

*Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал*

№ 2 (23)

Июнь 2019

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

**Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь**

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА**

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, НПЦ «Алмаз-Фазотрон», Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
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

№ 2 (23)
June 2019

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

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

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

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH
BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH
YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY	Dr.Sc., 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
S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.A. KOLOMEITSEV	Dr.Sc., Professor, JSC Scientific-Production Center «Almaz-Phazotron», Saratov
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.I.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
S.V. TRIGORLY	PhD, Associate 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. YDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Архангельский Ю.С., Юдина В.О.** Проектирование методической СВЧ электротермической установки для нагрева жидкости в потоке при ламинарном течении 5
- Тригорлый С.В., Захаров В.В., Алексеев В.С.** Численное моделирование процессов плавления диэлектриков в СВЧ установках лучевого типа..... 13
- Агапов С.И., Сидякин Ю.И., Толстяков А.Ф.** Определение мощности ультразвукового генератора при зубонарезании мелко модульных зубчатых колес ... 20
- Синицына Ж.С., Архангельский Ю.С.** Высокотемпературные СВЧ электротехнологические установки 25
- Алексеева М.М., Артюхов И.И., Алексеев В.С.** Имитационное моделирование тиристорного преобразователя частоты для индукционного нагрева при изменяющейся нагрузке 29

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Тимашёв Э.О., Чирков Д.А., Шулаков Н.В., Коротаев А.Д.** Оптимизация вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя..... 40
- Гнутов С.К., Раецкая О.В.** Подход к численному моделированию физических полей в стартерных электродвигателях 46
- Менщиков И.А., Баташов С.И.** Автоматизированная система диагностики синхронного тягового генератора тепловоза ТЭП-70 51

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Артюхов Д.И., Бурмистров И.Н., Артюхов И.И.** Применение термоэлек-

- трических ячеек для электропитания беспроводных датчиков..... 58
- Шевченко Н.Ю., Угаров Г.Г., Кириллова С.Н., Елфимова О.И.** Анализ параметров режима плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи 65
- Глухов Д.А., Угаров Г.Г.** Оценка приоритетности ремонта ЛЭП на основе риск-ориентированного анализа с учетом ремонтпригодности 74
- Артюхов И.И., Тулепова Г.Н., Молот С.В.** Особенности построения гибридных солнечно-дизельных комплексов для автономного электроснабжения удаленных сельских районов..... 81
- Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Колчев В.А., Веткасова Т.А.** Разработка преобразователей постоянного напряжения для систем интеллектуальной энергетики..... 91

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Кадыкова Ю.А., Калганова С.Г., Арзамасцев С.В., Васинкина Е.Ю., Алексеев В.С.** Электрофизическая модификация базальтовых нитей..... 101
- Злобина И.В.** Воздействие различных по величине ударных нагрузок на модифицированные в СВЧ электромагнитном поле трехслойные конструкции на основе отвержденных углепластиков . 106

ЛЕТОПИСЬ

- Архангельский Ю.С.** К двадцатипятилетию книги В.Г. Кинелева «Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы реформирования высшего образования России»..... 114
- К сведению авторов 125

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Arkhangelsky Yu.S., Yudina V.O.** Designing a continuous uhf of electrothermic installation for heating fluids at laminar flow 5
- Trigorly S.V., Zakharov V.V., Alekseev V.S.** Numerical simulation of melting dielectrics in microwaves based on electron beam mode 13
- Agapov S.I., Sidyakin Yu.I., Tolstyakov A.F.** Determination of the capacity of ultrasonic generators when cutting fine-pitch gears 20
- Sinitsyna Zh.S., Arkhangelsky Yu.S.** High-temperature microwave electro-technological installations 25
- Alekseeva M.M., Artyukhov I.I., Alekseev V.S.** A Simulation model of the thyristor frequency converter for induction heating with the changing loads 29

ELECTROMECHANICS

- Timashev E.O., Chirkov D.A., Shulakov N.V., Korotaev A.D.** Cylindrical linear electronic motor slider optimization 40
- Gnutov S.K., Raetskaya O.V.** An approach to numerical modeling of physical fields in starter electric motors 46
- Menshchikov I.A., Batashov S.I.** An automated diagnostic system for the synchronous traction generator of the diesel locomotive TEP-70 51

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Artyukhov D.I., Burmistrov I.N., Artyukhov I.I.** Application of thermal electrochemical cells to power supply the wireless sensors 58

- Shevchenko N.Yu., Ugarov G.G., Kirillova S.N., Elfimova O.I.** Analysis of parameters to the ice-melting mode in overhead power transmission lines 65
- Glukhov D.A., Ugarov G.G.** Priority assessment of the power lines repair based on risk-oriented analysis with account for maintainability factor 74
- Artyukhov I.I., Tulepova G.N., Molot S.V.** Characteristics of the solar-diesel hybrid systems for autonomous power supply of remote rural areas 81
- Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevsky Yu.B., Kolchev V.A., Vetkasova T.A.** Development of DC converters for intelligent power systems ... 91

MATERIALS SCIENCE

- Kadykova Yu.A., Kalganova S.G., Arzamastsev S.V., Vasinkina E.Yu., Alekseev V.S.** Electrophysical modification of basalt threads 101
- Zlobina I.V.** Affect of variably sized impulse loads on three-layer structures modified in the microwave electromagnetic field based on carbon fiber reinforced plastics 106

CHRONICLE

- Arkhangelsky Yu.S.** 25 years since publication of the work by V. Kinel'ev «Objective Necessity. History, Problems, and Prospects for Russia's Higher Education Reform» 114
- Information for Authors 125

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.365.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ

Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина

DESIGNING A CONTINUOUS UHF OF ELECTROTHERMIC INSTALLATION FOR HEATING FLUIDS AT LAMINAR FLOW

Yu.S. Arkhangelsky, V.O. Yudina

Предложен алгоритм проектирования методической СВЧ электротермической установки на камере лучевого типа для нагрева жидкости в потоке при ламинарном течении. Сформирована согласованная краевая задача электродинамики, теплопроводности и гидравлики, на решении которой строится проектирование установки. Предложен расчет профиля транспортного канала в рабочей камере установки.

Ключевые слова: *методическая СВЧ электротермическая установка, согласованная краевая задача электродинамики, теплопроводности и гидравлики, проектирование, транспортный канал, СВЧ генератор, электродвигатель, электрический привод*

Нагрев потока жидкости – одна из первых задач, привлечших к себе внимание первых разработчиков установок диэлектрического нагрева, в которых для достижения технологического эффекта используется энергия СВЧ электромагнитных колебаний (энергия СВЧ электромагнитного поля, СВЧ энергия) [1-4]. В последующие годы эта тема не потеряла своей актуальности в первую очередь из-за того, что речь шла об интенсификации процессов пастеризации (стерилизации) молока [5-8], а применение СВЧ энергии позволяет существенно сократить за счет объемного нагрева потока время тер-

An algorithm for designing a methodical microwave of an electro-thermal installation on a beam-type chamber for heating a fluid in a stream with a laminar flow is proposed. A coordinated boundary problem of electro-dynamics, thermal conductivity and hydraulics has been formed, on the solution of which the installation design is built. The proposed calculation of the profile of the transport channel in the working chamber of the installation

Keywords: *methodical microwave electro-thermal installation, coordinated boundary problem of electro-dynamics, thermal conductivity and hydraulics, design, transport channel, microwave generator, electric motor, electric drive.*

мообработки по сравнению с традиционным энергоподводом к потоку жидкости. Однако, на наш взгляд, этим работам не хватает системного учета соотношений (закономерностей) гидравлики, необходимых для проектирования методических СВЧ электротермических установок.

Лишь в последние годы появились работы о учете при проектировании методической СВЧ электротермической установки параметров СВЧ генератора (источника СВЧ энергии), электропривода, входного и выходного штуцеров, транспортного канала транспортной системы такой установки [9-

18], закономерностей гидравлики [19-23]. Интерес к установкам для СВЧ нагрева жидкостей в потоке можно объяснить двумя причинами. Во-первых, это методические СВЧ электротермические установки, которые имеют большую производительность, чем установки, работающие в периодическом режиме, при прочих равных условиях, но порядок проектирования методических СВЧ электротермических установок требует уточнения, включения в систему проектирования вопросов оптимизации транспортной системы. Во-вторых, появилась задача нагрева жидкости в потоке для разжижения (уменьшения вязкости) жидкости [21].

Рассмотрим имеющиеся здесь вопросы.

Так, при проектировании рабочей камеры следует учитывать влияние вязкости жидкости на поперечное сечение потока жидкости. Действительно, из-за поглощения потоком жидкости по транспортному каналу рабочей камеры СВЧ энергии, поступающей в рабочую камеру от источника (источников) СВЧ энергии, температура потока будет повышаться вдоль всего транспортного канала (трубы), по которому течет жидкость от входного шлюза к выходному. Но с увеличением температуры жидкости уменьшается ее вязкость. Например, по Пуазейлю у воды

$$v = \frac{0,01775}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2}, \quad (1)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости ($\text{см}^2\text{с}^{-1}$); T – температура жидкости ($^{\circ}\text{C}$).

Согласно соотношению (1) при нагреве воды от температуры $T = 20^{\circ}\text{C}$ до температуры пастеризации $T = 80^{\circ}\text{C}$ имеем $v(80^{\circ}\text{C})/v(20^{\circ}\text{C}) = 2,9$, то есть кинематический коэффициент вязкости у воды уменьшается почти в 3 раза. Но чем меньше вязкость, тем с большей скоростью при том же давлении и других тех же условиях протекает жидкости по транспортному каналу, но остается постоянным расход жидкости

$$G = v(z) S(z), \quad (2)$$

где $v(z)$ – средняя скорость течения жидкости по транспортному каналу в сечение z ; $S(z)$ – площадь поперечного сечения потока в сечение z .

Так что согласно соотношению (2) с увеличением температуры потока вдоль транспортного канала площадь поперечного сечения потока будет уменьшаться, то есть жидкость не будет заполнять все поперечное сечение трубы (транспортного канала).

Другими словами, при горизонтальном расположении транспортного канала рабочей камеры между поверхностью потока и внутренней поверхностью транспортного канала (трубы) появится свободное от жидкости пространство. Если транспортный канал расположен вертикально, то поток будет занимать часть объема трубы канала, перемещаясь по ее центру. Об особенностях такого режима течения сказано в работе [20]. Изменение $S(z)$ скажется на распределении СВЧ электромагнитного поля в области потока, а для устранения этой проблемы предложено уменьшать вдоль транспортного канала его поперечное сечение [21]. Это обстоятельство тоже следует учитывать при проектировании методической СВЧ электротермической установки для нагрева жидкости в потоке.

Но изменение геометрии поглощающего СВЧ энергию потока жидкости приведет к изменению величины поглощённой СВЧ мощности вдоль транспортного канала, это скажется на температуре потока, что в свою очередь повлияет на изменения v и S . Для учета всех этих взаимосвязанных процессов следует сформировать согласованную (самосогласованную) краевую задачу электродинамики, теплопроводности и гидравлики. Эта задача имеет вид

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \text{rot } \mathbf{E} &= \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0, \\ \text{div } \mathbf{D} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v \nabla \theta = a_g \nabla^2 \theta + \frac{P_{y\theta}}{c_{\partial} \rho_{\partial}},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v + \frac{1}{\rho} \text{grad } p = \frac{v}{\rho} \Delta v + F,$$

где H, E – напряженности магнитной и электрической составляющих электромагнитного поля; j – плотность тока проводимости; B, D – вектора магнитной и электрической индукции; $\theta = T - T_0$; T, T_0 – температуры диэлектрика в момент времени t_n в начале нагрева; a_g – коэффициент теплопроводности диэлектрика; v – скорость транспортировки диэлектрика внутри рабочей камеры по транспортному каналу; $P_{y\theta} = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \text{tg } \delta / E^2$; ω – круговая частота; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; $\text{tg } \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика; ρ_g – плотность диэлектрика; p – давление, F – массовая сила.

Первые четыре уравнения в (3) – уравнения Максвелла [24], пятое уравнение – уравнение теплопроводности [25], шестое уравнение – уравнение Навье – Стокса [23]. Уравнение Навье – Стокса в приведенной форме справедливо для ламинарного потока несжимаемой жидкости и дает возможность определить среднюю (осредненную) скорость потока жидкости в зависимости от $v(T)$.

