \quad (1)$$

где Δ_{izpaz} – толщина изоляции паза; S_{izpaz} – площадь изоляции всех пазов; λ_{iz} – теплопроводность изоляции.

Тепловое сопротивление потока проходящего через стенки катушки обмотки возбуждения в железо статора:

$$R_{iz.ov} = \frac{\Delta_{iz.ov}}{\lambda_{iz.ov} \cdot S_{iz.ov}}, \quad (2)$$

где Δ_{izov} – толщина изоляции обмотки возбуждения; S_{izov} – площадь изоляции обмотки возбуждения;

Тепловое сопротивление движению потока в стали статора:

$$R_{iz.ancor} = \frac{h_{zyb}}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe.ancor}}, \quad (3)$$

где h_{zyb} – высота зубца; $S_{Feancor}$ – площадь сечения для теплового потока при его движении в железе якоря; λ_{Fe} – теплопроводность стали.

Тепловое сопротивление воздушного зазора

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\lambda_{\delta} \cdot S_{\delta}}, \quad (4)$$

где δ – величина воздушного зазора; S_{δ} – площадь воздушного зазора; λ_{δ} – теплопроводность воздуха.

Тепловое сопротивление движению потока в магните:

$$R_m = \frac{h_m}{\lambda_{Fe} \cdot S_m}, \quad (5)$$

где h_m – высота магнита; S_m – площадь сечения для теплового потока при его движении в магните.

$$R_{Fej} = \frac{h_j}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fej}}, \quad (6)$$

где h_j – высота спинки индуктора; S_{Fej} – площадь сечения для теплового потока при его движении в индукторе.

Тепловое сопротивление схода тепла с внешней поверхности генератора:

$$R_a = \frac{1}{\alpha \cdot S_{gen}}, \quad (7)$$

где α – коэффициент схода тепла с внешней поверхности генератора; S_{gen} – площадь внешней поверхности генератора.

Для тепловой схемы замещения можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} P_{эл} + P_{ов} + P_{сш} &= Q1 \\ t_{об} - t_{Fe} &= P_{эл} \times R_{из.паза} \\ t_{ов} - t_{Fe} &= P_{ов} \times R_{из.паза} \\ t_{Fe} - t_{ок.воды} &= Q \times (R_{Fe} + R_{лсх}) \end{aligned} \quad (8)$$

Для решения тепловой задачи с использованием метода тепловых схем замещения была разработана модель в программной среде Matlab (рис. 4). С использованием данной расчетной модели для генератора 3 кВт, потерями в якорной обмотке 300 Вт, в обмотке возбуждения 50 Вт, потерями в стали 100 Вт и температуре окружающей среды 20°C получились следующие расчетные результаты:

- температура в железе статора 73°C;
- температура в обмотке якоря 92°C;
- температура в обмотке возбуждения 79°C.

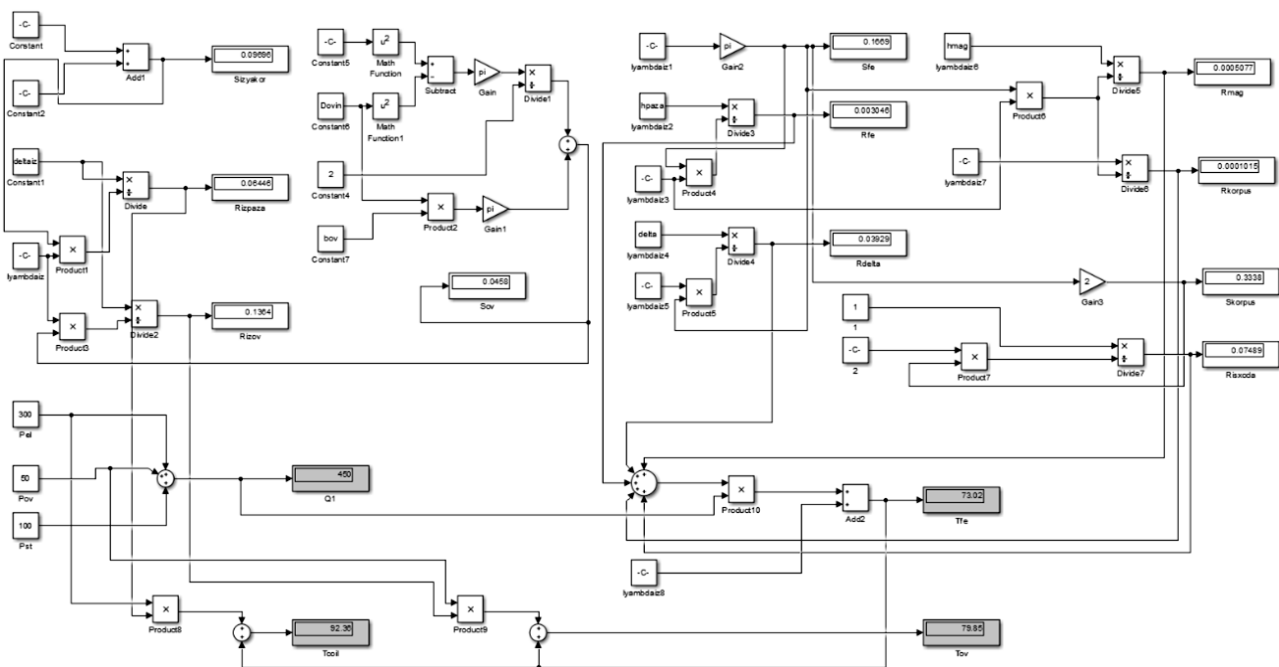


Рис. 4. Тепловая модель генератора в программе Matlab

Анализ теплового состояния генератора на основе метода конечных элементов. Расчет теплового состояния на основе метода конечных элементов является трудоемким, но более точным методом [16]. Реализуем этот метод по следующей расчетной схеме.

Первоначально выполним расчет электромагнитного состояния генератора в программе Ansys Electronics Desktop. По результатам этого расчета более точно определим потери в стали, в меди обмотки якоря и меди обмотки возбуждения. Далее

передадим данные в программную оболочку Workbench. Она является связующим звеном с программой теплового расчета. На следующем этапе передадим данные непосредственно в программу расчета теплового поля Iserack.

Первоначально выполним расчет электромагнитного состояния генератора в программе Ansys Electronics Desktop. По результатам этого расчета более точно определим потери в стали, в меди обмотки якоря и меди обмотки возбуждения. Далее передадим данные в программную оболочку Workbench. Она является связующим звеном с программой теплового расчета. На следующем этапе передадим данные непосредственно в программу расчета теплового поля Iserack. Таким образом, мы решаем связанную магнитодинамическую и термодинамическую задачи.

Данная расчетная схема представлена на рис. 5.

В программе Iserack производится окончательная настройка тепловой задачи.

- уточняются материалы с учетом их термодинамических свойств;
- задаются размеры области, в которой осуществляется теплообмен;
- задается скорость охлаждающего агента и характер его движения (ламинарное, турбулентное);
- настраивается расчетная сетка.

Тепловой расчет осуществляется итерационным способом, в процессе которого уточняется сетка разбиения на конечные элементы и определяется сходимость вычислительного процесса (рис. 6).

В результате расчета определяется температура в каждом элементе, на которые разбита модель генератора. Таким образом, мы можем рассчитать поле температур в отличие от интегральной температуры, которая определяется методом тепловых схем замещения.



Рис. 5. Схема теплового расчета

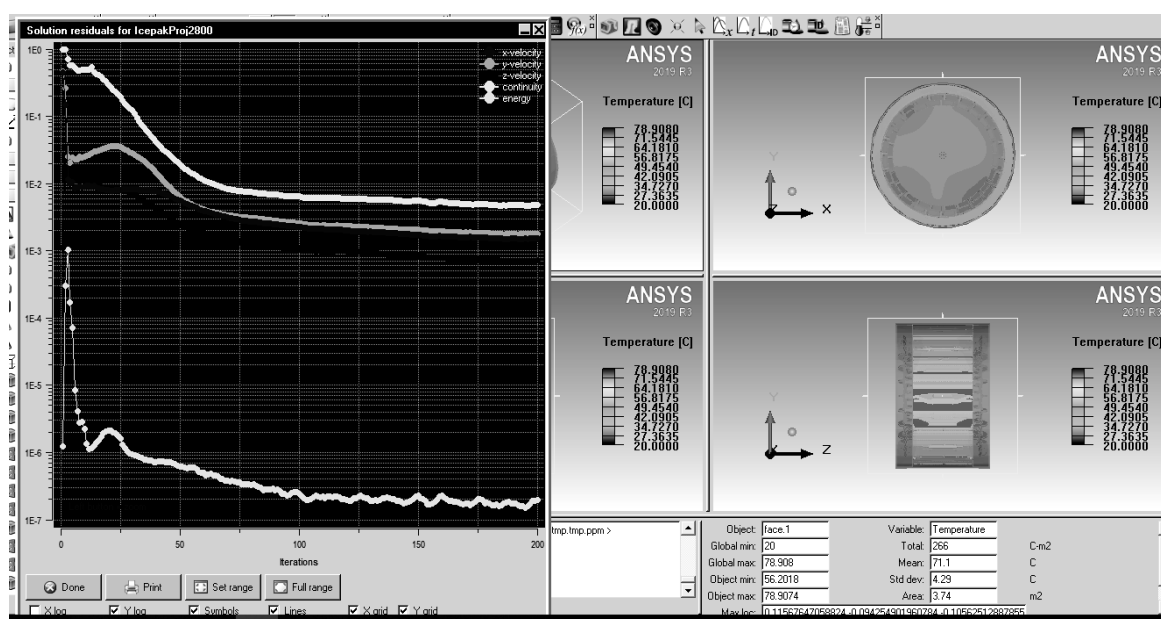


Рис. 6. График сходимости теплового процесса

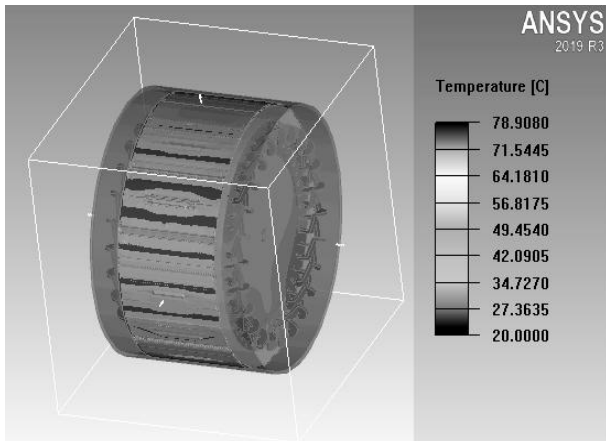


Рис. 7. Поле температур в объеме генератора

Распределение температуры для 3D модели, содержащей ротор, статор, катушки и магниты, показано на рис. 7, 8.

Наиболее нагретыми частям в генераторе комбинированного возбуждения является обмотка якоря и обмотка возбуждения. Их температуры составили около 80°C.

По результатам расчета методом тепловой схемы замещения эти температуры получились для обмотки якоря 80°C, а для обмотки возбуждения 72°C.

Следует отметить, что температуры, рассчитанные двумя разными методами, достаточно близки, при этом метод тепловых схем замещения дает более пессимистическую картину по нагреву для обмотки якоря. Это можно объяснить тем, что в схеме замещения не учитывается сход тепла с лобовых частей обмотки.

Данные температуры не превышают пределы для выбранного класса изоляции С даже при работе в продолжительном режиме.

Заключение

Энергетический потенциал малых и средних рек на практике используется недостаточно эффективно, несмотря на то, что он в несколько раз превышает этот показатель для больших рек. Для решения этой проблемы предлагается водопогружной гидрогенератор

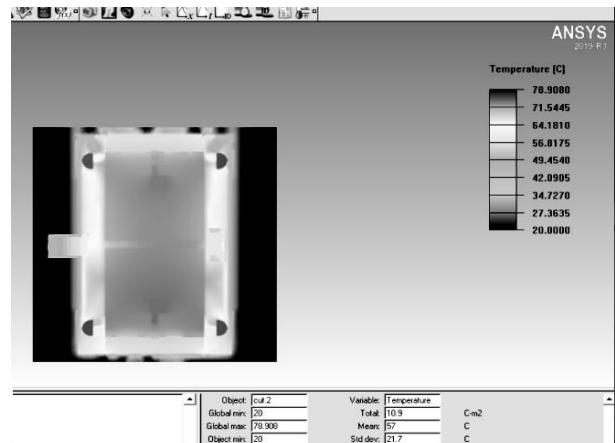


Рис. 8. Поле температур в сечении генератора

с электрической машиной комбинированного возбуждения. Данное техническое решение позволяет уменьшить габариты и вес гидрогенератора и существенно упростить электронную систему управления за счет стабилизации выходного напряжения по слабо-слаботочной цепи стабилизации выходного напряжения по слабо-слаботочной цепи возбуждения. Для создания генераторов этого типа разработана проектная система синтеза оптимальной конструкции и анализа электромагнитного и теплового состояния. В работе представлены результаты теплового расчета с применением двух методов: метода тепловых схем замещения и метода конечных элементов. Оба метода дали близкие значения расчетных температур, при этом метод тепловых схем замещения показывает их более высокие значения. Расчеты были выполнены для гидрогенератора 3 кВт, 220 В, 350 об/мин. Данный подход в оценке теплового состояния можно рекомендовать для анализа других типов электрических машин.