Граничные условия электродинамической задачи (уравнения Максвелла) и тепловой задачи (уравнение теплопроводности) в СВЧ электротехнологии хорошо известны, используются и подробно изложены, например, в работах [7, 8]. Согласно граничным условиям уравнения Навье – Стокса скорость потока жидкости на границе с трубой транспортного канала равна нулю.

При проектировании методической СВЧ электротермической установки необходимо определить требуемую СВЧ мощность источника СВЧ энергии (мощность СВЧ генератора), выбрать тип рабочей камеры и рассчитать её геометрию, определить габариты транспортного кана-

ла транспортной системы, выбрать конструкцию входного и выходного шлюзов, определить мощность электродвигателя электропривода транспортной системы, провести математическое моделирование технологического процесса, обеспечить максимально допустимую экономическую эффективность установки, убедиться в целесообразности ее использования.

При проектировании считается известной требующаяся производительность установки (возможно ее надо установить на основе маркетинговых исследований и технико-экономической оптимизации методического СВЧ электротермического оборудования).

Часть этих расчетов рассмотрена. Например, вопросы целесообразности применения в конкретной технологии методической СВЧ электротермической установки, ее конкурентоспособности, технико-экономической оптимизации структуры и параметров СВЧ оборудования для реализации проекта подробно изложены в работах [7, 8, 16, 26-29].

Большинство вопросов о расчете рабочей камеры, выборах параметров источника СВЧ энергии и электропривода, транспортного канала и шлюзов загрузки и выгрузки обрабатываемого диэлектрика.

Так, при выборе типа рабочей камеры, на наш взгляд, предпочтения заслуживает камера лучевого типа (КЛТ) (рис. 1, 2) [30]. Эти камеры имеют простую конструкцию, их расчет проще, чем камер с бегущей волной (КБВ) [31], их можно снабжать СВЧ энергией от одного или нескольких источников СВЧ энергии, их энергетическая эффективность (КПД по использованию СВЧ энергии) может быть сколь угодно приближена к единице. Недостатков у КЛТ, пожалуй, два: она дороже и занимает большую площадь. Но эти недостатки обычно окупаются вполне приемлемой экономической эффективностью такой установки.

Поток жидкости вдоль КЛТ в транспортном канале (трубе) прямоугольного поперечного сечения.

Самая простая конструкция КЛТ, в которой нагревается жидкость, показана на рис. 1 а и 2 а.

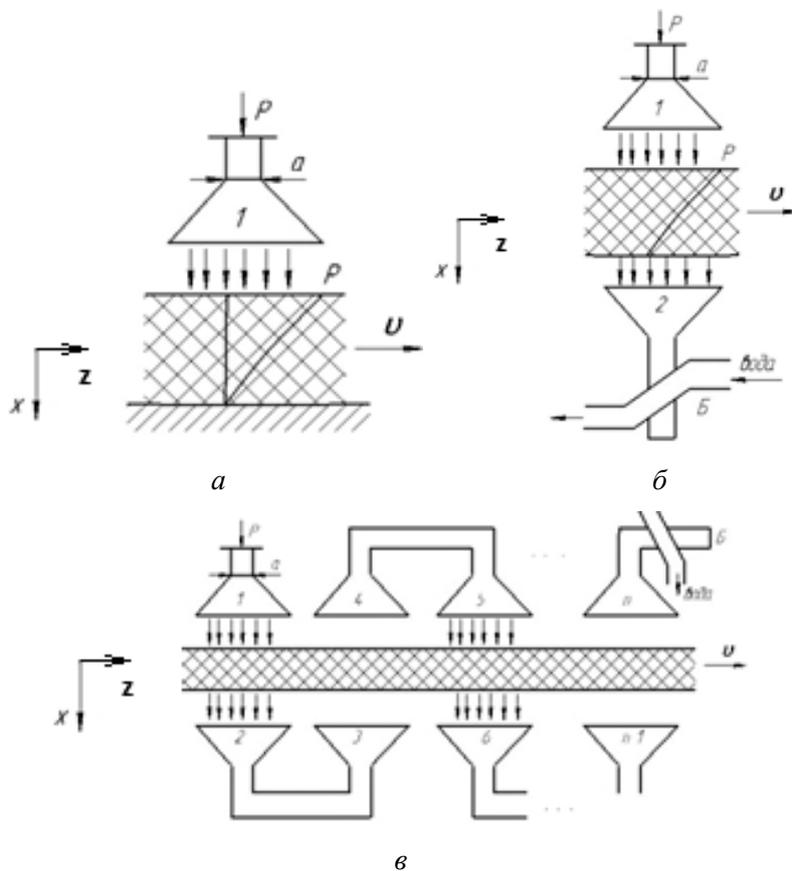


Рис. 1. Компоновка КЛТ методической СВЧ электротермической установки (продольное сечение):
a – с одним излучающим рупором; *б* – с одним излучающим, одним приемным рупорами;
в – меандровая КЛТ (Б – балластная нагрузка; 1, 3, 5, ..., $n - 1$ – излучающие рупоры;
 2, 4, 6, ..., n – приемные рупоры; u – скорость движения потока жидкости;
 P – СВЧ мощность источника СВЧ энергии, a – размер широкой стенки волновода)

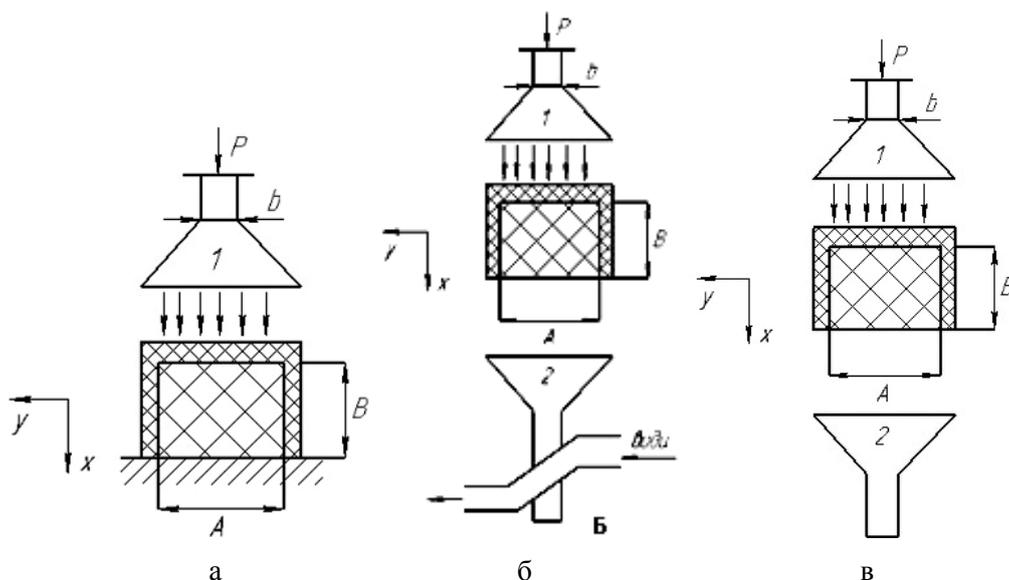


Рис. 2. Компоновка КЛТ методической СВЧ электротермической установки (поперечное сечение):
a – вариант рис. 1 *a*; *б* – вариант рис. 1 *б*; *в* – вариант рис. 1 *в*; (Б – балластная нагрузка;
 1 – излучающие рупоры; 2 – приемные рупоры; P – СВЧ мощность источника СВЧ энергии;
 А и В – ширина и высота потока жидкости в поперечном сечении;
 b – ширина узкой стенки волновода ввода СВЧ энергии)

Имеется в виду, что толщина потока жидкости B достаточно велика, и прошедшая в поток СВЧ электромагнитная волна на длине B практически полностью затухает, то есть

$$P(B) = Pe^{-2\alpha B} \ll P,$$

где $P(B)$ – СВЧ мощность в сечении $x = B$; P – СВЧ мощность, поступающая в поток от излучающего рупора; α – коэффициент затухания в жидкости, причем

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'}}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}; \quad (4)$$

λ – длина волны СВЧ генератора; ε' , $\operatorname{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь жидкости.

В этом случае для достижения заданной производительности скорость течения может быть весьма малой, тогда течение будет, несомненно, ламинарным, но нижняя часть потока не будет нагрета до заданной температуры. Для устранения этого потребуется существенно увеличить СВЧ мощность P СВЧ генератора, а это быстрее всего приведет к перегреву (возможно кипению) верхней части потока жидкости.

Достаточно равномерно по поперечному сечению поток жидкости может быть нагрет в конструкции КЛТ, показанной на рис. 1б, 2б. В этом случае придется существенно уменьшить толщину B . Но тогда значительная часть СВЧ мощности будет перенесена СВЧ электромагнитной волной в приемный рупор и рассеяна в балластной нагрузке, а это существенно снизит энергетическую и экономическую эффективности установки.

Практический интерес представляет меандровая КЛТ (рис. 1 в, 2 в) [32]. Здесь допускается прохождение сквозь поток жидкости СВЧ мощности, что позволяет более равномерно нагревать жидкость в каждой секции меандра, а повторное использование прошедшей сквозь поток СВЧ мощности для нагрева жидкости в следующей секции меандра увеличивает равномерность нагрева, позволяет получить высокую энергетическую эффективность и достаточную экономическую эффективность установки.

Поток жидкости должен перемещаться в меандровой системе параллельно плоскости апертуры излучающих и приемных рупоров (поперечных сечении волноводов, соединяющих рупоры с СВЧ генератором (генераторами) в направлении от одной узкой стенки прямоугольного волновода к другой узкой стенке).

Принципиально важно выбрать частоту СВЧ генератора и размеры поперечного сечения потока жидкости $A \times B$. Эти параметры связывает условие сохранения ламинарного течения на всей длине транспортного канала

$$\operatorname{Re} = \frac{\nu d}{\nu} < 2300, \quad (5)$$

где $d = \frac{S_{AB}}{\Pi_{AB}}$; $S_{AB} = AB$ – площадь поперечного сечения транспортного канала; $\Pi_{AB} = 2(A+B)$ – периметр поперечного сечения транспортного канала; $\nu = \frac{G}{S_{AB}}$; G –

производительность проектируемой СВЧ ЭТУ, определенная в результате маркетинговых исследований товарного рынка, так что с учетом (5)

$$\frac{G}{2\nu(A+B)} < 2300, \quad (6)$$

и чем больше должна быть производительность методической СВЧ ЭТУ, тем больше приходится выбирать Π_{AB} , то есть потребуются переходить на более низкую разрешенную частоту, так как при частоте СВЧ генератора 2450 МГц вывод энергии имеет сечение 4,5×9 см (апертура излучающего рупора 10×10 см), при частоте 915 МГц – 11×22 см (апертура излучающего рупора 25×25 см), при частоте 433 МГц – 25×50 см (апертура излучающего рупора 60×60 см).

Наибольшее распространение в СВЧ электротехнологии имеет частота 2450 МГц, на этой частоте наибольший ассортимент магнетронов [26], и можно рекомендовать именно эту частоту, но при большом значении G условие (5) будет нарушаться. Чтобы этого не было, придется заданный объем продукции получать не на одной, а на не-

скольких одинаковых методических СВЧ ЭТУ, работающих параллельно. Целесообразность такого построения методического СВЧ электротермического оборудования и его оптимальная структура определяется технико-экономическими расчетами [27-29].

Что касается выборов размера конкретного сечения транспортного канала, то ширина транспортного канала A выбирается равной размеру грани апертуры излучающего рупора, направленной поперек направления движения потока жидкости.

Однозначного способа определения толщины (глубины) транспортного канала B не существует. С одной стороны, для увеличения равномерности нагрева жидкости в каждой секции меандровой КЛТ величина B должна быть малой, но при этом, с другой стороны, поглощение СВЧ мощности в каждой секции будет небольшим, и для повышения энергетической (экономической) эффективности придется увеличивать число секций меандровой КЛТ, установка станет длиннее и дороже. В таком случае если требуется ламинарный режим течения жидкости по всей длине транспортного канала, величину B следует выбирать такой, чтобы в конце транспортного канала, где у жидкости уменьшается вязкость, увеличивается скорость, отчего уменьшается площадь поперечного сечения потока, то есть при $A = \text{const}$ и уменьшаемой B , поток оставался ламинарным, то есть выполнялось условие (6).

Пусть в КЛТ СВЧ мощность поступает от одного СВЧ генератора в первую секцию. Мощность СВЧ генератора для обеспечения заданной производительности при нагреве до заданной температуры можно рассчитать по соотношению

$$(1 - |\Gamma|^2)P = c_g \rho_g G(T_n - T_0),$$

где T_n, T_0 – заданная и начальная температуры жидкости; G – коэффициент отражения от поверхности потока в секции.

Расчет коэффициент отражения Γ приведен в работе [30]. Если это отражение не учитывать, то в первой секции поток жидкости нагреется до температуры

$$T_1 = T_0 + \frac{P(1 - e^{-2\alpha_1 B_1})}{c_g \rho_g G B_1 C},$$

где α рассчитывает по соотношению (4) при $\varepsilon'(T_0)$; $\text{tg } \delta(T_0)$; $B_1 = B$; C – длина транспортного канала (потока жидкости), равная длине стороны апертуры, направленной вдоль потока жидкости.

Затем находится $v_1(T_1)$ и по уравнению Навье – Стокса определяется $v_1 [v_1(T_1)]$, а далее по

$$S_{AB1}v_1 = S_{AB2}v_2,$$

где S_{AB1}, S_{AB2} – сечения потока (транспортного канала) на входе потока и в конце первой секции, находим B_2 потока во второй секции:

$$B_2 = B_1 \frac{v_1}{v_2}.$$

Таким образом, в первой секции сохраняется сечение (толщина) потока, равное сечению на входе секции, а во второй секции толщина потока $B_2 < B_1$.

Подобные расчеты продолжают от секции к секции, при этом учитывается, что каждый следующий излучающий рупор передает в секцию все меньшую СВЧ мощность, и в каждой секции, как и во второй, уменьшается толщина потока жидкости, то есть глубина транспортного канала. Расчет продолжается до достижения на выходе очередной секции температуры $T_n = T_n$.

Что касается расчета мощности электродвигателя насоса транспортной системы, то для рассчитанного транспортного канала методической КЛТ по уравнению Бернулли находится давление, которое нужно создать на входе транспортного канала, чтобы получить заданную производительность методической СВЧ ЭТУ, и рассчитать мощность электродвигателя по рекомендациям, данным в работах [18, 19].

Наконец, математическое моделирование процесса нагрева потока в каждой секции методической КЛТ приводится так, как это предложено в работах [30, 32].

Итак, предложена согласованная краевая задача электродинамики, теплопровод-

ности и гидравлики, позволяющая провести расчет рабочей камеры лучевого типа методической СВЧ электротермической установки, работающей в ламинарном режиме.

Показан порядок расчета транспортного канала КЛТ с учетом изменения вязкости и скорости потока, определен порядок проектирования установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ энергетика / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 2. 272 с.
2. **Рогов И.А.** Физические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. М.: Пищевая промышленность, 1974. 583 с.
3. **Рогов И.А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. М.: Агропромиздат, 1988. 325 с.
4. **Рогов И.А.** Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 199 с.
5. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов, В.Н. Панасенко и др. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 77 с.
6. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.
7. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
8. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
9. **Архангельский Ю.С.** Толкательная СВЧ электротермическая установка на базе камеры с бегущей волной / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.
10. **Юдина В.О.** Конвейерная СВЧ электротермическая установка на базе камеры лучевого типа / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 5-7.
11. **Юдина В.О.** Транспортные системы СВЧ электротехнологических установок, работающих в методическом режиме / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 10-12.
12. **Юдина В.О.** Особенности термообработки диэлектрика в толкательной СВЧ электротехнологической установке на базе камеры с бегущей волной / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 13-15.
13. **Архангельский Ю.С.** Согласованные задачи в проектировании методических СВЧ электротермических установок / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 10-12.
14. **Юдина В.О.** Барабанные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 25-29.
15. **Архангельский Ю.С.** К вопросу о многофункциональности СВЧ электротехнологических установок на камерах лучевого типа / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 34-40.
16. **Юдина В.О.** Конкуренентоспособность и целесообразность применения методических СВЧ электротермических установок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017 № 4 (17). С. 23-27.
17. **Юдина В.О.** Электропривод методических СВЧ электротермических установок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 27-29.
18. **Юдина В.О.** К расчету мощности электропривода методической СВЧ электротермической установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 3 (20). С. 42-45.

19. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термические установки для обработки жидкости в потоке / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 8-13.

20. **Высоцкий Л.И.** О некоторых неизотермических ламинарных течениях жидкостей / Л.И. Высоцкий // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 11-15.

21. **Архангельский Ю.С.** Особенности конструкции и расчета методической СВЧ электротермической установки для нагрева вязкой жидкости в потоке / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2018. № 2 (19). С. 39-42.

22. **Юдина В.О.** Применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1 (22). С. 22-34.

23. **Седов Л.И.** Механика сплошной среды / Л.И. Седов. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.

24. **Вайнштейн Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.

25. **Исаченко В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1975. 486 с.

26. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудо-

вания / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.

27. **Колесников Е.В.** Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 283 с.

28. **Колесников Е.В.** Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок / Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. 197 с.

29. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.

30. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.

31. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232 с.

32. **Архангельский Ю.С.** Меандровые системы в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Научная книга, 2012. 210 с.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Юдина Виолетта Олеговна – ассистент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Violetta O. Yudina – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ УСТАНОВКАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА

С.В. Тригорлый, В.В. Захаров, В.С. Алексеев

NUMERICAL SIMULATION OF MELTING DIELECTRICS IN MICROWAVES BASED ON ELECTRON BEAM MODE

S.V. Trigorly, V.V. Zakharov, V.S. Alekseev

Рассмотрено численное моделирование процесса СВЧ плавления диэлектрика с применением СВЧ установки лучевого типа с излучающей системой на базе рупорной антенны (на примере плавления льда). Модель представляет собой взаимосвязанную задачу электродинамики и теплопроводности, решаемую с помощью метода конечных элементов, реализованного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Примененная методика моделирования позволяет учитывать характеристики реальной излучающей системы, а также изменение электро- и теплофизических свойств диэлектрика в процессе плавления.

Ключевые слова: численное моделирование, СВЧ термообработка, плавление, диэлектрики, рупорная антенна

Процессы СВЧ плавления диэлектриков имеют перспективы применения в следующих целях: оттаивание грунтов и снежно-ледяных масс [1], нанесение диэлектрических пленок на металлические подложки, сварка полимерных материалов, устранение асфальтопарафиновых [2] и кристаллогидратных отложений в нефте-, газопроводах, плавление жиров (в пищевой промышленности) [3] и т.д.

При разработке СВЧ электротехнологических установок сложность и взаимосвязанность тепловых и электродинамических процессов, происходящих при СВЧ термообработке, диктует необходимость проведения их численного моделирования с целью прогнозирования формирования

Numerical simulation of the process of microwave dielectric melting using the beam mode microwave installation based on the horn antenna (using the example of ice melting) is considered. This model is a linked problem between electrodynamics and thermal conductivity, which is solved using the finite element method implemented by the COMSOL Multiphysics software. The applied method of simulation allows taking into account the characteristics of an actual radiating system, as well as the change in electrical and thermal properties of the dielectric in the course of the melting procedure.

Keywords: numerical simulation, microwave heat treatment, melting, dielectric, horn antenna

структуры диэлектриков, во многом обусловленной распределением в них температурных полей.

При численном моделировании процессов СВЧ плавления диэлектриков необходимо учитывать следующие явления:

– скачкообразные изменения электро- и теплофизических свойств диэлектрика при переходе из твердой фазы в жидкую (при расплавлении);

– относительно плавные изменения электро- и теплофизических свойств диэлектрика в твердой и жидкой фазе с ростом температуры;

– появление, перемещение, изменение формы и исчезновение фазовых границ в процессе плавления.

Процессы СВЧ термообработки диэлектриков, включая и плавление, могут быть описаны взаимосвязанной задачей электродинамики и тепломассопереноса [4], решаемой с применением соответствующих методов решения тепловой части задачи, моделирующих процессы плавления.

В имеющихся на текущий момент публикациях, посвященных вопросам моделирования процессов СВЧ плавления диэлектриков, как правило, рассматриваются модели СВЧ плавления льда.

В работах [5, 6] решение задачи моделирования СВЧ плавления слоя льда проводилось в одномерной геометрической постановке, что не дает возможность учитывать характеристики реальных излучающих систем, формирующих распределение электромагнитного поля в слое диэлектрика. Данные модели могут быть применены для предварительного оценочного моделирования перед проведением моделирования более высокого уровня.

Рассмотрим численное моделирование плавления слоя льда, расположенного на слое грунта бесконечной глубины, с применением СВЧ установки лучевого типа с излучателем в виде рупорной антенны (рис. 1).

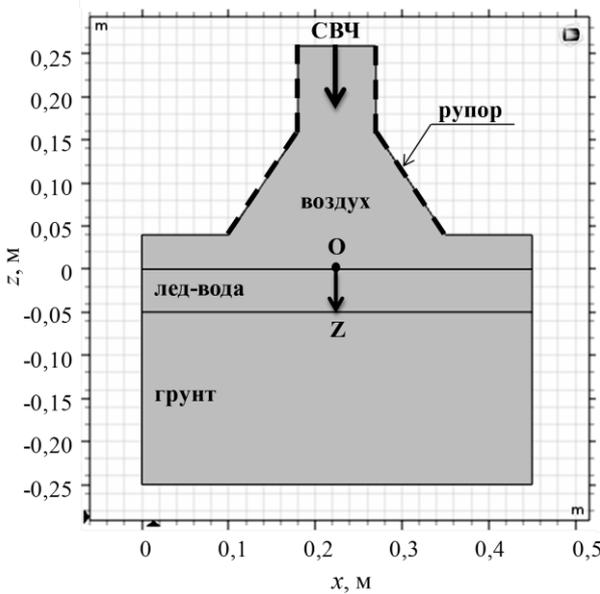


Рис. 1. Геометрическая модель

Моделирование осуществлялось с применением программного обеспечения

COMSOL Multiphysics, реализующего метод конечных элементов.

При моделировании приняты следующие допущения.

Пренебрегают явлением массопереноса в твердой фазе, гидродинамическими явлениями в жидкой фазе (свободная конвекция воды, возникающая при изменении плотности ее слоев при нагреве, поверхностное натяжение и пр.).

В связи с этим математическое описание представляет собой взаимосвязанную задачу электродинамики и теплопроводности:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\varepsilon' - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} [\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1, \mathbf{n}] &= 0, [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0, \\ \mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) &= 0, \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) = q_v, \quad (4)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \alpha(T_{\text{ext}} - T), \quad (5)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (6)$$

$$T_1 = T_2, \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} \right)_s = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} \right)_s, \quad (7)$$

$$T_{t=0} = T_0,$$

$$q_v = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \cdot |\mathbf{E}|^2, \quad (8)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ε' – относительная диэлектрическая проницаемость; $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''$ – электрическая проводимость; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; ε_0 – электрическая постоянная; ε'' – коэффициент потерь; f – частота электромагнитного поля; \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности; H_1, H_2, E_1, E_2 – векторы напряженности магнитного и электрического поля; D_1, D_2, B_1, B_2 – векторы электрической и магнитной индукции для сред 1 и 2 соответственно; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; T – температура; t – время;

λ – коэффициент теплопроводности; q_v – мощность внутренних источников теплоты; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности; T_{ext} – температура окружающей среды, T_1, T_2 – температуры сопрягающихся поверхностей теплообмена областей 1 и 2; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности областей 1 и 2; T_0 – начальная температура.

Грунт бесконечной глубины заменяется слоем, толщиной 20 см, исходя из следующих соображений:

– при такой толщине слоя грунта в электродинамической части задачи отражением электромагнитной волны от нижней границы можно пренебречь (с учетом ее малой глубины проникновения);

– в тепловой части задачи нижняя граница грунта представляется в виде теплоизолятора.

Моделирование осуществляется в двумерной геометрической постановке, так как трехмерное моделирование даже с учетом применения симметрий в геометрической модели приводит к необходимости задействования существенных вычислительных ресурсов (требуемый объем ОЗУ порядка 100 Гб).

Для моделирования вышеуказанных явлений при решении тепловой части задачи предлагается применение метода кажущейся теплоемкости [7].