Работа выполнена в ЮУрГУ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00327). Автор благодарит руководство университета за возможность провести данное исследование.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аминов Д.С.** Использование малых гидроэлектростанций в качестве возобнов-

ляемых источников энергии / Д.С. Аминов, Б.И. Косимов, Р.Р. Ниматов // Курганская

государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева. 2018. С. 70-75.

2. **Ганджа С.А.** Разработка водопогружного гидрогенератора в качестве возобновляемого источника электроэнергии малых рек / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов // Десятая научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ. 2018. С. 82-86.

3. **Ганджа С.А.** Тенденции использования малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии в странах центральной Азии / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. 2019. № 2. С. 4-10.

4. **Park H.-S.** Hybrid phase excitation method for improving efficiency of 7-phase BLDC motors for ship propulsion systems / H.-S. Park, D.-Y. Kim, J.-M. Kim // Journal of Power Electronics. 2019. № 19 (3). P. 761-770.

5. **Ганджа С.А.** Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2019. № 4. С. 102-111.

6. **Gandzha S.** Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov // Proceedings-2018: International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018. № 8544320. P. 282-287.

7. **Gandzha S.** Application of the combined excitation submersible hydrogenerator as an alternative energy source for small and medium rivers / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915294.

8. **Omri R.** Characterization on the no-and on-load operations of an improved claw pole machine / R. Omri, A. Ibala, A. Masmoudi // 13th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2018. P. 1-8.

9. **Ганджа С.А.** Математическое моделирование постоянного магнита для опти-

мизации вентильных электрических машин возобновляемых источников энергии / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов // Наука ЮУрГУ. 2018. С. 420-428.

10. **Rebhi R.** MEC-based sizing of a hybrid-excited claw pole alternator / R. Rebhi, A. Ibala, A. Masmoudi // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. № 51 (1). 6837424. P. 211-223

11. **Gandzha S.** Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), ECF Paper 25-29 March 2019 Sochi, Russia. DOI: 10.1109 / ICIEAM.2019.8742976.

12. **Gandzha S.** Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor / S. Gandzha, B. Kosimov, D. Aminov // Machines. 2019. № 7 (4). P. 65. <https://doi.org/10.3390/machines7040065>.

13. **Jurca F.** Claw-Pole generator parameters and steady-state performances analysis / F. Jurca, C. Martis // International Review on Modelling and Simulations. 2013. № 6(1). P. 41-48.

14. **Gandzha S.** Development of a system of multi-level optimization for Brushless Direct Current Electric Machines / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural Con). 1-3 Oct. 2019 Chelyabinsk, Russia, 2019. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877650.

15. Study of the thermal aspects in brushless permanent magnet machines performance / M. Popescu, D. Staton, G. Dorelli, F. Marignetti // Electrical Machines Design Control and Diagnosis. 2013. P. 60-69.

16. **Chin Y.K.** Thermal analysis – lumped-circuit model and finite element analysis / Y.K. Chin, D.A. Staton // 7th AFRICON Conference, Africa. 2004. P. 1027-1035.

17. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov,

I. Kiessh // Global Smart Industry Conference (GloSIC) 13-15 Nov. 2018. Chelyabinsk, Russia, 2018. DOI: 10.1109 / GloSIC.2018.8570132.

18. Design of Performance and Parameter Measurement System for Brushless Direct Current (BLDC) Motor Proceeding / A.F. Desanti, I. Sidharta, H. Erwantono, M. Wahyudi // International Seminar on Intel-

ligent Technology and Its Application, ISITIA, 2018. P. 175-179.

19. Ганджа С.А. Генератор переменного тока / С.А. Ганджа, Е.В. Саломин, А.Д. Шауфлер // Патент РФ 2244996. Номер заявки: 2003124088/09, дата регистрации: 31.07.2003, дата публикации: 20.01.2005. <http://www.freepatent.ru/patents/2244996>.

Аминов Дилшод Саидович – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск

Dilshod S. Aminov – Postgraduate, Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University, Chelyabinsk

Статья поступила в редакцию 20. 01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УДК 620.197.5:621.314.5

АКТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ УСТАНОВОК КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

И.И. Артюхов, Ф.П. Мироедов, Д.И. Артюхов

CURRENT STATUS AND NEW TRENDS IN DESIGNING CATHODIC PROTECTION POWER SUPPLY SYSTEMS

I.I. Artyukhov, F.P. Miroedov, D.I. Artyukhov

В настоящее время для электрохимической защиты трубопроводов применяют установки, которые получают электрическую энергию от вдольтрассовых линий электропередачи напряжением 6 или 10 кВ. Строительство и монтаж комплекса сооружений, обеспечивающего передачу электроэнергии от централизованных источников до мест размещения установок катодной защиты и преобразование ее параметров до необходимого уровня, характеризуется существенными капитальными затратами. При этом силовое электрооборудование имеет низкий коэффициент использования. В этих условиях возникает вопрос о возможности и целесообразности

Currently, the devices that receive electric energy from long-distance power lines with a voltage of 6 or 10 kV are used for electrochemical protection of pipelines. The construction and installation of a complex of facilities that ensure transmission of electricity from the centralized sources to the location of cathodic protection devices and conversion of its parameters to the required level is characterized by significant material costs. At the same time, the power equipment has a low utilization rate. Under these conditions, the question arises as to the possibility and expediency of a radical change in the approach to building a system of electrochemical protection using renewable energy sources. This paper describes the fea-

радикального изменения подхода к построению системы электрохимической защиты за счет применения возобновляемых источников энергии. В статье рассматриваются особенности характеристик фотоэлектрических преобразователей как источников питания установок катодной защиты, предлагаются и анализируются варианты схемной реализации.

Ключевые слова: установка катодной защиты, система электропитания, фотоэлектрический преобразователь

Основным материалом, из которого изготавливаются магистральные трубопроводы, является сталь, которая в процессе эксплуатации подвергается коррозии под воздействием окружающей трубопровод среды. При этом различают коррозию наружной стенки и коррозию внутренней стенки трубопроводов. На коррозию наружной стенки трубопроводов приходится около 95% отказов, и всего лишь 5% – на коррозию внутренней стенки трубопроводов. Этот факт объясняется тем, что магистральные трубопроводы используются для транспорта подготовленных коррозионно-инертных продуктов.

Защита от коррозии подземных и морских трубопроводов независимо от коррозионной агрессивности коррозионной среды осуществляется с помощью комплексной защиты, включающей защитные покрытия (пассивную защиту) и электрохимическую защиту (активную защиту) [1].

Первичная защита трубопроводов от коррозии осуществляется изоляционными покрытиями. Они обеспечивают пассивную защиту трубопроводов от коррозии и препятствуют соприкосновению металла трубопровода с коррозионно-опасной средой (водой, кислородом, воздухом и др.).

При образовании в изоляционном покрытии дефектов и оголении металла трубы защита от коррозии осуществляется системой электрохимической защиты (ЭХЗ) [2]. Такая защита называется активной. Сущность ЭХЗ защиты заключается в искусственной поляризации трубопровода (катада) таким образом, чтобы его потенциал сместился в отрицательную сторону. В результате смещения

potentials of photovoltaic converters as power sources for cathodic protection devices. The variants of circuit implementation are proposed and analyzed.

Keywords: cathodic protection station, power supply system, photoelectric converter

потенциала катада в отрицательную сторону работа коррозионной пары прекращается. Но необходимо учесть, что это может быть лишь при потенциале, находящемся в определенных границах, и соответствующей силе защитного тока. Защитная поляризация катада может быть осуществлена наложением защитного потенциала от источника постоянного тока или применением в качестве дополнительного анода материалов, собственный потенциал которых более отрицателен, чем материал катада.

Электрохимическая защита трубопровода от коррозии осуществляется с помощью установок катодной защиты (УКЗ), в состав которых входят следующие элементы:

- а) источник постоянного тока;
- б) анодное заземление;
- в) медно-сульфатный электрод сравнения;
- г) защитное заземление;
- д) катодный вывод трубопровод (дренажный кабель);
- е) соединительные электролинии.

На магистральных газопроводах применяют преимущественно глубинные анодные заземлители, предназначенные для сооружения контура заземляющего устройства (анодного поля), который обычно состоит из нескольких заземлителей, включенных параллельно.

Составными цепями электрической цепи УКЗ является защищаемый трубопровод и участок грунта, замыкающий анодный и катодный участки электрической цепи.

Принципиальная схема катодной защиты показана на рис. 1. Отрицательный полюс

источника тока 2 подключен к трубопроводу 1, а положительный – к искусственно созданному аноду-заземлителю 3. При включении источника ток от положительного полюса через анодное заземление поступает в грунт и через поврежденные участки изоляции 6 – на трубу. Далее через точку дренажа 4 по соединительному проводу 5 ток возвращается снова к минусу источника питания. При этом на оголенных участках трубопровода начинается процесс катодной поляризации.

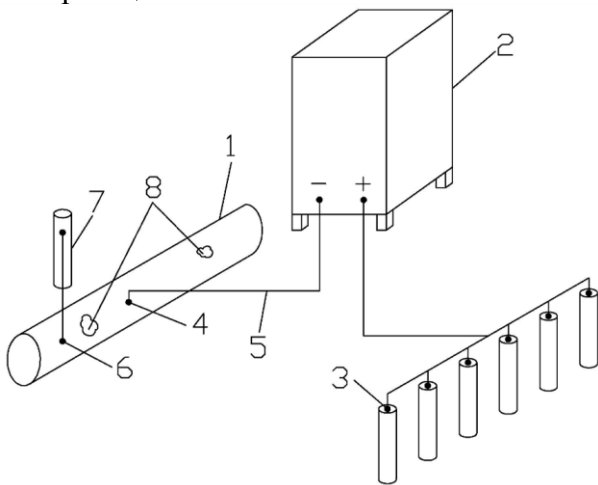


Рис. 1. Схема катодной защиты трубопровода:
1 – трубопровод; 2 – внешний источник постоянного тока; 3 – анодное заземление;
4 – точка дренажа; 5 – дренажный кабель;
6 – контакт катодного вывода;
7 – катодный вывод; 8 – повреждения изоляции трубопровода

В состав ЭХЗ трубопроводов от коррозии входят также медно-сульфатные электроды сравнения [1]. Их используют для контроля потенциалов подземных стальных сооружений, таких как газопроводы, нефтепроводы, водопроводы, теплотрассы, подземные резервуары и т.п. При измерении электрохимического потенциала указанный электрод устанавливается в грунт, и между ним и сооружением измеряется потенциал, по величине которого судят о степени защищенности сооружения от коррозии.

Каждая УКЗ в зависимости от коррозионных свойств грунта, качества изоляции, мощности самой станции может защитить трубопровод на участке определённой длины. В пределах этой длины защитный по-

тенциал, создаваемый УКЗ, обеспечивает отсутствие на катоде (трубопроводе) электрохимической коррозии. В то же время анод (заземление) вследствие активизации анодного процесса интенсивно разрушается. Наибольшее значение разности потенциалов в пределах длины участка фиксируется обычно напротив анода, т.е. заземления.

ЭХЗ обеспечивается в том случае, если поляризационный потенциал удовлетворяет определенным критериям. Для подземных металлических сооружений разность потенциалов (относительно медносульфатного электрода сравнения) должна быть более отрицательной, чем минус 0,85 В. Критерий установлен Робертом Дж. Куном. Многочисленные дальнейшие исследования подтвердили, что при этой защитной разности потенциалов скорость коррозии значительно снижается (для сталей, находящихся в наиболее распространённых коррозионных средах – менее 0,1 мм в год) [3].

Электроснабжение УКЗ осуществляется, как правило, по третьей категории надёжности [4]. Технологические объекты, электроприемники и комплексы электроприемников третьей категории могут снабжаться электроэнергией от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают 1 суток. В качестве источников питания могут использоваться линии электропередачи 0,4-20 кВ или автономные источники питания. При этом установкам ЭХЗ на участках с блуждающими токами и (или) с высокой коррозионной агрессивностью среды при отсутствии средств дистанционного мониторинга может быть присвоена вторая категория надёжности электроснабжения.

Осуществление катодной защиты в районах, отдаленных от сетей централизованного электроснабжения, вызывает большие трудности, связанные с тем, что для ее реализации необходимо сооружение линий электропередачи вдоль трассы трубопровода.

Типовая схема электроснабжения установок, обеспечивающих ЭХЗ магистрального газопровода, показана на рис. 2. В со-

став каждой установки входит преобразователь UZ, который через автоматический выключатель QF запитан от вторичной обмотки трансформатора Т с напряжением 220 В. Первичная обмотка трансформатора через разъединитель QS и предохранитель FU подключена к вдольтрассовой линии электропередачи с напряжением 6(10) кВ, которая запитывается от соответствующих шин комплектной трансформаторной подстанции (КТП) на компрессорной станции, чаще всего от шин КТП для электроснабжения установок охлаждения газа [5]. Преобразователь UZ является источником постоянного напряжения, положительная клемма которого соединяется с анодным заземлением, а отрицательная подключается к защищаемому трубопроводу. В современных УКЗ величина выходного напряжения регулируется автоматически, исходя из условий обеспечения ЭХЗ [6]. Величина этого напряжения не превышает несколь-

ких десятков вольт. При этом мощность, потребляемая станциями катодной защиты, составляет 0,5-5 кВт.