Предполагается, что фазовый переход происходит в интервале температур ΔT от $T_{pc} - 0,5 \cdot \Delta T$ до $T_{pc} + 0,5 \cdot \Delta T$, где T_{pc} – температура фазового перехода (для рассматриваемой задачи $T_{pc} = 0^\circ\text{C}$). Теплофизические свойства слоя «вода/лед» в этом интервале моделируются с применением функции $\theta(T)$ (фазового индикатора), представляющего собой долю фазы до перехода (твердой фазы), которая равна $\theta_1 = 1$ до $T_{pc} - (0,5) \cdot \Delta T$ и $\theta_2 = 1 - \theta_1 = 0$ после $T_{pc} + 0,5 \cdot \Delta T$ (жидкой фазы).

Удельная теплоемкость c в уравнении теплопроводности (4) в диапазоне температур ΔT задается в виде

$$c_{pc} = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 c_1 + \theta_2 \rho_2 c_2) + L \frac{d\alpha_m}{dT}, \quad (5)$$

где ρ – плотность воды/льда, задаваемая в виде

$$\rho = \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2, \quad (6)$$

ρ_1, ρ_2, c_1, c_2 – плотность и удельная теплоемкость твердой и жидкой фаз, в общем случае зависящие от температуры; L – скрытая теплота плавления; α_m – массовая доля каждой фазы, принимающая значения $-0,5$ до фазового перехода и $+0,5$ после фазового перехода, определяемая в виде

$$\alpha_m = \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{2\rho}. \quad (7)$$

В уравнении (5) первый член представляет собой эффективную теплоемкость, второй член – распределение скрытой теплоты плавления.

В диапазоне температур плавления ΔT коэффициент теплопроводности задается в виде

$$\lambda = \theta_1 \lambda_1 + \theta_2 \lambda_2, \quad (8)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности твердой и жидкой фаз соответственно.

В задаче электродинамики, моделируемой уравнением Гельмгольца (1) с соответствующими граничными и начальными условиями (2), (3) [8], а также в (8), относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' и коэффициент потерь ϵ'' являются функциями температуры и должны обновляться на каждом временном шаге в соответствии с заданной зависимостью.

Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2.

Таблица 1

Теплофизические свойства воды

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho_2(T)$	$c_2(T)$	$\lambda_2(T)$
0	999,8	4217	0,569
20	998,2	4183	0,599
40	992,2	4174	0,635
60	983,2	4182	0,659
80	971,8	4195	0,674
100	958,4	4220	0,683

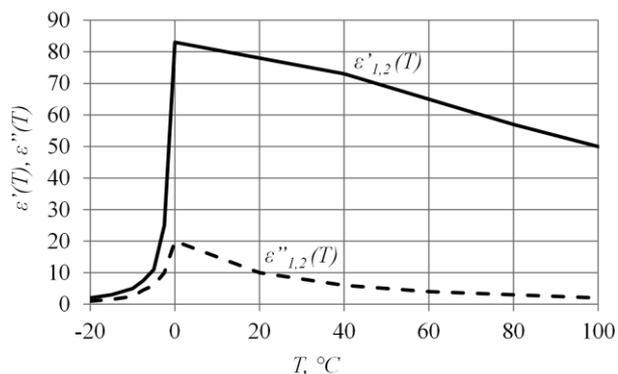


Рис. 2. Диэлектрические свойства воды/льда

Таблица 2

Основные параметры модели

Параметр	Значение
Температура плавления, T_{pc} , °C	0
Начальная температура льда, T_0 , °C	-5
Температура окружающей среды, T_{ext} , °C	-5
Плотность льда, ρ_1 , кг/м ³	918
Плотность грунта, ρ_3 , кг/м ³	2000
Теплопроводность льда, λ_1 , Вт/(м·К)	2,31
Теплопроводность грунта, λ_3 , Вт/(м·К)	1,49
Удельная теплоемкость льда, c_1 , Дж/(кг·К)	2052
Удельная теплоемкость грунта, c_3 , Дж/(кг·К)	1150
Удельная теплота плавления льда, L , кДж/кг	333,5
Диэлектрические свойства грунта, $\epsilon'_3 - j \cdot \epsilon''_3$	2,6 - j · 0,377
Мощность СВЧ, P_{in} , кВт	0,8
Частота СВЧ, f , ГГц	2,45
Интервал фазового перехода, ΔT , К	0,5

Как видно из табл. 1, 2 и рис. 2, в электродинамической части задачи учитываются температурные зависимости диэлектрических свойств воды и льда. Теплофизические свойства льда ввиду не-

значительности их изменения при изменении температуры от -5 до 0°C принимались постоянными. Тепло- и электрофизические свойства грунта принимались постоянными во всем диапазоне температур процесса.

Рассмотрим результаты моделирования. Распределения напряженности электрического поля в слоях воздуха, воды/льда и грунта для различных моментов времени приведены на рис. 3. Распределения температурного поля в слоях воды/льда и грунта для различных моментов времени приведены на рис. 4.

На рис. 3 кривыми показаны линии одинаковой напряженности электрического поля. Видно, что поле E имеет сложную конфигурацию, обеспечиваемую излучающей системой и отражениями электромагнитной волны от фазовой границы и границы слоев «вода/лед» – «грунт».

На рис. 4 кривая линия в слое «вода/лед» со значением температуры $T = 0^\circ C$ соответствует центру диапазона температур фазового перехода ΔT . Видно, что к моменту времени $t = 4800$ с происходит полное проплавление льда в зоне среднего температурного максимума на глубину 5 см. Средняя глубина проплавления к данному моменту времени составляет около 2,5 см на ширину 15 см (ширина раскрытия рупора 25 см).

На рис. 5, 6 приведены распределения напряженности электрического поля и мощности внутренних источников теплоты по глубине слоя «вода/лед» (вдоль линии Oz, рис. 1) для различных моментов времени.

Из рисунков видно, что изменение формы и положения фазовой границы, а также изменения диэлектрических свойств во времени приводят к существенному изменению профиля напряженности электрического поля и зависящего от него профиля внутренних источников теплоты по глубине слоя «вода/лед»: если в начальный момент времени отражения электромагнитной волны от границы «лед – грунт» практически отсутствовали, то с увеличением времени плавления до $t = 7200$ с начинается процесс образования ярко выраженных стоячих волн, что приводит к изменению характера тепловыделения в слое «вода/лед».

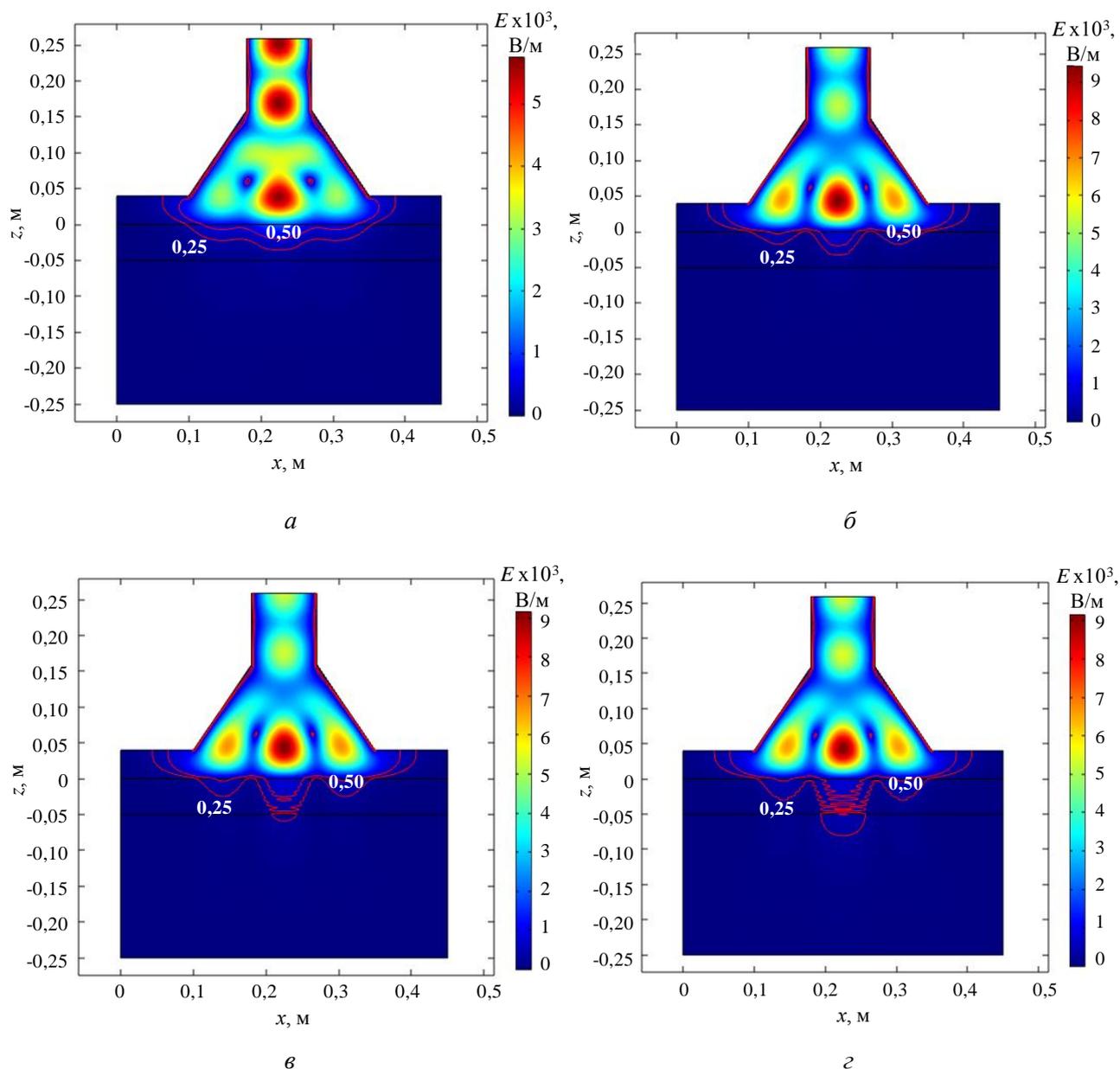


Рис. 3. Распределения напряженности электрического поля в слоях воздуха, воды/льда, грунта для моментов времени плавления: $a - t = 60$ с, $b - t = 2400$ с, $v - t = 4800$ с, $z - t = 7200$ с

Появление стоячих волн связано с тем, что при расплавлении ухудшается согласование слоев «вода/лед» – «грунт», поскольку разница диэлектрической проницаемости слоя «вода/лед» и «грунт» при расплавлении увеличивается за счет увеличения слоя воды (с более высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon_2' = 50 \div 83$) и уменьшению слоя льда (с меньшей диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1' = 5 \div 20$).

Установлено существенное влияние изменения электро- и теплофизических

свойств расплавляемого диэлектрика на распределение напряженности электрического поля в нем, определяющее характер тепловыделения: напряженность электрического поля в точке О в начальный момент времени на 42% больше, чем при $t = 7200$ с, при этом мощность внутренних источников тепла изменяется на 82%. При этом ввиду существенно большего поглощения СВЧ энергии водой (по сравнению со льдом), тепловыделение при $t = 7200$ с более равномерное, чем в начале плавления.

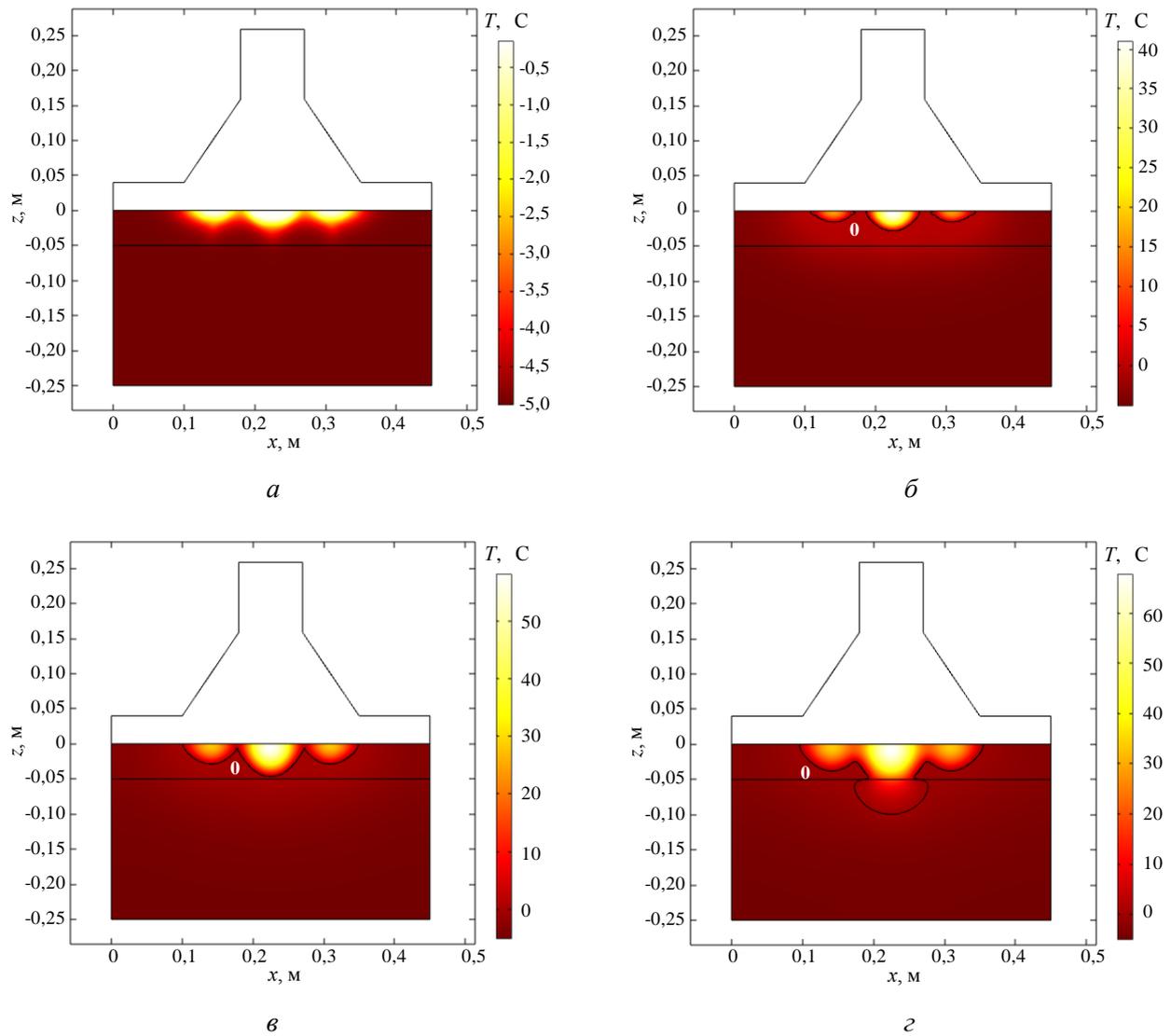


Рис. 4. Распределения температурного поля в слоях воды/льда, грунта для моментов времени плавления: $a - t = 60 \text{ с}$, $б - t = 2400 \text{ с}$, $в - t = 4800 \text{ с}$, $г - t = 7200 \text{ с}$

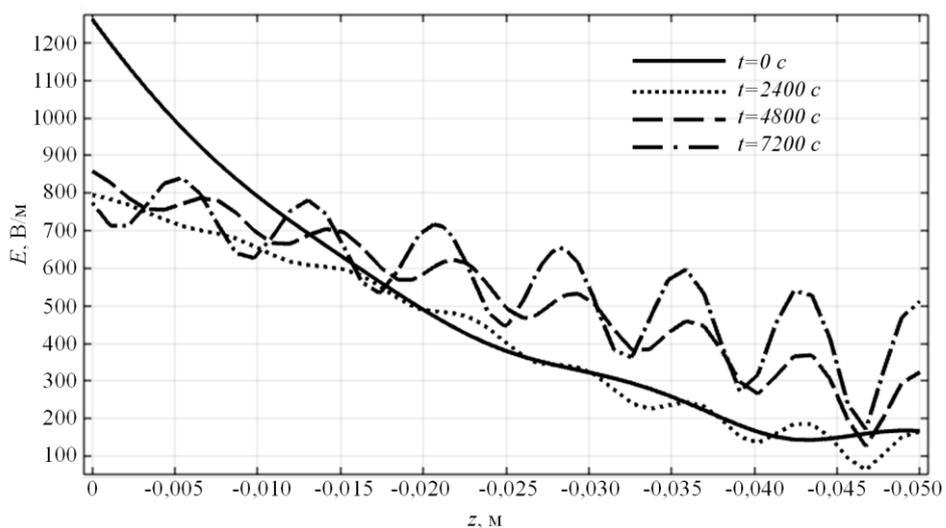


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля по глубине льда (вдоль линии Oz, рис. 1) для различных моментов времени

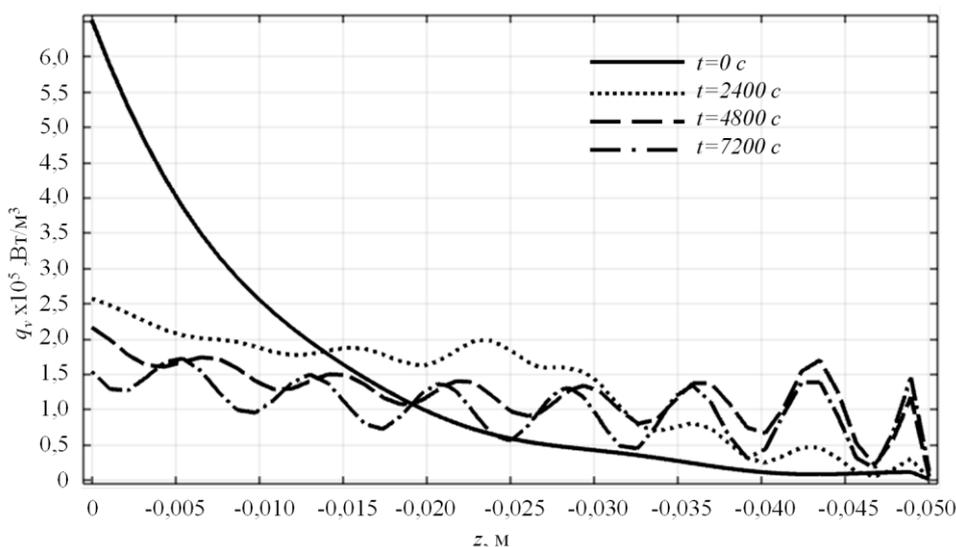


Рис. 6. Распределение мощности внутренних источников теплоты по глубине льда (вдоль линии Oz, рис. 1) для различных моментов времени

Предложенная модель может быть использована при проектировании новых СВЧ электротехнологических установок

лучевого типа, реализующих процессы СВЧ плавления диэлектриков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лапочкин М.С.** Исследование процесса микроволнового нагрева различных фаз воды в виде трехслойных структур: теория и эксперимент / М.С. Лапочкин, О.Г. Морозов // Вестник МарГТУ. 2011. № 2. С. 24-29.

2. **Анфиногентов В.И.** Численное моделирование плавления асфальто-парафиновых отложений в трубе под действием СВЧ излучения / В.И. Анфиногентов, С.Р. Ганиева // Сеточные методы для краевых задач и приложения: материалы Десятой Междунар. конф. Казань, 2014. С. 86-88.

3. Математическое описание процесса плавления жира в СВЧ установке / М.В. Белова, Г.В. Новикова, И.Г. Ершова и др. // Естественные и технические науки. М.: Спутник+. 2015. № 6. С. 513-516.

4. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических

процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

5. **Анфиногентов В.И.** Численное моделирование фазовых переходов в плоскостной структуре при СВЧ нагреве / В.И. Анфиногентов, А.А. Тахауев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 3. С. 159-163.

6. **Тригорлый С.В.** Численное моделирование процессов СВЧ плавления диэлектриков / С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 5-10.

7. **Huy H.** Mathematical modelling of solidification and melting: a review / H. Huy, S.A. Argyropoulos // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 4. 1996. P. 371-396.

8. **Jianming J.** The Finite Element Method in Electromagnetics, 2nd ed. / J. Jianming. Wiley-IEEE Press, 2002. 389 p.

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

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

Захаров Вадим Валерьевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim V. Zakharov – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim S. Alekseev – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Статья поступила в редакцию 21.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

УДК 621.9.048.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЗУБОНАРЕЗАНИИ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

С.И. Агапов, Ю.И. Сидякин, А.Ф. Толстяков

DETERMINATION OF THE CAPACITY OF ULTRASONIC GENERATORS WHEN CUTTING FINE-PITCH GEARS

S.I. Agapov, Yu.I. Sidyakin, A.F. Tolstyakov

Рассмотрены вопросы расчета мощности ультразвукового генератора на примере экспоненциального концентратора с присоединенной заготовкой при зубонарезании мелко модульных зубчатых колес.

Ключевые слова: ультразвуковой генератор, пьезокерамические преобразователи, мелко модульные зубчатые колеса

Для выполнения операций, связанных с ультразвуковой обработкой зубчатых колес, требуется передача интенсивного ультразвукового воздействия от пьезоэлектрического преобразователя к заготовке. Это осуществляется с помощью различных концентраторов [1-3].

Значительный интерес представляют составные концентраторы, образованные соединением стержней переменного сечения, которые позволяют получать значи-

The paper discusses the issues related with estimation of the capacity of ultrasonic generators based on the example of exponential concentrators with attached workpieces in the process of fine-pitch gear cutting.

Keywords: ultrasonic generator, piezoceramic transducer, fine-pitch gears

тельно бóльшие коэффициенты усиления по сравнению с концентраторами простейших типов (при одинаковых размерах основания). Волноводно-излучающие системы со ступенчатыми концентраторами характеризуются узкой полосой рабочих частот и, следовательно, весьма ограниченной возможностью настройки по частоте при изменении нагрузки. Особенно перспективными являются ступенчатые концентраторы с переходным экспоненциаль-

ным участком, который расширяет полосу частот, в пределах которой концентратор и инструмент могут работать с достаточной эффективностью, и ослабляет напряжения, возникающие в месте сопряжения концентратора и заготовки. Как и обычные, они позволяют при небольших размерах входного сечения получать высокие значения коэффициента усиления, наличие переходного экспоненциального участка, уменьшая концентрацию напряжений, обеспечивает наиболее благоприятные условия для распространения колебаний, улучшает прочностные свойства и способность трансформировать нагрузку без существенного изменения резонансного режима в колебательной системе. При небольшой длине переходной части её влияние сказывается в основном на резонансной части системы.

Некоторые преимущества экспоненциального концентратора перед ступенчатым выявляются также в результате исследования влияния реактивной нагрузки. Износ инструмента приводит к изменению реактивной нагрузки, а так как коэффициент пересчёта для ступенчатого и конического концентратора выше, чем для экспоненциального, в первом и втором случаях происходит существенно большая расстройка колебательной системы. Следовательно, когда относительный износ инструмента велик, не следует применять ступенчатые концентраторы, хотя они имеют большой коэффициент усиления по смещению.

Применение концентраторов с расчётными волновыми длинами в качестве рабочих частотопонижающих накладок составных пьезокерамических преобразователей даёт ощутимый эффект при использовании высокочувствительной пьезокерамики с малыми диэлектрическими потерями или при работе концентратора на небольшую нагрузку. При этом уменьшаются потери в колебательной системе, что обуславливается несколькими причинами. Во-первых, поскольку пьезоэлемент смещается от узловой области преобразователя в сторону нерабочего торца, продольный размер накладки (выполненной из стали 20, то есть материала с большим волновым сопротив-

лением) сокращается; а так как накладка-концентратор выполнена из материала с меньшим волновым сопротивлением (сталь 40Х, закалена до HRCэ 44-46), то продольный размер всего преобразователя, рассчитанного на ту же частоту, должен существенно сократиться, в результате чего накладка уменьшится почти вдвое. Соответственно снижаются и потери. Во-вторых, вся область больших деформаций (то есть область максимальных потерь) располагается теперь в материале с малым волновым сопротивлением и затуханием. Применение одно-полуволновой системы неоправданно лишь в случае, когда она не обеспечивает удобство работы из-за малых продольных размеров или когда велик коэффициент усиления. В данном случае все отмеченные ограничения отсутствуют.

Для характеристики технологического процесса обработки металлов резанием при возбуждении в зоне обработки ультразвуковых колебаниях (УЗК) необходимо учитывать параметры этих колебаний.

Основные параметры, характеризующие рассматриваемый технологический процесс, следующие:

- акустические колебания в зоне резания;
- скорость, подача и глубина резания;
- температура, силы резания и стойкость режущего инструмента;
- качество обрабатываемой поверхности.