Необходимо отметить, что в научно-технической литературе часто применяется термин «станция катодной защиты (СКЗ)». Термином СКЗ обозначают низковольтную часть установки ЭХЗ, т.е. фактически преобразователь UZ в схеме на рис. 2.

В настоящее время в эксплуатации находится широкая гамма УКЗ, отличающихся топологией схемы и набором характеристик. На объектах магистрального транспорта газа применяют два типа преобразователей, входящих в состав УКЗ. Первый типа преобразователей – это выпрямители, которые подключаются к сети переменного тока через трансформатор. Второй тип – это так называемые инверторные преобразователи, в которых используется принцип промежуточного звена повышенной частоты [7].

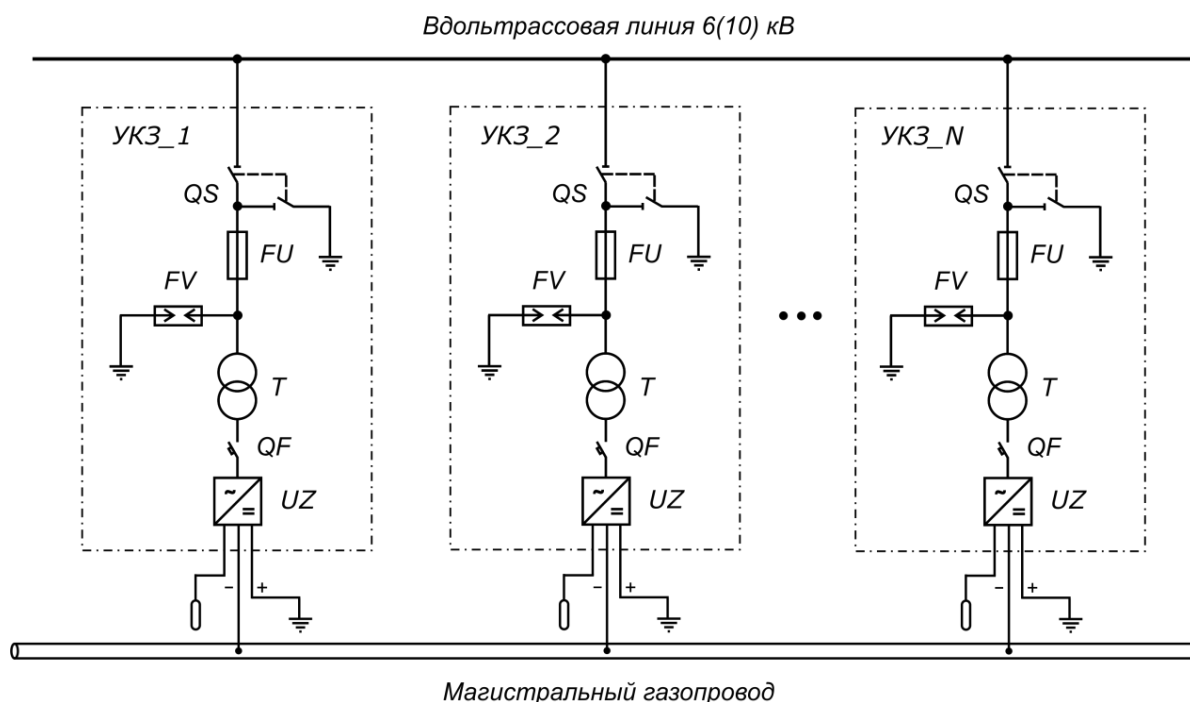


Рис. 2. Типовая схема электроснабжения установок катодной защиты

На рис. 3 показана схема преобразователя, в котором регулирование силы защитного тока производится тиристорами за счет импульсно-фазового управления. В этой схеме питающее напряжение 220 В понижается до заданного уровня транс-

форматором Т1 и подается на выводы переменного тока выпрямителя. Анодная группа выпрямителя выполнена на диодах VD1и VD2, катодная – на тиристорах VS1 и VS2. С помощью системы импульсно-фазового управления осуществляется изме-

нение фазы импульсов, подаваемых на управляющие электроды тиристоров VS1, VS2 и соответствующее изменение выходного напряжения выпрямителя. Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока предусмотрен дроссель LD.

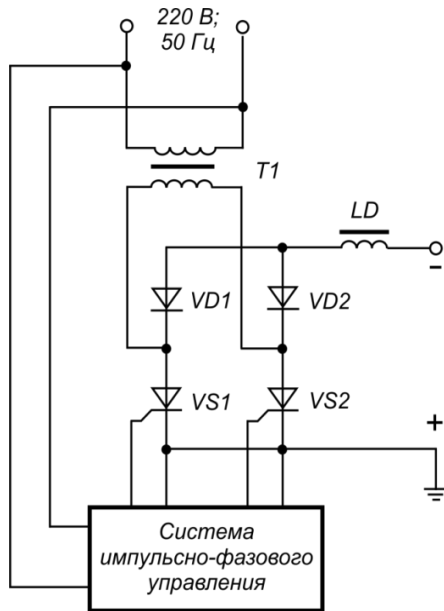


Рис. 3. Схема регулируемого преобразователя с входным трансформатором

Схема на рис. 3 имела широкое распространение до конца прошлого века. В ряде изделий она применяется и в настоящее время. Достоинствами УКЗ с тиристорными преобразователями являются:

- высокая надежность;
- простота конструкции, позволяющая организовать ремонт станции на местах силами специалистов службы ЭХЗ.

К недостаткам УКЗ с тиристорными преобразователями относится:

- низкий КПД даже на номинальной мощности;
- выходной ток имеет недопустимо большие пульсации;
- большой вес установки;
- отсутствие корректоров мощности;
- большое количество меди в силовом трансформаторе.

Разработка полупроводниковых ключей, позволяющих осуществлять преобразование энергии с малыми ее потерями на повышенных частотах (20 кГц и выше) и раз-

витие теории применения этих приборов привели к созданию нового класса УКЗ с преобразователями инверторного типа.

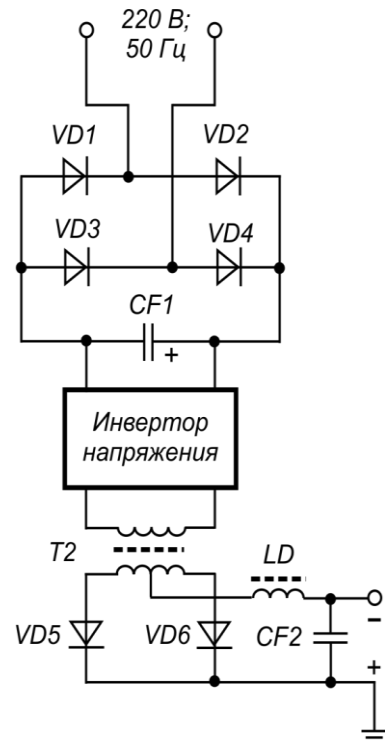


Рис. 4. Схема регулируемого преобразователя со звеном повышенной частоты

В схеме на рис. 4 напряжение 220 В вначале выпрямляется диодами VD1-VD4, фильтруется конденсатором CF1, а затем инвертором напряжения преобразуется в переменное напряжение повышенной частоты. Трансформатор T2 снижает это напряжение до необходимой величины. После выпрямления его диодами VD5 и VD6 формируется постоянное напряжение, которое через фильтр LD, CF2 подается в цепь защиты трубопровода. Величина выходного напряжения преобразователя регулируется за счет широтно-импульсной модуляции инвертора.

К достоинствам УКЗ с инверторными преобразователями можно отнести:

- высокий КПД;
- низкий уровень пульсаций выходного тока;
- малый вес (типичный вес станции с мощностью в 1 кВт ~ 8...12 кг);
- компактность;
- малое количество меди в станции;

- высокий коэффициент мощности (при наличии корректора, что является обязательным требованием ГОСТа);

- легкость оперативной замены станции (преобразователя мощности) даже одним человеком, особенно при модульном исполнении станции.

К недостаткам относятся:

- отсутствие возможности ремонта в мастерских служб ЭХЗ;

- более низкая по сравнению с тиристорными надежность станции, определяемая существенно большей сложностью, большим количеством компонентов и чувствительностью ряда из них к скачкам напряжения во время грозы и при автономной системе электроснабжения.

Однако в последнее время ряд производителей поставляют УКЗ с установленными блоками грозозащиты и стабилизаторами напряжения, что существенно увеличивает их надёжность.

Возможны различные варианты конструктивного исполнения УКЗ при электропитании от сетей 6(10) кВ. На объектах магистрального транспорта газа получили применение устройства катодной защиты, внешний вид которых показан на рис. 5. Высоковольтный воздушный ввод осуществляется посредством разъединителя, выводы линий постоянного тока – кабельные. Для создания нормальной работы низковольтной аппаратуры предусмотрен обогрев. УКЗВ устанавливается на фундаменте или постаменте.

Сооружение вдольтрассовой линии 6(10) кВ для электроснабжения только установок ЭХЗ является затратным мероприятием. При этом силовое электрооборудование имеет низкий коэффициент использования. Поэтому является актуальной проблема применения автономных источников питания, в частности возобновляемых источников энергии [8].

В районах, где ветровые условия благоприятны для использования энергии ветра (обычно это районы со среднегодовыми скоростями ветра более 4,5 м/с), для электроснабжения маломощных потребителей целесообразно применение ветроэлектрических агрегатов [9].



Рис. 5. Высоковольтная установка катодной защиты

В начале 1960-х годов была разработана ветроэлектрическая станция КСВ-5-61 для катодной защиты магистральных трубопроводов, включающая ветроэлектрический агрегат ВЭС-1-5, имеющий диаметр ветроколеса 5 м, и резервную аккумуляторную батарею, заряд которой осуществлялся от генератора ветроагрегата через понижающий трансформатор и выпрямитель. Станция позволяла изменять выходное напряжение постоянного тока на клеммах выпрямителя от 5,4 до 36 В ступенями через 1,8 В. Станция была рассчитана на применение щелочных кадмий-никелевых аккумуляторов с последовательным соединением от 3 до 20 аккумуляторов. Включение аккумуляторов на заряд и прекращение заряда осуществлялось автоматически с помощью схемы, составленной из нескольких электромагнитных реле. Катодная станция эксплуатировалась на ряде участков магистральных газопроводов страны, но широкого применения не получила. Одной из причин этого явилась недостаточная мощность станции.

В 1975 г. в институте ВНИИЭМ была разработана новая ветроэнергетическая установка для электропитания систем катодной защиты типа ВЭУ-К, источником энергии для которой служили 2 ветроэлектрических

агрегата АВЭУ-6-2 мощностью 2 кВт каждый. Трехфазное напряжение 230 В и частотой 50 Гц, развиваемое генераторами ветроэлектрических агрегатов, регулировалось блоком возбуждения, затем понижалось трансформатором до 50 В и поступало на выпрямитель. Выходы выпрямителей обоих ветроагрегатов соединялись параллельно и подключались к буферной аккумуляторной батарее напряжением 54 В. Напряжение, подаваемое в систему катодной защиты с зажимов аккумуляторной батареи, понижалось до требуемого (12-24 В) посредством бесконтактного широтно-импульсного регулятора напряжения.

В зависимости от скорости ветра установка ВЭУ-К была предназначена для работы в одном из трех режимов:

- скорость ветра более 6 м/с – суммарная мощность, развиваемая ветроэлектрическими агрегатами, превышает мощность, потребляемую системой катодной защиты, – буферная аккумуляторная батарея заряжается при избытке мощности;

- скорость ветра от 3 до 6 м/с – суммарная мощность, развиваемая ветроэлектрическими агрегатами, меньше мощности, необходимой для питания системы катодной защиты, – дефицит мощности компенсируется энергией, отдаваемой аккумуляторной батареей;

- скорость ветра меньше 3 м/с (энергетический штиль) – электропитание системы катодной защиты осуществляется только за счет энергии, запасенной в аккумуляторной батарее.

Если в результате длительного энергетического штиля аккумуляторная батарея оказывалась разряженной до нижнего предельно допустимого уровня, подача электроэнергии в систему катодной защиты во избежание чрезмерного разряда батареи автоматически прекращалась. Аккумуляторная батарея для защиты от атмосферного воздействия располагалась в подземном бункере, причем аккумуляторы были помещены в герметические контейнеры, снабженные газоотводом.

Несмотря на положительные результаты межведомственных испытаний установки ВЭУ-К (1976 г.), она не нашла широкого

применения из-за дефицита аккумуляторов и сложности организации их обслуживания в условиях отдаленности от населенных пунктов и магистральных дорог.

В настоящее время интерес к ветроэнергетическим установкам как к источникам электропитания систем катодной защиты возобновляется. Об этом факте свидетельствуют нормативно-технические документы в области технологического проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов [2, 4].

Другим видом альтернативной энергии, который может быть эффективно использован при построении систем электропитания для установок катодной защиты, является солнечная энергия. Правильно спроектированная фотоэлектрическая система позволит избежать дорогостоящего расширения электросети, либо использования генераторов, работающих на углеводородном топливе и имеющих высокую стоимость обслуживания из-за необходимости техобслуживания и заправки.