Для нас большой интерес представляют акустические параметры, позволяющие судить об УЗК в зоне резания. Последние являются существенно нелинейными колебаниями, потому что на них большое влияние оказывают силы трения и пластической деформации. Отклонение УЗК от гармонических можно объяснить влиянием на них технологического процесса и особенно силовой реакции при обработке детали. Поэтому определение нелинейных искажений УЗК позволяет непосредственно оценить эффективность колебаний в процессах резания.

Определение колебаний до первой гармонической составляющей будем называть интегральной оценкой колебаний, а с учётом изменения синусоиды в течение одного периода – оценкой колебаний за цикл.

При интегральной оценке колебаний фиксируются следующие параметры.

1. Амплитуда смещений УЗК в зоне резания – амплитуда колебания точки на заготовке по отношению к неподвижной координате в пространстве (например, по отношению к станине станка). В процессе обработки энергия УЗК передаётся на обрабатываемую деталь, возбуждая в ней колебания. Амплитуда смещений не учитывает амплитуду относительных колебаний инструмента и детали.

2. Амплитуда колебаний заготовки по отношению к основанию приспособления, в отличие от амплитуды смещений, учитывает реакцию обрабатываемой детали. При этом предполагается, что колебания детали гармонические. В частности, если процесс резания отсутствует, амплитуда смещений детали (при возбуждении колебаний через деталь) равна амплитуде колебаний инструмента по отношению к детали.

3. Амплитуды напряжений и смещений инструмента в колебательной системе распределены неравномерно. Причём максимуму (пучности) смещений обычно соответствует отсутствие узла напряжений, а узлу смещений соответствует пучность напряжений. Это положение будет справедливо только в том случае, если площадь поперечного сечения инструмента можно считать постоянной. Обычно колебания в зоне резания будут находиться в каком-то промежуточном состоянии между пучностью смещений и напряжений.

Для правильного протекания технологического процесса в большинстве случаев достаточно стабилизировать интегральные показатели колебаний. Большинство авторов, исследовавших до настоящего времени влияние УЗК на процесс резания, сходятся во мнении, что ультразвуковые колебания в ходе технологического процесса не стабильны [4]. Для аналитического определения колебаний в зоне резания необходимо выяснить распределение их по длине системы с бесконечным числом степеней свободы. УЗК в зоне резания можно возбуждать по двум каналам через режущий инструмент или через обрабатываемую де-

таль. Во всех случаях колебательные системы имеют длину на порядок большую, чем диаметр поперечного сечения. Тогда колебания в ней подчиняются законам стержневой системы [4].

Для дальнейших исследований сделаем следующие допущения.

1. Колебания чисто гармонические, то есть все рассуждения ведутся для интегральной оценки колебаний.

2. Центры тяжести поперечных сечений этой системы в равновесном состоянии лежат на одной прямой. Это условие почти всегда выполняется, так как при обработке режущим инструментом колебательная система и обрабатываемая деталь в большинстве случаев не симметричны относительно оси. В процессе резания возможно искажение плоскостей, перпендикулярных оси инструмента. Эти искажения, однако, не вносят существенных изменений в исследуемые процессы. Во-первых, при чисто гармонических колебаниях (в силу первого допущения) должен действовать принцип суперпозиции, при этом статические деформации не могут вносить искажения в распределение колебаний. Во-вторых, колебания, вызванные реакцией на процесс резания, не могут возникнуть с частотой, равной частоте возбуждения, в силу явления вибрационной линеаризации.

3. Поперечные сечения стержня при деформациях, вызванных УЗК, остаются плоскими. Это допущение в нашем случае всегда выполнимо, так как длина поперечных волн на порядок больше диаметра поперечного сечения стержня колебательной системы. Деформации, вызванные процессом резания, в силу принципа суперпозиции не влияют на колебания.

4. Масса колебательной системы, жёсткость и её податливость являются непрерывными. Это положение охватывает практически все возможные функции изменения механических характеристик колебательной системы по оси.

5. Механические характеристики материала полагаем независимыми от амплитуды смещений и напряжений системы. Однако механические характеристики

материала преобразуются при изменении интенсивности УЗК. Изменения механических характеристик материала при изменении интенсивности УЗК не учитываются.

6. Смещения точек оси или соответствующих этим точкам поперечных сечений от действия внешних нагрузок однозначно определяются значениями одной функции (это допущение полагает, в частности, отсутствие гистерезиса и других нелинейных связей, определяющих неоднозначную зависимость перемещения от возмущающего воздействия).

7. Потерями акустической энергии в местах крепления вибрационной системы к корпусу приспособления пренебрегаем, то есть сосредоточенные нагрузки считаем на порядок меньшими, чем потери в других элементах системы.

8. Температурное поле инструмента будем считать установившимся, то есть время при определении температурного поля инструмента можно считать параметром. Это

возможно лишь при том условии, когда изменение физико-механических констант по оси системы не выходит за определённый класс функций, определяемых уравнением Вебстера.

9. Сопряжение отдельных элементов колебательной системы определяется условием равенства напряжений и смещений в координатах сопряжения.

Хорошие акустические свойства имеют закалённые стали. Термообработка стали (закалка с низким отпуском) позволяет в 2 раза снизить потери. При увеличении амплитуды колебаний и температуры потери возрастают.

Для выполнения операций, связанных с ультразвуковой обработкой зубчатых колес, требуется передача интенсивного ультразвукового воздействия от пьезоэлектрического преобразователя к заготовке. На рис. 1 представлен экспоненциальный концентратор с заготовкой, для нарезания мелко модульных зубчатых колес.

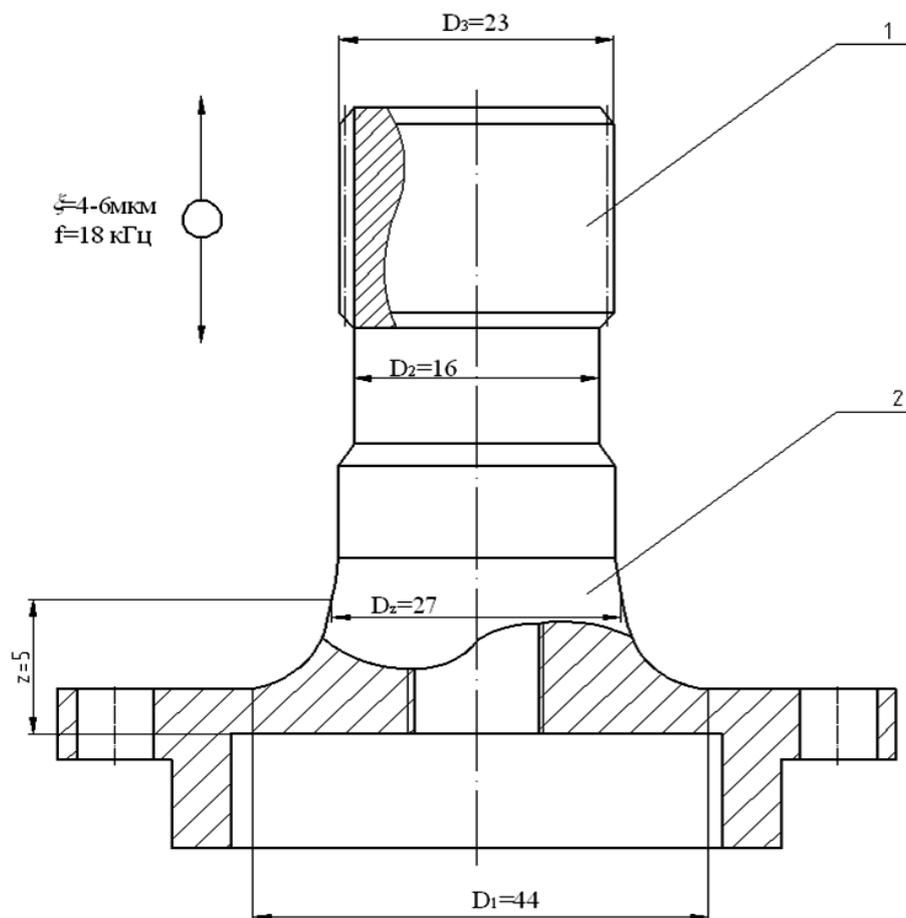


Рис. 1. Экспоненциальный концентратор с заготовкой: 1 – заготовка; 2 – концентратор

Для успешной работы ультразвукового приспособления необходимо рассчитать его мощность и подобрать оптимальный генератор по мощности.

Момент инерции концентратора совместно с заготовкой равен

$$J = J_{k1} + J_{k2} + J_{k3} + J_4, \quad (1)$$

где J_{k1} – момент инерции части концентратора диаметром D_1 ; J_{k2} – момент инерции экспоненциальной части концентратора; J_{k3} – момент инерции части концентратора диаметром D_2 ; J_4 – момент инерции заготовки.

Расшифруем значения J_{k1} , J_{k2} , J_{k3} , J_{k4} [4]:

$$J_{k1} = \frac{\pi \gamma D_1^4 \ell_1}{32g}; \quad J_{k2} = \frac{\gamma s_0^2 \ell}{2\pi g} \int_0^\ell e^{-2\beta z} dz,$$

$$J_{k3} = \frac{\pi \gamma D_2^4 \ell_2}{32g}, \quad J_4 = \frac{\pi \gamma D_4 \ell_{заг}}{32g}, \quad (2)$$

где γ – удельный вес материала концентратора, $\gamma_u = 7,8 \text{ г/см}^3$ (сталь 40X); D_1 – диаметр наружного кольца пьезоэлектрического преобразователя, $D_1 = 44 \text{ мм}$; D_z – диаметр контрольного сечения переходного экспоненциального участка; D_3 – диаметр излучающего торца пьезоэлектрического блока, $D_3 = 16 \text{ мм}$; D_4 – диаметр заготовки, $D_4 = 23 \text{ мм}$, принимаем исходя из конструктивных данных заготовки; l_1 – толщина мембраны, $l_1 = 3 \text{ мм}$ принимаем исходя из конструкции ультразвукового преобразователя; l_2 – длина излучающего торца пьезоэлектрического блока $l_2 = 12 \text{ мм}$; z – расстояние от торца кольца пьезоэлектрического преобразователя до контрольного сечения, определяется с помощью номограмм [4]; γ_u – удельный вес материала заготовки, $\gamma_u = 8,4 \text{ г/см}^3$ (БрАЖМЦ); $\ell_{заг}$ – длина заготовки, $\ell_{заг} = 24 \text{ мм}$. Указанные численные значения принимаем исходя из конструктивных данных заготовки.

Подставляя численные значения в формулы (1) и (2), получим результирующий момент инерции $J = 0,0195 \text{ кгм}^2$.

Определим максимальную угловую скорость на торце заготовке [4]:

$$\omega = \frac{4\pi f \xi}{d_u}, \quad 1/\text{с}, \quad (3)$$

где ξ – амплитуда колебаний.

Подставляя численные значения, получим $\omega = 8,19 \text{ 1/с}$.

Изменение кинематической энергии вращающейся системы можно определить по формуле

$$\Delta E = \frac{J \omega^2}{2} (1 - K^2), \quad (4)$$

где $K = 0,555$ – коэффициент восстановления для стали [4].

Подставляя полученные значения в формулу (4), получим $\Delta E = 0,04523 \text{ Дж}$.

Мощность, расходуемая при одном контакте:

$$W_{\max} = \frac{\Delta E}{t_k 7500}, \quad (5)$$

где t_k – время контакта инструмента и заготовки:

$$t_k = \alpha \frac{1}{f_p}, \quad (6)$$

где α – коэффициент времени контакта, принимает $\alpha = 0,37$; f_p – резонансная частота возбуждения пьезокерамики ($f_p = 18000 \text{ Гц}$).

Подставляя численные значения в формулы (5) и (6), получим $t_k = 0,000021 \text{ с}$ и $W_{\max} = 0,211 \text{ кВт}$.

Средняя мощность ультразвукового генератора, если принять в расчёт синусоидальный закон изменения действующей силы, равна

$$W_{cp} = W_{cp} = \frac{W_{\max} \cdot 2}{3,14} = \frac{0,211 \cdot 2}{3,14} = 0,134 \text{ кВт}.$$

Следовательно, при зубонарезании мелко модульных зубчатых колес можно использовать ультразвуковой генератор модели УЗГ 3-0,25 мощностью 0,25 кВт с блоком поднастройки по частоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казанцев В.Ф.** Расчёт колебательных систем ультразвуковых станков / В.Ф. Казанцев // Электрохимические и электрофизические методы обработки. 1974. Вып. 8. С. 1-4.