Исследования в области применения фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения установок ЭХЗ активно ведутся, прежде всего, в странах с большим потенциалом солнечной энергии [10–13]. Однако климатические условия ряда регионов России также позволяют использовать солнечную энергию для питания установок ЭХЗ. Вопросы построения и расчета систем электроснабжения установок ЭХЗ с применением фотоэлектрических преобразователей нашли отражение в [14, 15] и других работах. Причем интерес к фотоэлектрическим преобразователям как источникам энергии для электроснабжения установок ЭХЗ в последнее время возрастает в связи с улучшением технических и стоимостных характеристик фотоэлектрических преобразователей.

Упрощенная структурная схема УКЗ с питанием от солнечных панелей (СП) показана на рис. 6. Энергия, необходимая для обеспечения заданного режима работы УКЗ, поступает на регулятор катодного тока либо от СП, либо от батареи аккумуляторов. Управление потоками энергии осуществляет контроллер заряда-разряда.

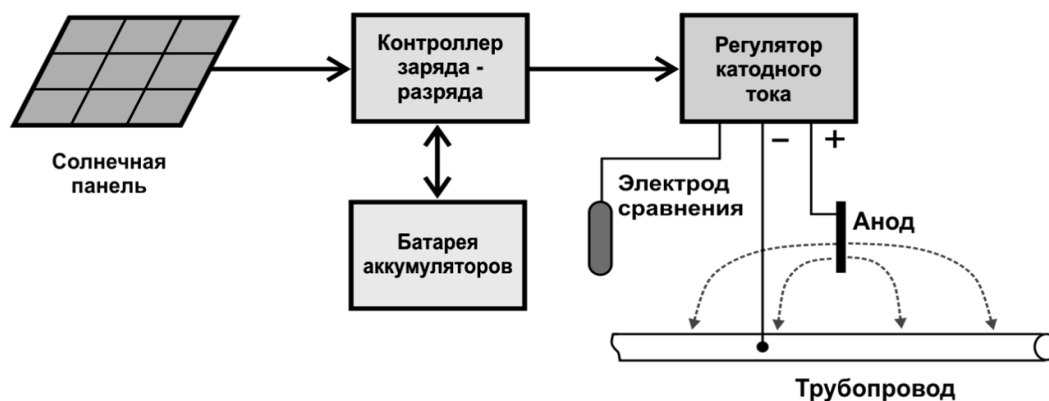


Рис. 6. Схема установки катодной защиты с электропитанием от солнечной панели

Внешний вид УКЗ с электропитанием от СП представлен на рис. 7. СП закреплена на опоре. Рядом размещен металлический шкаф с электрооборудованием УКЗ.



Рис. 7. Установка катодной защиты с фотоэлектрической системой электропитания

СП состоит из модулей, каждый из которых набирается из солнечных элементов. Специальными контактными полосками солнечные ячейки с помощью пайки или ультразвуковой сварки соединяются между собой в последовательные группы, которые, в свою очередь, объединяются параллельно. При последовательном соединении солнечных элементов увеличивается напряжение, при параллельном – ток. Количество ячеек, соединенных последовательно, и число групп определяются размером модуля СП.

СП как источники питания УКЗ имеют характерные особенности. Они имеют нелинейные вольт-амперные характеристики (ВАХ), ход которых зависит от уровня

энергетической освещенности и температуры панелей. На рис. 8 показаны ВАХ панели при фиксированной температуре для пяти значений энергетической освещенности $S1 > S2 > S3 > S4 > S5$. Здесь же показаны ВАХ нагрузок для двух значений сопротивления нагрузки $R2 < R1$.

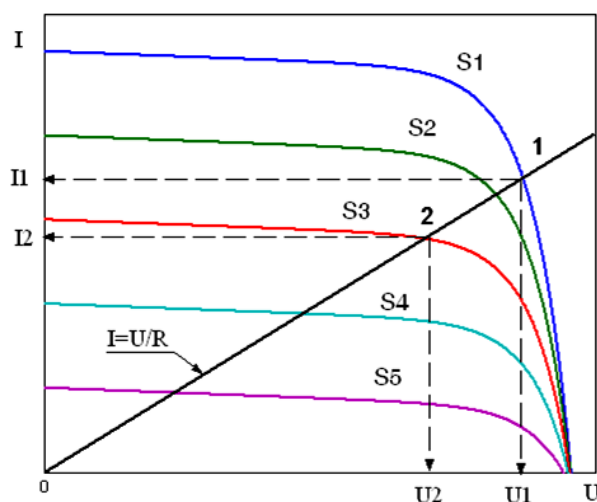


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики солнечной панели при различных значениях энергетической освещенности

Из графиков на рис. 8 видно, что изменения параметров нагрузки приводят к существенному изменению режима солнечной панели. Предположим, что нагрузка солнечной панели имела сопротивление $R1$. При этом напряжение и ток ФЭП имели значения $U1$ и $I1$. Затем происходит уменьшение сопротивления нагрузки от значения $R1$ до значения $R2$. В результате происходит существенное снижение напряжения до значения $U2$ и

незначительное увеличение тока до значения I_2 . Таким образом, СП характеризуется большой величиной выходного сопротивления, что требует применения специальных регулирующих устройств для ее согласования с другими компонентами системы электропитания.

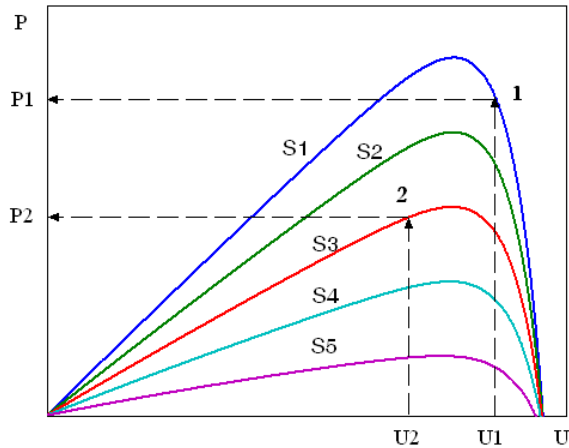


Рис. 9. Зависимость мощности, отбираемой от солнечной панели, от напряжения при различных значениях энергетической освещенности

На рис. 9 показаны графики зависимости мощности панели $P = U \cdot I$ от напряжения U . Из них видно, что зависимости мощности, отбираемой от СП, от напряжения имеют максимумы для каждого значения освещенности. При этом при освещенности S_1 режимная точка 1 находится справа от максимума, при освещенности S_2 режимная точка 2 расположена слева от максимума кривой. И в том, и в другом случае не происходит максимальный отбор мощности от СП.

Для того чтобы повысить эффективность работы УКЗ, в фотоэлектрической системе электропитания необходимо осуществлять слежение за точкой максимальной мощности СП. Принцип построения и работы УКЗ, в которой обеспечивается отбор максимальной мощности от СП, иллюстрируется схемой на рис. 10.

В состав силовой части схемы, кроме СП, входят понижающий преобразователь напряжения, регулятор катодного тока, а также батарея аккумуляторов с контроллером заряда-разряда.

Понижающий преобразователь напряжения выполнен по схеме, которая представлена на рис. 11. Силовой ключ VT управляется через драйвер сигналом, который поступает от микроконтроллера с функцией поиска точки максимальной мощности.

Тактовая частота f_0 импульсного преобразователя зависит от динамических свойств силовых ключей, на которых выполнен преобразователь. В связи с постоянным напряжением на входе преобразователя естественная коммутация силовых ключей невозможна, что требует выполнения его на вентилях с полным управлением (запираемые тиристоры, транзисторы). ГТО-тиристоры (запираемые) допускают частоту переключений до 1 кГц, IGBT-транзисторы – примерно до 10 кГц, полевые транзисторы – примерно до 1000 кГц и выше. Очевидно, что частота коммутации определяет возможную скорость регулирования параметров преобразованной энергии и габариты реактивных элементов.

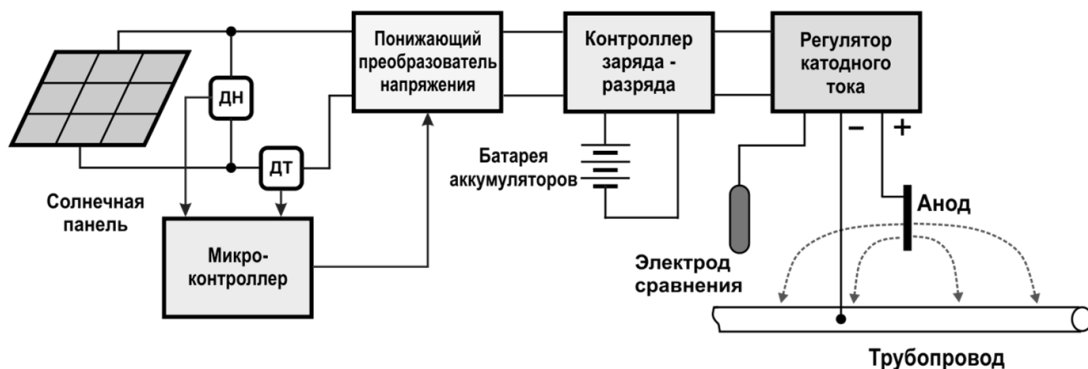


Рис. 10. Схема установки катодной защиты с функцией поиска точки максимальной мощности солнечных панелей

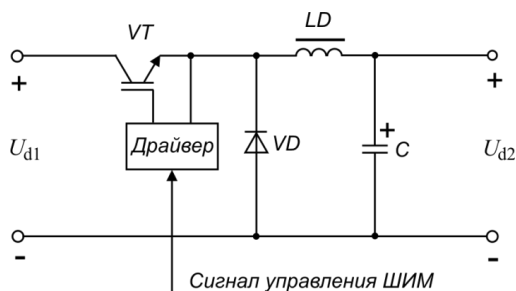


Рис. 11. Схема понижающего преобразователя напряжения

Напряжение U_{d1} подается с выхода солнечной панели. За счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ) происходит регулировка выходного напряжения U_{d2} и изменение эквивалентного сопротивления нагрузки для солнечной панели.

Среднее значение напряжения U_{d2} на выходе импульсного преобразователя зависит от величины входного напряжения U_{d1} и параметра D , который равен отношению длительности импульса напряжения на выходе импульсного преобразователя к длительности такта T_0 , т.е.

$$D = \frac{\tau}{T_0} = \tau \cdot f_0. \quad (1)$$

Таким образом, регулировочная характеристика импульсного преобразователя постоянного напряжения может быть представлена в следующем виде

$$U_{d2} = \psi(D) \cdot U_{d1}. \quad (2)$$

Для преобразователя, выполненного по схеме на рис. 11, регулировочная характеристика имеет вид

$$U_{d2} = D \cdot U_{d1}. \quad (3)$$

Информация с датчиков напряжения ДН и тока ДТ солнечной панели поступает на микроконтроллер, который осуществляет ШИМ сигнала D , управляющего понижающим преобразователем напряжения. На каждом такте работы вычисляется мощность $P_k = U_k I_k$, отбираемая от СП. Затем производится сравнение полученного значения P_k со значением P_{k-1} на предыдущем такте. Кроме того, производится сравнение сигнала управления D_k на данном такте управления с сигналом D_{k-1} на предыдущем шаге. В зависимости от знаков полученных

разностей происходит корректировка сигнала управления в большую или меньшую сторону с заданной дискретностью ΔD_{k-1} . Таким образом, на каждом такте работы системы осуществляется поиск точки максимальной мощности, отбираемой от СП.

Одновременно с поиском точки максимальной мощности в системе электропитания осуществляется контроль состояния батареи аккумуляторов. Когда батарея оказывается полностью заряженной, контроллер отключает ее от солнечной панели, предотвращая тем самым перезаряд и преждевременный выход из строя.

Напряжение U_{d2} подается, в свою очередь, на регулятор катодного тока. К выходу импульсного преобразователя напряжения через контроллер заряда-разряда подключена также батарея аккумуляторов.

Регулятор катодного тока выполнен в виде импульсного повышающего преобразователя по схеме, представленной на рис. 12. Особенностью схемы является то, что она позволяет за счет ШИМ не только регулировать выходное напряжение U_{d3} , но и производить инверсию его полярности.

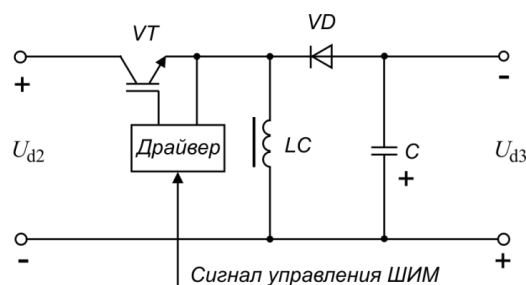


Рис. 12. Схема регулятора катодного тока

Регулировочная характеристика (2) для этого преобразователя имеет вид

$$U_{d3} = \frac{D}{1-D} \cdot U_2. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при $D = 0,5$ выходное напряжение по величине равно входному напряжению, но имеет противоположную полярность. Если $D < 0,5$, то выходное напряжение по величине меньше входного напряжения. И, наоборот, при $D > 0,5$ выходное напряже-

ние по величине больше напряжения на входе преобразователя. Таким образом, изменяя параметр D регулятора катодного тока, можно обеспечить заданное значение потенциала на защищаемом трубопроводе.