2. **Меркулов Л.Г.** Теория и расчёт составных концентраторов / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // Акустический журнал. 1959. Т. 5. Вып. 2. С. 183-190.

3. **Менетчер Ю.Х.** Методы расчета и конструирования инструментов для ультразвуковой обработки / Ю.Х. Менетчер. М.: ЭНИМС, 1963. 59 с.

4. **Марков А.И.** Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1968. 367 с.

Агапов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Волгоградского государственного технического университета

Сидякин Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Волгоградского государственного технического университета

Толстяков Андрей Федорович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Волгоградского государственного технического университета

Sergey I. Agapov – Dr. Sc., Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Volgograd State Technical University

Yuri I. Sidyakin – Dr. Sc., Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Volgograd State Technical University

Andrey F. Tolstyakov – Ph.D student, Department of Mechanical Engineering Technology Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

УДК 621.365.5

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

Ж.С. Синицына, Ю.С. Архангельский

**HIGH-TEMPERATURE MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL
INSTALLATIONS**

Zh.S. Sinitsyna, Yu.S. Arkhangelsky

Приведена терминологическая база СВЧ электротехнологических процессов и установок, даны определения и области применения низкотемпературных и высокотемпературных СВЧ электротехнологических установок, сформулированы задачи,

The article presents the terminology database for the microwave electrotechnological processes and installations, provides the definition and the application area of low-temperature and high-temperature microwave electrical installations, formulates the

подлежащие решению при исследованиях и разработках высокотемпературных СВЧ электротехнологических установок.

Ключевые слова: *терминологическая база, низкотемпературные и высокотемпературные СВЧ электротехнологические установки, диэлектрик, СВЧ обработка*

Исследования и разработки в области технологической обработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле в нашей стране ведутся с конца 50-х – начала 60-х годов XX века. За прошедшие годы сложилась терминологическая база этого научно-технического направления [1].

В электротермии обычно говорят о СВЧ диэлектрическом нагреве, установках СВЧ диэлектрического нагрева [2-4]. В радиоэлектронике говорят о СВЧ нагреве, установках СВЧ нагрева [5, 6]. Затем появились термины «СВЧ электротермия», «СВЧ электротермические установки» [7]. Когда в вузах появилась специальность «Автоматизированные электротехнологические установки и системы», стали говорить о СВЧ электротехнологии, СВЧ электротехнологических установках [8, 9]. Наконец, в 90-е годы XX в. специалисты в области радиоэлектроники, перешедшие работать в область СВЧ электротехнологии, стали широко использовать термины микроволновый нагрев, «микроволновые установки» [10]. В разные годы получили широкое распространение термины «камера со стоячей волной» (КСВ) [6, 7, 11], «камера с бегущей волной» (КБВ) [11], «камера лучевого типа» (КЛТ) [12], «камера гибридного типа» (КГТ) [13], «низкоинтенсивные СВЧ электротехнологии» [14]. Сейчас терминологическую базу СВЧ электротехнологии следует пополнить терминами «низкотемпературные и высокотемпературные СВЧ электротехнологические установки» (СВЧ, ЭТУ).

К низкотемпературным СВЧ ЭТУ следует отнести установки, в которых максимальная температура обрабатываемого диэлектрика не превышает 130°C, то есть температуры стерилизации молока. Все другие СВЧ ЭТУ, в которых эта температура выше, будем относить к высокотемператур-

tasks to be solved in the course of research and development of high-temperature microwave dielectric installations.

Keywords: *terminological base, low and high temperature microwave electrotechnological installation, dielectric, microwave treatment*

ным СВЧ ЭТУ. В таком случае большинство СВЧ ЭТУ является низкотемпературными, не говоря уже о установках нетепловой СВЧ модификации полимеров [15].

Низкотемпературные СВЧ ЭТУ достаточно полно изучены. Так, поставлена и решена для различных типов СВЧ ЭТУ согласованная краевая задача электродинамики, тепломассопереноса (теплопроводности), термомеханики [4, 6, 7, 9-12], на базе которой решены задачи синтеза рабочих камер СВЧ ЭТУ и математического моделирования технологического процесса, разработаны оптимальные конструкции источников СВЧ энергии СВЧ ЭТУ [16-18], проведена технико-электрическая оптимизация структуры и параметров СВЧ ЭТУ [19], построены методы проектирования методических СВЧ ЭТУ, их транспортных систем и электроприводов [20-22].

Что касается высокотемпературных СВЧ ЭТУ [23-27], то здесь нужны еще системные исследования и разработки. На наш взгляд, сначала надо максимально точно определить технологические просы, которые можно осуществлять на высокотемпературных СВЧ ЭТУ, собрать исчерпывающие сведения о технологических установках, используемых для реализации данных процессов и о затратах, которые приходится нести для получения готовой продукции. Эти сведения дают возможность оценить стратегическую целесообразность замены традиционного технологического оборудования на высокотемпературную СВЧ ЭТУ.

Для сопоставления затрат альтернативных вариантов получения заданного продукта требуется сначала оценочно определить затраты с использованием СВЧ энергии. Для этого потребуются рассмотреть ряд научно-технических вопросов, касающихся применения высокотемператур-

ных СВЧ ЭТУ. И на этом пути потребуются рассмотреть следующие вопросы.

Во-первых, требуется определить, могут ли быть использованы в высокотемпературных СВЧ ЭТУ выпускаемые сейчас СВЧ генераторы, их источники питания или предстоит разработать более мощные СВЧ генераторы.

Во-вторых, необходимо внести в методы расчета рабочих камер низкотемпературных СВЧ ЭТУ серьезные изменения. Сейчас при расчете этих камер тепловыми потерями пренебрегают (невысокая температура, быстрый нагрев). При расчете высокотемпературных СВЧ ЭТУ придется учитывать тепловые потери.

В-третьих, для повышения энергетической эффективности СВЧ ЭТУ придется рабочие камеры снабжать теплоизоляцией, чего нет в современных рабочих камерах.

В-четвертых, важную роль в разработке высокотемпературных СВЧ ЭТУ будут играть расчеты, подтверждающие конкурентоспособность высокотемпературных СВЧ ЭТУ, которые, безусловно, будут дороже низкотемпературных СВЧ ЭТУ.

В-пятых, особую самостоятельную проблему будут представлять высокотемпературные измерения в СВЧ электротехнологии и, в первую очередь, при измерении зависимостей параметров диэлектриков от температуры. Так, по-видимому, пока нет методов измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ на высоких температурах.

И только при установлении целесообразности проектирования и применения высокотемпературной СВЧ ЭТУ следует провести расчет, конструирование, изготовление и испытание СВЧ ЭТУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терминологическая база, энергоэффективность и электроснабжение СВЧ электротехнологических установок / А.С. Добродум, А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 94-102.
2. Электротехнологические промышленные установки / И.Е. Евтюхова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
3. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. 280 с.
4. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для идентификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.
5. **Долгополов Н.Н.** Электрофизические методы в технологии строительных материалов / Н. Н. Долгополов. М.: Стройиздат, 1971. 240 с.
6. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
7. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
8. **Колесников Е.В.** Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок / Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 197 с.
9. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: ИД «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.
10. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотный или микроволновый? / Ю.С. Архангельский // Тепло- и электротехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. С. 4-5.
11. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232 с.
12. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорный. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.

13. **Добродум А.С.** Электротехнологические установки с гибридными камерами / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 16-22.

14. Низкоинтенсивные СВЧ технологии (проблемы и реализация) / Г.А. Морозов и др. М.: Радиотехника, 2003. 112 с.

15. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

16. **Артюхов И.И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 48 с.

17. **Девяткин И. И.** Источники питания магнетрона непрерывного действия от сети переменного тока / И.И. Девяткин, А.С. Зумаковский // Электоэнерготехника. Электроника СВЧ. 1969. № 2. С. 112-118.

18. Система электропитания СВЧ генератора магнетронного типа с промежуточным звеном повышения частоты / И. И. Артюхов и др. // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1996. С. 49-59.

19. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.

20. **Архангельский Ю.С.** К вопросу о многофункциональности СВЧ электротехнологических установок на камерах лучевого типа / Ю.С. Архангельский, Е.В. Ко-

лесников, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 34-40.

21. **Юдина В.О.** Протяжные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 1 (10). С. 9-12.

22. **Юдина В.О.** К расчету мощности электропривода методической СВЧ электротехнологической установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 3 (25). С. 42-45.

23. **Огурцов К.Н.** СВЧ электротехнологические установки для высокотемпературного нагрева диэлектриков / К.Н. Огурцов, М.В. Брюханов // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. 2007. № 4 (29). Вып. 2. С. 116-120.

24. **Огурцов К.Н.** Разработка комбинированного СВЧ энергоподвода для получения нанопорошков конденсационным методом / К.Н. Огурцов, В.В. Черницов // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. 2010. № 3 (47). С. 56-59.

25. **Огурцов К.Н.** Выращивание монокристаллов в высокотемпературных СВЧ установках с комбинированным энергоподводом / К.Н. Огурцов, Ж.С. Синицына // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. 2010. № 3 (47). С. 52-55.

26. **Огурцов К.Н.** Высокотемпературные СВЧ электротехнологии / К.Н. Огурцов, Д.А. Давыдов // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. 2012. № 2 (66). Вып. 2. С. 138-143.

27. **Огурцов К.Н.** СВЧ рабочие камеры для высокотемпературного нагрева диэлектриков / К.Н. Огурцов // Вопросы электротехнологии. 2013. №1 (1). С. 40-45.

Синицына Жанна Сергеевна – начальник отдела «Организационно-массовая работа» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Zhanna S. Sinitsyna – manager of Division of Large Scale Organization, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

М.М. Алексеева, И.И. Артюхов, В.С. Алексеев

A SIMULATION MODEL OF THE THYRISTOR FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCTION HEATING WITH THE CHANGING LOADS

M.M. Alekseeva, I.I. Artyukhov, V.S. Alekseev

В среде MATLAB с пакетом расширения Simulink разработана имитационная модель для расчета тиристорного преобразователя частоты для индукционной тигельной печи. В модели присутствуют оригинальные блоки, позволяющие исследовать электромагнитные и тепловые процессы с учетом изменения нагрузки при индукционном нагреве стали.

Ключевые слова: имитационное моделирование, тиристорный преобразователь частоты, индукционная тигельная печь

Индукционный нагрев является одним из перспективных способов нагрева металлов. Для его реализации широкое применение получили индукционные тигельные печи. Индукционная тигельная печь (ИТП) представляет собой сложный электротехнологический комплекс, основными элементами которого являются индуктор и источник питания. Согласование источника питания и нагрузки для стабильной работы ИТП в процессе нагрева является актуальной задачей, поэтому с целью снижения затрат на этапе проектирования технологического процесса необходимо проводить совместное исследование работы источника питания и тепловых процессов в ИТП [1, 2].

В качестве источника питания применяется тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ), построенный по схеме с промежуточным звеном постоянного тока. Упрощенная схема такого преобразователя показана на рис. 1. Сетевое напряжение

The article provides a simulation model for estimation of the thyristor frequency converter for the induction crucible furnace in MATLAB with the Simulink expansion pack. The model has original blocks which allow for investigation of the electromagnetic and thermal processes, taking into account the load changes under induction heating of steel.

Keywords: simulation, thyristor frequency converter, induction crucible furnace

преобразуется с помощью диодного моста VD1...VD6 в постоянное напряжение, которое затем с помощью автономного инвертора тока (АИТ) на тиристорах VS1...VS4 преобразуется в однофазное напряжение заданной частоты. Дроссель L_d служит для сглаживания тока во входной цепи АИТ. Конденсаторная батарея C осуществляет компенсацию реактивной мощности в системе «индуктор-загрузка» (СИЗ) и обеспечивает необходимый угол запираания тиристоры VS1...VS4 инвертора [3, 4].

СИЗ с нагреваемым металлом (в нашем случае сталь) характеризуется приведенными значениями активного R_n и индуктивного x_n сопротивлений. В ИТП значительное изменение электрических параметров нагрузки в процессе нагрева обусловлено изменением удельного сопротивления ρ и относительной магнитной проницаемости μ нагреваемого материала (рис. 2) [2].