Заключение. При написании этой статьи была освещена только малая часть вопросов, которые возникают при создании УКЗ с электропитанием от возобновляемых источников энергии и, в частности, от солнечных панелей. Актуальными

являются вопросы технико-экономической эффективности принимаемых решений, моделирования и расчета УКЗ. Большой интерес представляют задачи обеспечения электромагнитной совместимости, устойчивости системы автоматического управления защитным потенциалом при изменениях параметров окружающей среды и защищаемого объекта. Однако обсуждение этих и большого количества других вопросов выходит за рамки настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита трубопроводов от коррозии / Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков, А.Г. Гумеров и др. СПб.: Недра, 2007. 708 с.
2. СТО Газпром 2-3.5-047-2006. Инструкция по расчету и проектированию электрохимической защиты от коррозии магистральных газопроводов. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2006. 48 с.
3. Бекман В. Катодная защита от коррозии: пер с нем. / В. Бекман, В. Швенк. М.: Металлургия, 1984. 496 с.
4. СТО Газпром 2-6.2-1028-2015. Категорийность электроприемников промышленных объектов ПАО «Газпром». М.: Газпром экспо, 2015. 69 с.
5. Аршакян И.И. Динамические режимы в системах электроснабжения установок охлаждения газа / И.И. Аршакян, И.И. Артюхов. Саратов: СГТУ, 2004. 120 с.
6. Определение оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты магистральных трубопроводов / Н.Н. Скуридин, А.А. Кузнецов, Д.А. Неганов и др. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 4. С.90-94.
7. Егоров Ю.Б. Повышение энергоэффективности и надежности станций катодной защиты / Ю.Б. Егоров, О.Л. Луньков // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 5 (30). С. 46-47.
8. Авдяхин П.Н. Использование станций катодной защиты совместно с возобновляемыми источниками энергии / П.Н. Авдяхин, Р.М. Корчагин // Коррозия Территории Нефтегаз. 2013. № 3 (26). С. 64-65.
9. Артюхов И.И. Применение альтернативных источников энергии в системах электропитания устройств катодной защиты / И.И. Артюхов, Ф.П. Мироедов // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. (г. Камышин, 22-23 дек. 2010 г.). Волгоград: ВолгГТУ, 2011. Т. 1. С. 108-111.
10. Korupp K.H. Photovoltaic Powered Cathodic Corrosion Protection Systems with Advanced System Technologies / K.H. Korupp // Proc. 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Lisbon, Portugal, 1991. P. 854-857.
11. Javadi M. Design an Intelligent Solar Photovoltaic Power for Cathodic Protection System to Protect Under Ground Gas Pipeline / M. Javadi, J. Javidan, M. Salimi // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). 2014. № 1. Iss. 18. Vol. 6. P. 27-33.
12. Javidan J. Energy Management Strategy of Stand-alone Photovoltaic System in Cathodic Protection Pipeline / J. Javidan // Journal of Operation and Automation in Power Engineering. 2016. № 2. Vol. 4. P. 143-152.
13. Kharzi S. Model of a Voltage Regulator for Cathodic Protection System Powered by Solar Photovoltaic Energy / S. Kharzi, M. Haddadi, A. Malek // Proc. International Conference on Modeling and Simulation MS'07 Algiers. 2007. P. 274-277.
14. Артюхов И.И. Применение солнечных панелей для электропитания установок катодной защиты / И.И. Артюхов, Ф.П. Мироедов, Г.Н. Тулепова // Проблемы

электроэнергетики: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2011. С. 46-51.

15. **Артюхов И.И.** Фотоэлектрическая система катодной защиты магистрального трубопровода / И. И. Артюхов, Ф. П. Мироедов // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы VIII Все-

рос. науч.-практ. конф. (г. Камышин, 23-25 нояб. 2011 г.). Волгоград: ВолгГТУ, 2012. Т. 1. С. 100-103.

16. Solar Power Cathodic Protection for Gas Pipelines and Oil Industry. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.amerescosolar.com/solar-power-cathodic-protection>.

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

Мироедов Филипп Павлович – студент магистратуры кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Артюхов Денис Иванович – студент магистратуры кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Filipp P. Miroedov – Master Student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Denis I. Artyukhov – Master Student, Department of Chemistry and Chemical Technology of Materials, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20. 01.20, принята к опубликованию 15.03.20

УДК 621.316.99

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ОПОРАМИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ, НЕ ЗАЗЕМЛЕННЫМИ НА РЕЛЬС, И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

И.А. Кремлев, И.А. Терёхин, Р.Б. Скоков, Е.Г. Абишов

CHALLENGES AND SOLUTIONS TO INTEGRATION OF AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS WITH UNGROUNDED CONTACT LINE SUPPORTS

I.A. Kremlyov, I.A. Teryokhin, R.B. Skokov, E.G. Abishov

В статье представлены основные требования, предъявляемые к системе заземления тягового электроснабжения пере-

The article presents the main requirements to the grounding of the AC traction power supply system. The faults in conventional

менного тока. Выявлены недостатки традиционной системы заземления опор контактной сети на рельсовую сеть. Представлены результаты проведенных экспериментальных испытаний условий электробезопасности и электромагнитного влияния. Выявлены задачи, требующие рассмотрения, без решения которых широкое внедрение системы с опорами без заземления на рельсовую сеть невозможно. Рассмотрены два возможных направления, позволяющие исключить проблемные моменты при эксплуатации системы тягового электроснабжения переменного тока.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения переменного тока, заземление, опора без заземления на рельсовую сеть, релейная защита, электробезопасность, электромагнитное влияние, релейная защита, железобетонный фундамент

Преднамеренное заземление устройств тягового электроснабжения переменного тока на рельсовую сеть (далее традиционная система заземления) сопряжено с рядом негативных факторов, которые и ранее, и в настоящее время не позволяют дать ему однозначную положительную оценку. К таким факторам, в первую очередь, необходимо отнести возможные сбои в работе автоблокировки за счет влияния со стороны устройств заземления на работу рельсовых цепей, во вторую – отказы релейной защиты фидеров контактной сети при различных нарушениях цепи заземления.

Известны несколько направлений решения проблемы, основными из которых являются реализация защиты от замыкания на опоры, случайным образом оказавшиеся без заземления на рельсовую сеть, и кардинальное решение, заключающееся в полном отказе от традиционного заземления опор на рельсы.

Первое требует введения в комплекс защиты тяговой сети дополнительной ступени, позволяющей идентифицировать замыкания через существенное переходное сопротивление.

Второе приводит к необходимости пересмотра самого комплекса релейной защи-

grounding systems for contact line supports over the rail network have been revealed. The results of the field tests relating electric safety and electromagnetic influence have been presented. The focus is made on the issues critical in integration of the system of ungrounded contact line supports over the rail network. Particular consideration is devoted to the two trends which ensure excluding the challenges arising in the operation of the AC traction power supply system.

Keywords: AC traction power supply system, grounding, ungrounded contact line support over the rail network, relay protection, electric safety, electromagnetic influence, reinforced concrete foundation

ты заключающегося в изменении подхода к заземлению конструкций контактной сети, методике расчета уставок релейной защиты, более детального рассмотрения условий электробезопасности и т.п.

Применяемые на данный момент многоступенчатые защиты фидеров контактной сети переменного тока обеспечивают достаточную селективность и чувствительность при токах короткого замыкания величина которых, благодаря наличию заземления на рельс, значительно отличается от токов линии в нормальном рабочем режиме. При замыканиях, которые сопровождаются токами соизмеримыми с токами нагрузки, данные устройства защиты зачастую не срабатывают. Это влечет за собой длительное протекание аварийного тока по элементам тяговой сети, что недопустимо. Например, замыкание контактной сети на опору, случайным образом оказавшуюся без заземления на рельс, приводит к таким последствиям, как разрушение бетона, выгорание арматуры и в результате потере опорой несущей способности. На данный момент известны различные принципы исполнения защит, которые позволяют определять такие режимы. Одним из наиболее приемлемых является введение в эксплуа-

тируемую дистанционную защиту дополнительной ступени с характеристикой срабатывания, продленной вдоль ось активных сопротивлений, основные принципы построения которой были предложены еще в 1980-х годах прошлого столетия учеными из ДвГУПС. Дальнейшее развитие принципы защиты от замыканий через переходное сопротивление получили в начале 2000-х годов в ОмГУПС, что позволило реализо-

вать дополнительную ступень дистанционной защиты ДЗ4 на базе серийно производимых блоков цифровой защиты фидеров ЦЗАФ – 27,5 кВ [1]. Отличительной особенностью данной ступени являлась возможность независимой регулировки координат области срабатывания, а также наличие дополнительных признаков, позволяющих отстраивать защиту от режимов нагрузки (рис. 1).

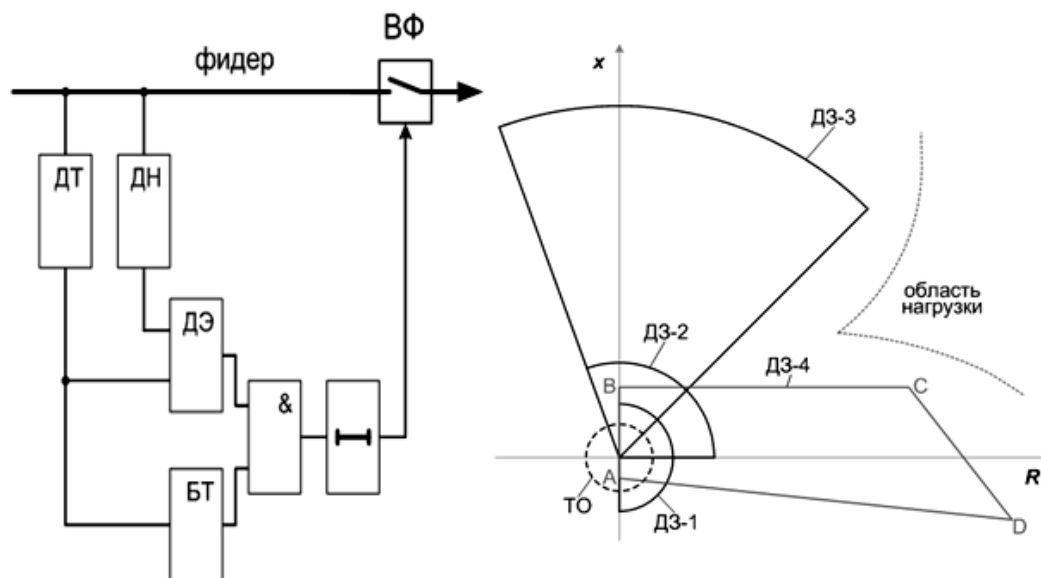


Рис. 1. Защита, обеспечивающая эксплуатацию тяговой сети переменного тока без заземления опор на рельсы

В период с 2008 по 2012 год на участке Западно-Сибирской железной дороги был проведен ряд экспериментальных исследований, подтвердивших работоспособность принципов, предложенных коллективом, и способность идентифицировать режимы замыканий через большое переходное сопротивление [2]. Вместе с тем опыт внедрения на сети дорог блоков ЦЗАФ с данной защитой показал, что на участках, где обращается подвижной состав нового поколения (в частности, Северо-Кавказская железная дорога), возросла вероятность частых ложных отключений от действия данной дополнительной ступени защиты, что в ряде случаев потребовало выведения её из работы. Таким образом, проблема в полной мере не была решена.

В то же время анализ многочисленных исследований, проведенных специалистами

из ВНИИЖТ, ПГУПС, ДвГУПС и ОмГУПС показал, что существуют пути комплексного решения проблемы заземления на участках переменного тока, и одним из наиболее интересных является отказ от преднамеренного заземления конструкций тяговой сети на рельсы. Очевидно, такое решение позволит полностью исключить влияние устройств заземления на рельсовые цепи в различных нестационарных режимах, и, тем самым, снизить вероятность простоя подвижного состава, повреждения дорогостоящего оборудования СЦБ, а также улучшить условия электробезопасности на участках переменного тока.

Исследования, базирующиеся на ранних достижениях ОмГУПС, ПГУПС, ДвГУПС и ВНИИЖТ показали, что при обеспечении определенных условий можно повысить чувствительность эксплуатируемых дистанци-

онных защит (в частности, второй ступени дистанционной защиты ДЗ-2, являющейся основной) при преднамеренном использовании опор контактной сети без заземления на рельсовую сеть и добиться их устойчивого функционирования при соблюдении требований к электробезопасности. При этом предъявляются особые требования к сопротивлению растеканию опор контактной сети, так как значение контролируемого тока, а следовательно, и входного сопротивления фидера, помимо сопротивления элементов тяговой сети в наибольшей степени определяется переходным сопротивлением в месте повреждения. Его значение в общем случае определяется множеством случайных факторов. Поэтому на стадии подготовки участков тяговой сети для эксплуатации без заземления опор на рельсы целесообразно проведение ряда мероприятий для того, чтобы их учесть. В частности, было установлено, что если при использовании опор в качестве заземлителя осуществить преднамеренное соединение закладных деталей с арматурой (или внутренним спуском заземления), то сопротивление опоры будет существенно снижено. А объединение таких опор тросом группового заземления позволит добиться снижения сопротивления растеканию до значений, при которых будет обеспечиваться надежная работа защит фидеров.

Исходя из существующих требований к обеспечению чувствительности основных защит, сопротивление перехода «группа опор – земля» R_n^* с учетом троса группового заземления не должно превышать значения, определяемого выражением

$$R_n^* \leq \frac{\frac{Z_{н.мин}}{\kappa_6 \kappa_3 \kappa_4 n} - z_{mn} l_{АП}}{1 + \frac{Z_{nA} + z_{mn} I_{АП}}{Z_{nB} + z_{mn} I_{ПВ}}}, \quad (1)$$

где Z_{nA} , Z_{nB} – сопротивления подстанций А и В, соответственно, Ом; $Z_{мин}$ – удельное (погонное) сопротивление тяговой сети, Ом/км; $I_{АП}$, $I_{ПВ}$ – расстояния, соответственно, между подстанцией А и постом секционирования,

постом секционирования и подстанцией В; κ_6 – коэффициент возврата, принимаемый равным 1,1÷1,15; κ_3 – коэффициент запаса, принимаемый равным 1,1÷1,3; κ_4 – коэффициент чувствительности, принимаемый для второй ступени трехступенчатой защиты равным 1,25; n – количество путей.

Коллективу и удалось разработать и внедрить методику выбора уставок защиты, обеспечивающую эксплуатацию контактной сети переменного тока без заземления опор на рельсы, а также дополнения в инструкцию по заземлению устройств тягового электроснабжения.

Это позволило совместно с Дорожной электротехнической лабораторией ЗСЖД при поддержке руководства ОАО «РЖД» в 2012 году ввести в опытную работу участок Карасук-Зубково с опорами контактной сети, эксплуатируемыми без заземления на рельс. За 5 лет эксплуатации на указанном участке не выявлено ни одного случая отказа устройств СЦБ и автоблокировки по вине хозяйства электроснабжения. При этом защита фидеров работала в штатном режиме и отказов ее также не наблюдалось.

Кроме того, в 2015 году коллективом была проведена серия экспериментальных исследований условий электробезопасности и электромагнитного влияния на указанном опытном участке (рис. 2) [3, 4].

Результаты исследований не только подтвердили безопасность эксплуатации опор, используемых в качестве заземлителей, но и показали, что данная система является более предпочтительной по сравнению с традиционной системой заземления на рельс. Так, напряжение прикосновения к опоре без заземления на рельсовую сеть, находящейся в группе, в режиме короткого замыкания не превысило 320 В, в то время как при замыкании на рельс напряжение прикосновения составило более 650 В, что не соответствует действующим нормативным документам. В части гальванического и магнитного влияния на линии связи обе системы удовлетворяют условиям электромагнитной совместимости. Таким образом, полученные на данном этапе результаты

позволяют утверждать, что система тягового электроснабжения переменного тока может эксплуатироваться с опорами без за-

земления на рельсовую сеть, обеспечивая лучшие показатели по электробезопасности и электромагнитному влиянию.



Рис. 2. Проведение экспериментальных исследований условий электробезопасности и электромагнитного влияния

Вместе с тем на данный момент все еще остаются не рассмотренными задачи, без решения которых широкое внедрение системы с опорами, используемыми в качестве заземлителей, невозможно. В частности, к ним можно отнести следующие:

- внесение изменений и корректировок в действующие руководящие указания по расчету уставок релейных защит, в том числе и для участков с обращением подвижного состава нового поколения;

- разработка изменений и дополнений в техническую документацию на универсальные фундаменты опор, позволяющие эксплуатировать их без заземления на рельс [5];

- разработка методики подготовки участков тяговой сети переменного тока к эксплуатации с опорами контактной сети,

не заземляемыми на рельсы, и инструкции по эксплуатации этих участков.

Решение поставленных задач невозможно без дополнительных экспериментальных исследований термической стойкости арматуры фундаментов опор контактной сети к токам короткого замыкания, определения требований к конструктивному исполнению фундаментов опор и искусственных заземлителей, а также более углубленных теоретических и экспериментальных исследований влияния токов замыкания на опоры, не заземленные на рельсы, на магистральные кабели связи и устройства СЦБ.

В связи с этим выполненные на данный момент работы требуют своего логического продолжения и завершения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. России № 113431 на полезную модель. Устройство, обеспечивающее эксплуатацию контактной сети переменного

тока без заземления опор на рельсы / И.А. Кремлев, Р.Б. Скоков. 2011. Бюл. № 4.

2. **Степанов В.Ф.** Новая защита контактной сети: опыт Западно-Сибирской дороги / В.Ф. Степанов, В.А. Кващук, И.А. Кремлев // Локомотив. 2010. № 11. С. 44-45.

3. Методика проведения экспериментальных испытаний условий электробезопасности на участке тяговой сети переменного тока, эксплуатируемом без заземления опор контактной сети на рельс / В.А. Кващук, Ю.В. Кондратьев, И.А. Терехин, И.А. Кремлев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 68-73.

4. **Кондратьев Ю.В.** Экспериментальная оценка возможности использования

опор контактной сети для прохождения токов короткого замыкания / Ю.В. Кондратьев, И.А. Кремлев, И.А. Терехин // Технические науки – от теории к практике: материалы LXXI Междунар. науч.-практ. конф. (26 июня 2017 года). Новосибирск, 2017. С. 24-27.

5. Пат. России № 165427 на полезную модель. Железобетонный фундамент металлических опор контактной сети, эксплуатируемых без заземления на рельс / Ю.В. Кондратьев, Р.Б. Скоков, И.В. Тарабин, И.А. Терехин, И.А. Кремлев. 2016. Бюл. № 29.

Кремлев Иван Александрович – кандидат технических наук, доцент Омского государственного университета путей сообщения

Терехин Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

Скоков Руслан Борисович – кандидат технических наук, доцент Омского государственного университета путей сообщения

Абишов Ербол Гайдарович – аспирант Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

Ivan A. Kremlyov – PhD in Engineering, Associate Professor, Omsk State Transport University

Ilya A. Teryokhin – PhD in Engineering, Associate Professor, Petersburg State Transport University

Ruslan B. Skokov – PhD in Engineering, Associate Professor, Omsk State Transport University

Erbol G. Abishov – Postgraduate, Petersburg State Transport University

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.785.52

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ Х12МФ, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМУ ЛЕГИРОВАНИЮ ЦИРКОНИЕМ И ЦЕМЕНТАЦИИ В КРЕМНИЙ-ГРАФИТОВОЙ ПАСТЕ

М.Е. Федосеев, А.А. Фомин

INVESTIGATION INTO THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF H12MF TOOL STEEL SUBJECTED TO ELECTRIC SPARK ALLOYING WITH ZIRCONIUM AND CEMENTATION IN THE SILICON-GRAPHITE PASTE

М.Е. Fedoseev, A.A. Fomin

Срок службы штампового инструмента зависит от выбранных технологических режимов упрочняющей обработки и достигаемых параметров качества поверхности. В данной работе предлагается новый метод электроискрового легирования цирконием рабочей поверхности штампового инструмента с последующей цементацией слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» в кремний-графитовой пасте для получения необходимой твердости и износостойкости. Изучены морфологические характеристики и механические свойства экспериментальных цирконийсодержащих покрытий, полученных электроискровым легированием при межэлектродном напряжении 3,2-6,5 В, рабочем токе 1,4-4,1 А и продолжительности обработки 2-4 мин. Установлено, что последующая цементация слоистой системы обработкой токами высокой частоты при температуре 850-900 °С и выдержке 100-300 с способствует получению металлокерамического покрытия с высокой микротвердостью 724-946 HV₁ при толщине слоя 15-40 мкм.

Ключевые слова: электроискровое легирование, цирконий, инструментальная сталь, упрочненный слой, цементация, токи высокой частоты, кремний-графитовая паста

The service life of the die tool depends on the selected technological modes of hardening treatment and the achieved surface quality parameters. In this paper, a new method for electric spark alloying with zirconium of the working surface of a die tool with a subsequent cementation of the layered "steel H12MF – Zr-coating" system in the silicon-graphite paste is proposed in order to obtain the necessary hardness and wear resistance. Morphological characteristics and mechanical properties of experimental zirconium-containing coatings produced by electric spark alloying at the interelectrode voltage of 3.2-6.5 V, the operating current of 1.4-4.1 A, and the processing time of 2-4 minutes were studied. It was found that subsequent cementation of the layered system by the high-frequency current treatment at the temperature of 850-900 °C and exposure of 100-300 s contributed to the production of a metal-ceramic coating with a high microhardness of 724-946 HV₁ at the layer thickness of 15-40 μm.

Keywords: electric spark alloying, zirconium, tool steel, hardened layer, cementation, high frequency currents, silicon-graphite paste

В машиностроении, в частности металлообработке, формообразование – одна из основных операций на производственной линии. Важной проблемой при разработке технологического процесса механической обработки является снижение износа инструмента [1]. Это связано с тем, что в ходе работы металлообрабатывающий инструмент подвергается воздействию высоких контактных механических напряжений. В результате такого взаимодействия происходят поверхностная деформация и изнашивание вспомогательной (боковой) и рабочей (торцевой) поверхностей инструмента за короткий временной интервал (рис. 1) [2].

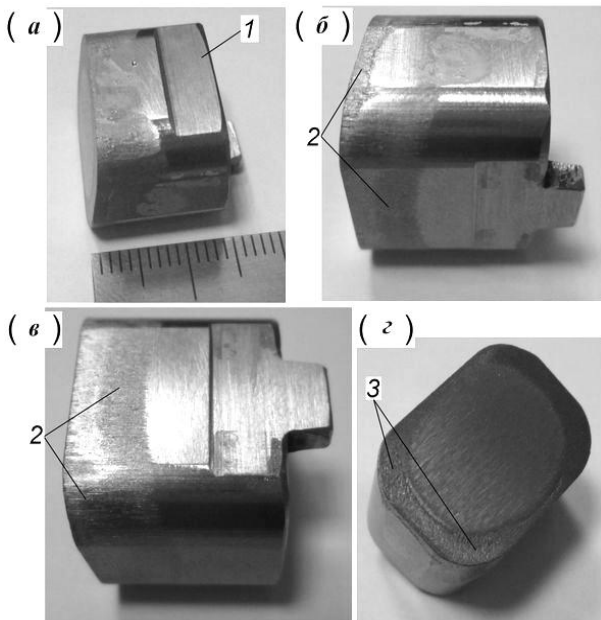


Рис. 1. Участки износа штампового инструмента: 1 – посадочное место; 2 – боковая поверхность; 3 – рабочая (торцевая) поверхность

К штамповому инструменту предъявляется комплекс требований по механическим и эксплуатационным характеристикам, таких как твердость, коэффициент трения, износостойкость и качество поверхности, определенное сочетание которых необходимо для длительной и эффективной работы [3]. Считается, что для достижения высокой производительности и качества готовой продукции целесообразно использовать оптимальные технологические режимы, высококачественный и надежный обрабатывающий инструмент.

Известны различные методы упрочнения поверхности обрабатывающего инструмента, например лазерная и плазменная обработка, нанесение тонких пленок вакуумно-конденсационными методами осаждения (PVD и CVD технологии), термическая и химико-термическая обработка. Традиционным методом для создания толстых слоев карбидного состава является химико-термическая обработка (ХТО), в частности цементация. Суть данного процесса заключается в насыщении поверхностного слоя металлических материалов атомарным углеродом и протекании необходимых фазово-структурных превращений, что, в свою очередь, приводит к повышению эксплуатационных свойств изделий [4].

С развитием промышленности произошло развитие технологии цементации. Помимо твердо- и газофазной цементации, появился и метод ХТО в углеродсодержащей пасте. Данные виды ХТО проводятся в специальных печах для цементации при температуре 850-950°C [5]. Однако рассмотренные методы упрочнения имеют ряд существенных недостатков, таких как низкая производительность, потребность в большой площади для размещения технологического оборудования и высокое энергопотребление [6]. Как правило, данные проблемы не являлись ограничивающими при крупносерийном производстве, но в связи со стремительным развитием новых технологий и активным применением перспективных материалов появилась потребность в развитии компактных производств, использующих различные экспериментальные методы упрочнения поверхности.

В связи с тем, что цементация металлических материалов, в особенности сталей, является важной операцией повышения качества изделий, развитие ХТО предусматривает также использование прочих методов ускорения физико-химических процессов и фазово-структурных превращений. Одним из таких вариантов является использование концентрированных потоков энергии, например электрических разрядов в реакционных средах (микродуговая цементация) или лазерного излучения [7, 8].

Высокую селективность упрочняющей обработки обеспечивает технология электроискрового легирования (ЭИЛ) [9]. Данный метод нашел широкое применение не только в машиностроении, но и при изготовлении изделий медицинской техники, в частности имплантатов [10]. Технология ЭИЛ отличается простотой использования, эффективностью повышения качества и эксплуатационных характеристик деталей машин и металлообрабатывающего инструмента. Материалами рабочих электродов являются металлы и электропроводные сплавы, применение которых зависит от назначения изделия. В ряде случаев требуется повысить комплекс механических свойств за счет использования металлокерамики (карбидов, карбонитридов). Однако формирование слоев большой толщины (свыше 30-50 мкм) из тугоплавких материалов является энергозатратным процессом.

Таким образом, для повышения качества металлообрабатывающего инструмента, в частности стальных штампов, предлагается проводить электроискровое легирование тугоплавким карбидообразующим металлом (цирконием) рабочих поверхностей и химико-термическую обработку слоистой системы «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) в углеродсодержащей пасте.

Цирконийсодержащее покрытие формировалось на цилиндрических образцах высотой 4 мм и диаметром 12 мм, изготовленных из высоколегированной инструментальной стали Х12МФ (согласно ГОСТ 5950-73, химический элементный состав в мас. %: С – 1,45-1,65; Si – 0,1-0,4; Mn – 0,15-0,45; Cr – 11,0-12,5; V – 0,15-0,30; Mo – 0,4-0,6; Fe – остальное). Подготовка поверхности образцов предусматривала чистовое точение с последующим тонким шлифованием (Ra 0,2-0,4), а также очистку в этаноле.

Поверхность подготовленных образцов модифицировалась с помощью электроискрового легирования (ЭИЛ) карбидообразующим тугоплавким металлом (цирконием) с применением устройства «Arkotrafo A50/6» («ARGLO AG», Швейцария) [11].

Для получения равномерного слоя циркония ЭИЛ выполнялось с применением токарного станка (рис. 2 а).

Образец закреплялся в трехкулачковом патроне станка так, чтобы биение обрабатываемой поверхности не превышало 0,05-0,1 мм (рис. 2 б). Держатель электрода-инструмента устанавливался в резцедержатель через специальное зажимное приспособление пружинного типа (рис. 2 в). Частота вращения стального образца была постоянной и составила 500 об/мин. Контакт циркониевого (сплав Э110) электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью стального электрода-образца осуществлялся передвижением суппорта по аналогии с операцией подрезания торца (рис. 2 г). Продолжительность ЭИЛ составила от 2 до 4 мин при регулируемом межэлектродном напряжении 3,2-6,5 В и рабочем токе 1,4-4,1 А.

После ЭИЛ цирконием на поверхность образца наносилась кремний-графитовая паста, в составе которой присутствовало натриевое жидкое стекло – 20-25 мас. % (ГОСТ 13078-81), кальцинированная сода – 4-5 мас. % (ГОСТ 5100-85) и порошок пиролитического графита (ТУ 1915-099-04806898-2003). В составе основного компонента – порошка пирографита помимо углерода присутствовали примеси кислорода в общем количестве не более $3,93 \pm 1,14$ ат. % (табл. 1; рис. 3).

Химико-термическая обработка (ХТО) образцов с нанесенной кремний-графитовой пастой проводилась при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ). Нагрев ТВЧ характеризовался потребляемой электрической мощностью 150-480 Вт, удельной мощностью 40-140 Вт/г и частотой тока на индукторе в диапазоне 90-110 кГц, которая изменялась в зависимости от температуры стального образца и фазовых переходов в нем. В результате данной обработки устанавливалось влияние ХТО в температурном диапазоне от 850-900 до 1100-1250°C на показатели микроструктуры получаемых слоистых систем «сталь Х12МФ – Zr-покрытие» и ее микротвердость.

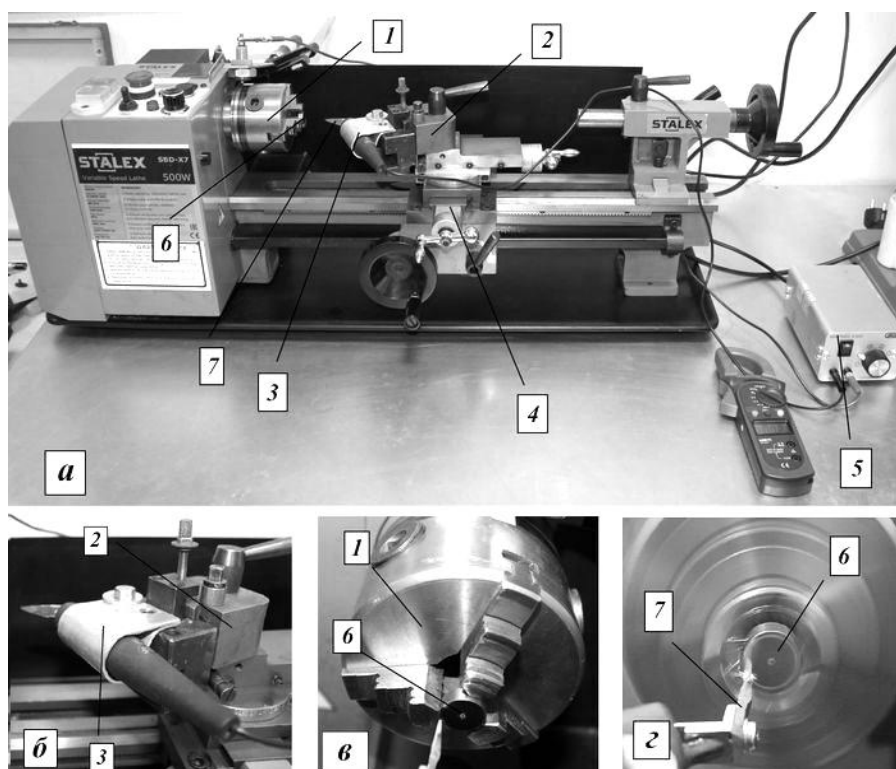


Рис. 2. Технологический комплекс для электроискрового легирования цилиндрических образцов:
 а – общий вид комплекса, основными элементами которого являются трехкулачковый патрон 1, приспособление для вертикального перемещения 2 держателя электрода 3, суппорт токарного станка 4, устройство электроискровой обработки 5, закрепленный образец 6 и электрод-инструмент 7;
 б – узел крепления держателя электрода; в – позиционирование цилиндрического образца в трехкулачковом патроне; г – электроискровое легирование торцевой поверхности цилиндрического образца циркониевым электродом

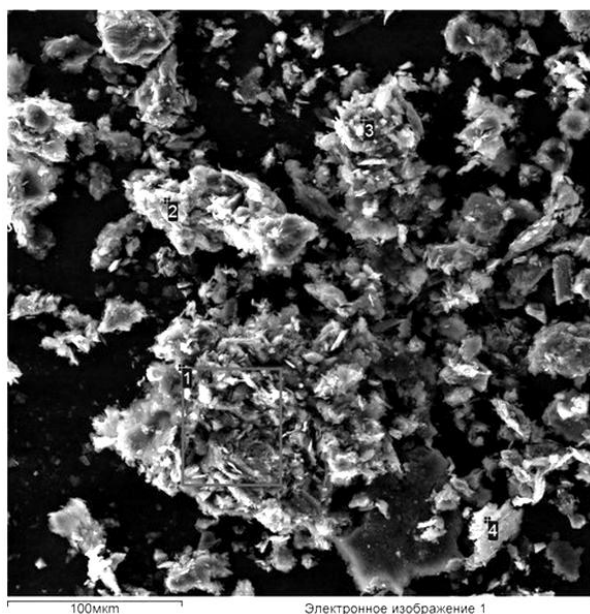


Рис. 3. Растровая электронная микроскопия частиц порошка графита и прямоугольный участок для анализа химического элементного состава

Таблица 1. Химический состав порошка пиролитического графита, ат. %

Спектр	[C], ат. %	[O], ат. %
1	96,19	3,81
2	95,18	4,82
3	97,60	2,36
4	95,28	4,72
Среднее	96,06±1,12	3,93±1,14

При исследовании микроструктуры и химического состава покрытий после ЭИЛ и ХТО применялась растровая электронная (РЭМ) микроскопия (микроскоп «MIRA II LMU», Tescan) в комбинации с энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным (ЭДРФА) анализом (детектор «INCA PentaFETx3», Oxford). Микротвердость оценивались с применением метода микроиндентирования (микротвердомер «ПМТ-3М»)

при нагрузке на индентор Виккерса, равной 100 гс (≈ 1 Н).

При исследовании микроструктуры циркониевых покрытий отмечалась их равномерность по толщине (рис. 4 а, б). При минимальной продолжительности обработки $t_{ЭИЛ} = 2$ мин отсутствовали участки без покрытия, толщина циркониевого слоя равнялась 15-20 мкм. С увеличением рабочего тока толщина функционального слоя практически не изменялась, что может быть связано с окислением переносимого циркония и большим разогре-

вом материала стальной основы. Максимальная микротвердость данного слоя равнялась 961 ± 73 HV₁, что эквивалентно 67-69 HRC и может приводить к скалыванию рабочих кромок при вырубных операциях штамповки (рис. 5, кривая 1). Результаты химического анализа показали, что содержание циркония в приповерхностном слое при данной продолжительности ЭИЛ составило около 22 ат. %, прочие металлы (Fe, Cr, V, Mo) в составе покрытия имели отношение к материалу стальной основы образцов.

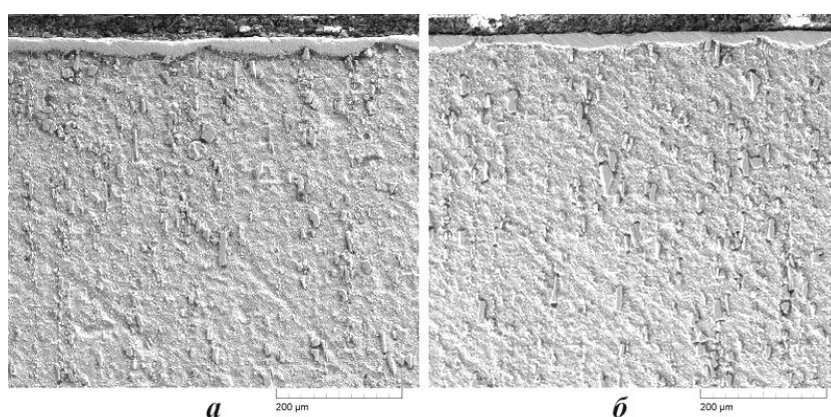


Рис. 4. Микроструктура стального образца после электроискрового легирования цирконием при продолжительности $t_{ЭИЛ} = 2$ мин и различном токе I : а – 1,9 А; б – 2,5 А.

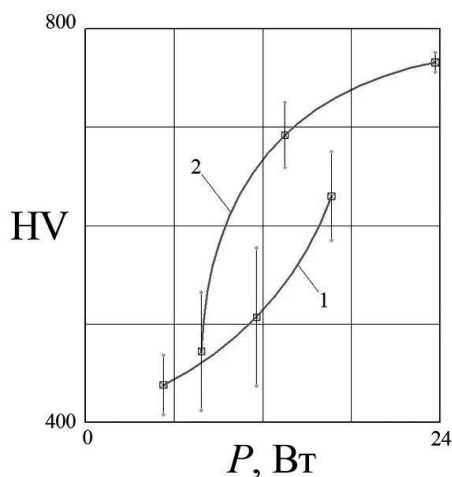


Рис. 5. Зависимости микротвердости HV₁ поверхности циркониевого покрытия от электрической мощности P при ЭИЛ и различной продолжительности процесса:
1 – $t_{ЭИЛ} = 2$ мин; 2 – $t_{ЭИЛ} = 4$ мин

Продолжительность ЭИЛ, равная $t_{ЭИЛ} = 4$ мин, позволила увеличить толщину слоя до 30-40 мкм (рис. 6 а, б). Сочетание

умеренно высокой микротвердости 779 ± 46 HV₁, что эквивалентно 62-65 HRC, и равномерной толщины слоя обеспечивалось при рабочем токе 2,1-2,8 А, межэлектродном напряжении 4,8 В при $t_{ЭИЛ} = 4$ мин (рис. 5, кривая 2). Кроме того, возрастание продолжительности обработки повлияло на содержание циркония в легированном слое, которое составило около 66 ат. %. Данные параметры ЭИЛ были выбраны при изготовлении слоистых образцов для последующей ХТО с применением обработки ТВЧ.

Результаты исследования химического состава образцов, подвергнутых цементации ТВЧ в кремний-графитовой пасте, характеризовали ускоренное протекание процесса диффузионного насыщения углеродом приповерхностного слоя с повышением температуры. Максимум содержания углерода составил около 55,80 вес. %, что указывало на протекание необходимых фазово-структурных превра-

щений и проникновение углерода в шероховатую структуру приповерхностного слоя, т.е. имелись включения твердой графитовой смазки. Однако при наибольшей температуре ХТО, равной $1100 \pm 50^\circ\text{C}$ и более, распределение углерода по толщине имело выраженную неравномерность. Высокотемпературная обработка также спо-

собствовала снижению содержания циркония, что было связано с вероятным разрушением модифицируемого карбидного слоя (табл. 2). Таким образом, для ХТО стальных образцов с циркониевым слоем использовался режим цементации при минимальной температуре $T = 850-900^\circ\text{C}$ и выдержке $t = 100-300$ с.

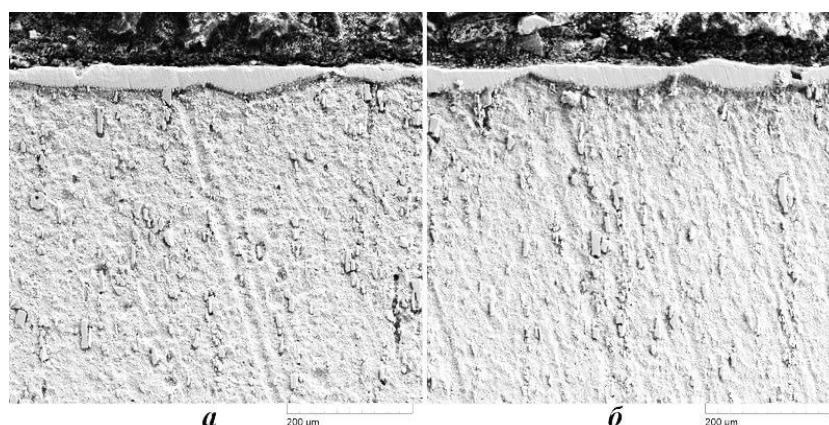


Рис. 6. Микроструктура стального образца после электроискрового легирования цирконием при продолжительности $t_{ЭИЛ} = 4$ мин и различном токе: а – $I = 2,7$ А; б – $I = 3,8$ А

Таблица 2. Параметры ХТО (цементации) стальных образцов в кремний-графитовой пасте с применением обработки токами высокой частоты

Номер образца	Напряжение U Потребляемый ток I	Ток индуктора I	Продолжительность выдержки t	Температура поверхности образца T	Содержание углерода и циркония	
					[C], вес. %	[Zr], вес. %
–	В / А	кА	с	$^\circ\text{C}$		
1	75 / $2,5 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	100	850 ± 25	$12,31 \pm 2,11$	$78,77 \pm 8,09$
2	75 / $2,5 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	300	900 ± 50	$19,50 \pm 2,54$	$76,35 \pm 3,65$
3	85 / $2,9 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,1$	100	1000 ± 25	$7,47 \pm 0,13$	0
4	85 / $2,9 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,1$	300	1000 ± 50	$9,68 \pm 0,74$	0
5	95 / $3,9 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	100	1050 ± 100	$26,59 \pm 13,38$	0
6	95 / $4,0 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,1$	300	1100 ± 50	$20,37 \pm 1,98$	0
7	105 / $4,6 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,2$	50	1200 ± 100	$55,80 \pm 19,74$	13,79
8	105 / $4,4 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,4$	100	1250 ± 100	$9,42 \pm 2,09$	5,29

Максимум микротвердости составил 873 ± 67 HV₁, и далее наблюдалось ее плавное снижение до 691 ± 45 HV₁ на глубине индентирования около 240 мкм, т.е. области структурно-измененной стальной основы (рис. 7, кривая 1).

В полученном покрытии не отмечалось наличия трещин и прочих дефектов (пористости). Формировались также карбиды,

в том числе циркония, в цементированном слое, поскольку данные химического анализа показали высокое содержание углерода и циркония (рис. 8 а, б). При увеличенной продолжительности выдержки до $t = 300$ с микротвердость приповерхностной области снижалась до 833 ± 111 HV₁ и вдвое увеличивался разброс значений микротвердости относительно средней ве-

личины. На глубине индентирования 30-60 мкм микротвердость заметно снижалась до 614-691 HV₁, что исключало дальнейшее увеличение продолжительности выдержки при ХТО.

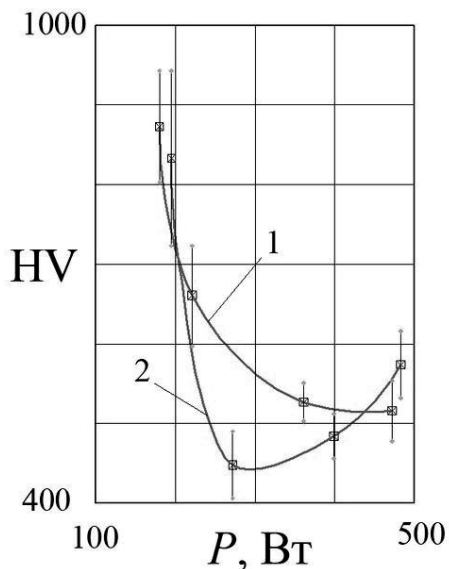


Рис. 7. Зависимости микротвердости HV₁ поверхности циркониевого покрытия от электрической мощности P при цементации с применением обработки токами высокой частоты и различной продолжительности выдержки: 1 – $t = 100$ с; 2 – $t = 300$ с

При исследовании микроструктуры образцов, которые были обработаны при температуре $T = 850-900^{\circ}\text{C}$, наблюдалось выделение карбидов и мартенсита. Таким образом, помимо цементации также наблюдалось упрочнение (закалка) нижележащего слоя. При глубине индентирования свыше 60 мкм микротвердость составила около 600-700 HV₁ (рис. 8 в, г). Использование повышенной температуры (свыше 1000°C) способствовало увеличению размера зерен, формированию карбидной сетки в приповерхностном тонком слое и снижению микротвердости до 500 HV (рис. 7, кривая 2). При повышенных температурах цементации функциональный слой циркония (карбида циркония) отсутствовал, что отмечалось при оптической микроскопии структуры поверхности стальных образцов (рис. 9 а-г). Методом электроискрового легирования цирконием (сплав Э110) поверхности инструментальной стали X12МФ формировалась система «сталь X12МФ – Zr-покрытие» с высокой микротвердостью 779 ± 46 HV₁ и толщиной слоя 30-40 мкм при переменной величине рабочего тока 2,1-2,8 А, межэлектродном напряжении 4,8 В и продолжительности процесса не более 4 мин.

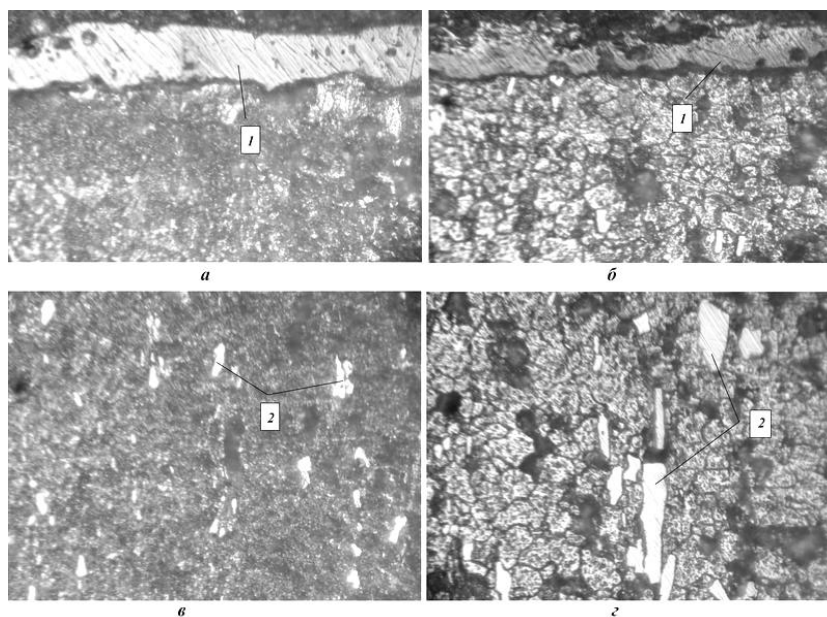


Рис. 8. Микроструктура цементированного слоя (а, б) и сердцевины (в, г) образца после ХТО с применением обработки ТВЧ при различной температуре: а, в – $T = 850^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$); б – $T = 950^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$); г – $T = 900^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$)

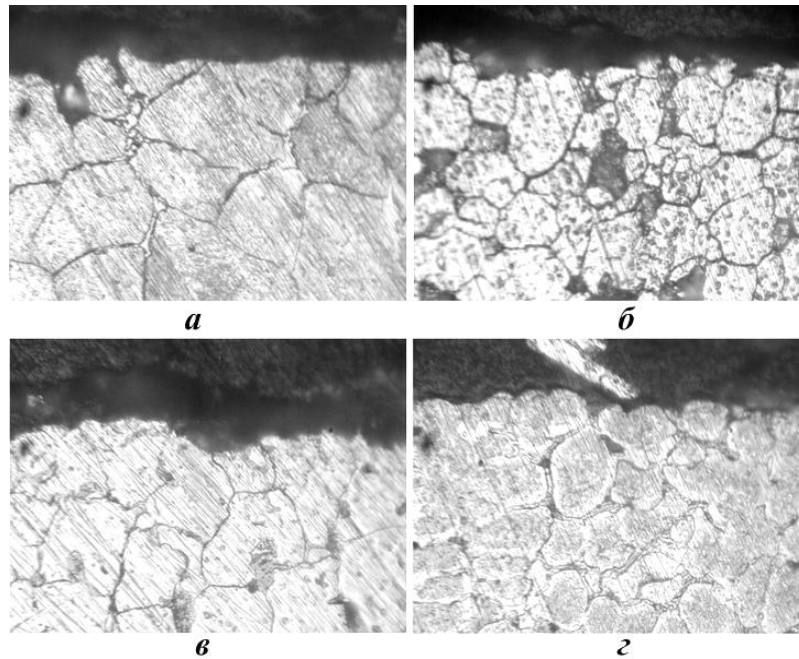


Рис. 9. Микроструктура цементированного слоя образца после ХТО с применением высокотемпературной обработки ТВЧ: а – $T = 1000^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$); б – $T = 1100^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$); в – $T = 1150^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$); г – $T = 1250^{\circ}\text{C}$ ($\times 650$)

Последующая химико-термическая обработка (цементация) в кремний-графитовой пасте с применением обработки (нагрева и выдержки) токами высокой частоты рассмотренной слоистой системы позволила сохранить металлокерамический слой. Микротвердость полученной структуры составила $873 \pm 67 \text{ HV}_1$ при глубине индентирования до 30 мкм. Обеспечивалось также плавное снижение микротвердости до $691 \pm 45 \text{ HV}_1$ при глубине индентирования около 240 мкм. Данное сочетание микротвердости и глубины модифицированного слоя, а также высокого содержания циркония и углерода достигалось ХТО при

температуре $T = 800\text{--}950^{\circ}\text{C}$ и малой выдержке $t = 100 \text{ с}$.

Таким образом, полученная слоистая система «сталь X12МФ – (ZrC)-покрытие» характеризуется требуемым сочетанием высокой микротвердости и большой глубины упрочненного слоя, которая может эффективно использоваться в условиях трения и скалывания, в частности при формоизменяющих и разделительных операциях листовой штамповки.

Статья подготовлена при выполнении научных исследований в рамках гранта Президента Российской Федерации № МД-157.2019.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Carpene E.** Formation of Fe_3C surface layers by laser plasma cementation / E. Carpenе, P. Schaaf // *Applied physics letters*. 2002. Vol. 80 (5). P. 891-893.
2. **Блажаев В.В.** Исследование механических свойств покрытия, наносимого методом электроискрового легирования / В.В. Блажаев, П.Г. Иваночкин, А.С. Личковаха // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2014. № 3. С. 111-117.
3. Methodology for fabrication of highly pitting corrosion-resistant type 304 stainless steel by plasma carburizing and post-pickling treatment / Y. Sugawara, W. Inoue, I. Muto, N. Hara // *Journal of the electrochemical society*. 2018. Vol. 165 (9). P. 441-449.
4. **Thomas G.D.** Heat treatment and properties of iron and steel / G.D. Thomas, J.R. Samuel. National Bureau of Standards, Washington, 1960. P. 46.

5. **Chongxue Z.** Assessment of depth of case-hardening in steel rods by electromagnetic methods / Z. Chongxue. Ames, Iowa: Iowa State University, 2009. P. 57.

6. **Bepari M.M.A.** 2.3 Carburizing: a method of case hardening of steel / M.M.A. Bepari // Comprehensive Materials Finishing, Elsevier. 2017. P. 71-106.

7. **Домбровский Ю.М.** Микродуговая цементация стальных изделий в порошковых средах / Ю.М. Домбровский, М.С. Степанов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12. С. 25-30.

8. Low temperature plasma carburizing of martensitic stainless steel / C.J. Scheuer, R.P. Cardoso, R. Pereira, M. Mafrá,

S.F. Brunatto // Materials Science and Engineering A. 2012. Vol. 539. P. 369-372.

9. **Мулин Ю.И.** Особенности формирования структуры и свойства покрытий, нанесенных методом электроискрового легирования стали / Ю.И. Мулин // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 4. С. 60-66.

10. **Koshuro V.** Microstructure and composition of zirconium coatings obtained by electro-spark alloying / V. Koshuro, M. Fomina, M. Fedoseev // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124 (2). P. 022008.

11. **Okamoto H.** C-Zr (Carbon-Zirconium) / H. Okamoto // Journal of Phase Equilibria. 1996. Vol. 17 (2). P. 162-162.

Федосеев Максим Евгеньевич – аспирант кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Maksim E. Fedoseev – Postgraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.03.20

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 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Калгановой С.Г. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

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 7.1-2003 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 естественнонаучных 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 О.В. Пачиной, Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 27.03.2020
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 13,0 Уч. изд. л. 6,2
Тираж 500 экз. Заказ 56 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2020 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina, Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 27.03.2020
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 13,0 Publication base sheet 6,2
Circulation: 500 printed copies. Order 56 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*