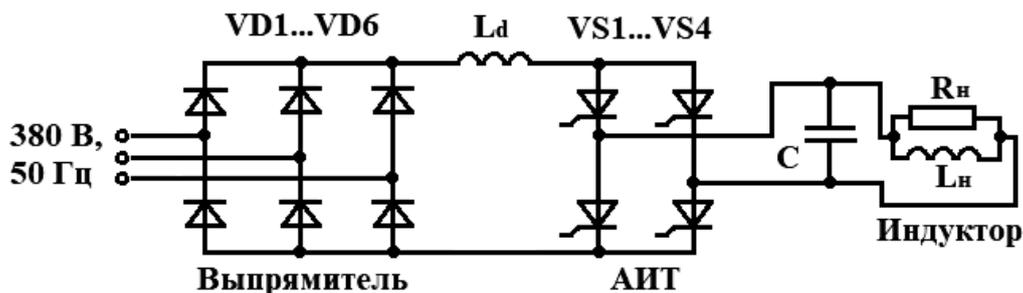


Рис. 1. Упрощенная схема ТПЧ

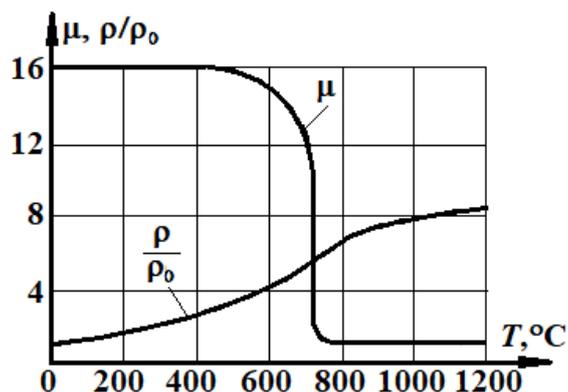


Рис. 2. Зависимости относительных значений удельного сопротивления и магнитной проницаемости стали от температуры

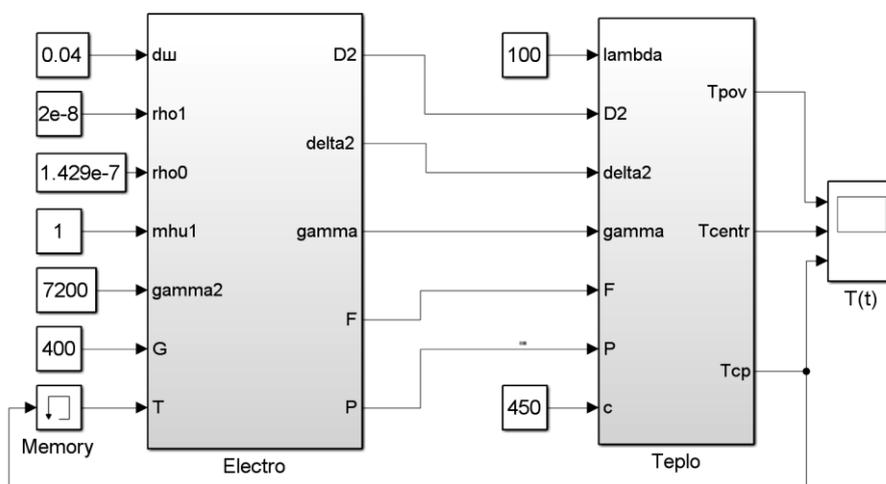


Рис. 3. Имитационная модель нагрева стали в ИТП

Для исследования процесса нагрева стали в ИТП и работы ТПЧ разработана имитационная модель в пакете расширения Simulink программной среды MATLAB (рис. 3).

Модель состоит из подсистем Electro и Терло, отвечающих за моделирование электрических и тепловых процессов, а также блока задания исходных данных. Связь двух подсистем осуществляется по рассчитываемой температуре нагреваемого

тела через блок Memory, который характеризует начальную температуру тела в момент времени $t = 0$. Таким образом, учитывается изменение удельного электрического сопротивления ρ_2 и относительной магнитной проницаемости μ_2 нагрузки в процессе нагрева.

Для реализации тепловых и электромагнитных процессов в программной среде Simulink/MATLAB необходимо учиты-

вать основные параметры СИЗ, в том числе и в зависимости параметров от температуры. С целью определения этих параметров на основе методики расчета индукционных тигельных печей [5, 6] разработан блок CalculationsBlock, входящий в подсистему Electro. Схемы этих

подсистем представлены на рис. 4. В свою очередь, подсистема CalculationsBlock состоит из двух блоков: GeometricalCalculation, отвечающий за расчет геометрических параметров печи, и ElectricCalculation, отвечающий за электрический расчет параметров СИЗ.

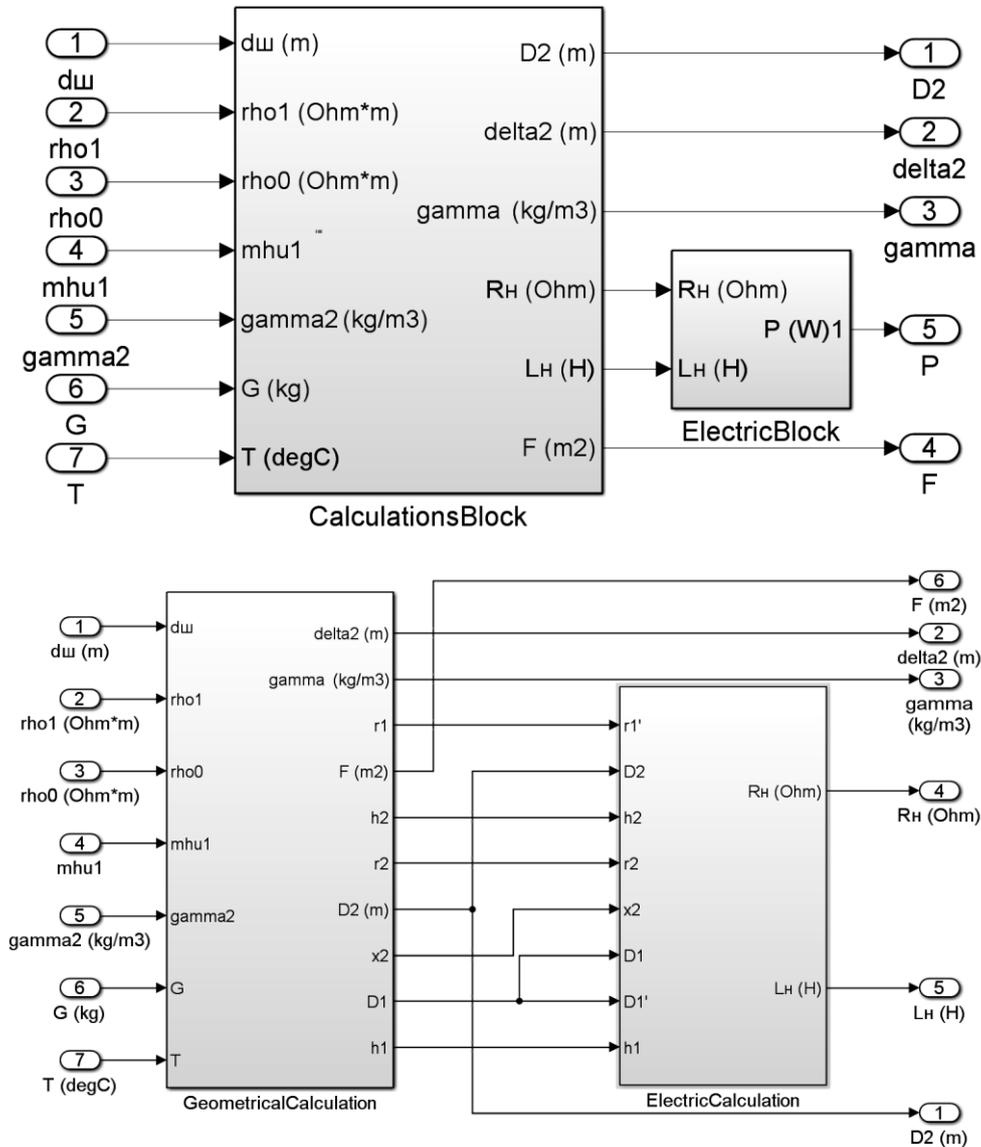


Рис. 4. Схемы подсистем Electro (верхний) и CalculationsBlock (нижний)

Моделирование тиристорного преобразователя частоты на основе неуправляемого выпрямителя и автономного инвертора тока производит блок ElectricBlock, входящий в подсистему Electro (рис. 5). Его особенностью является подсистема Z_{var} , характеризующая изменение активного и реактивного сопротивления СИЗ в зависимости от температуры. Значения активного со-

противления R_H и индуктивности L_H нагрузки передаются в эту подсистему из подсистемы CalculationsBlock. Схемы подсистемы Z_{var} и входящей в нее подсистемы Complex_Z приведены на рис. 6. Питание ТПЧ осуществляется от трехфазной сети переменного тока промышленной частоты. Выпрямление напряжения происходит по схеме Ларионова в блоке Rectifier.

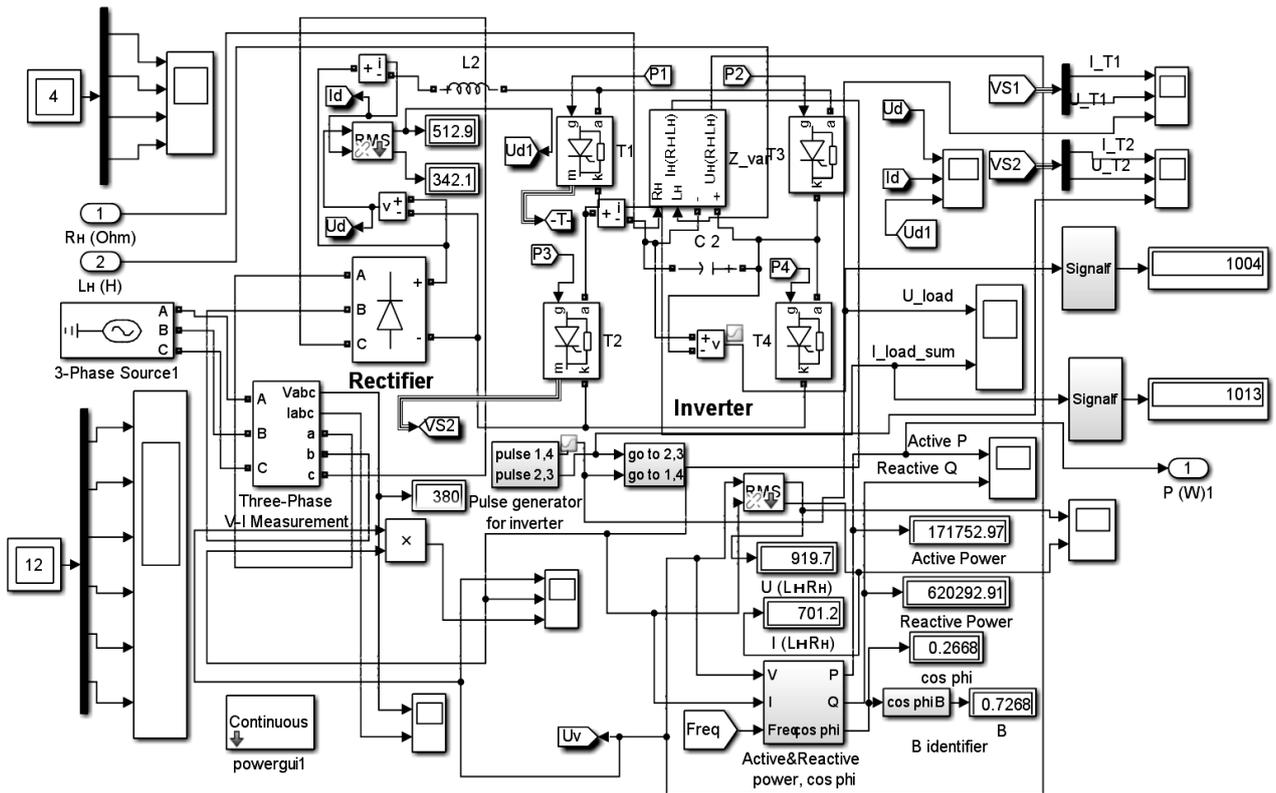


Рис. 5. Подсистема ElectricBlock

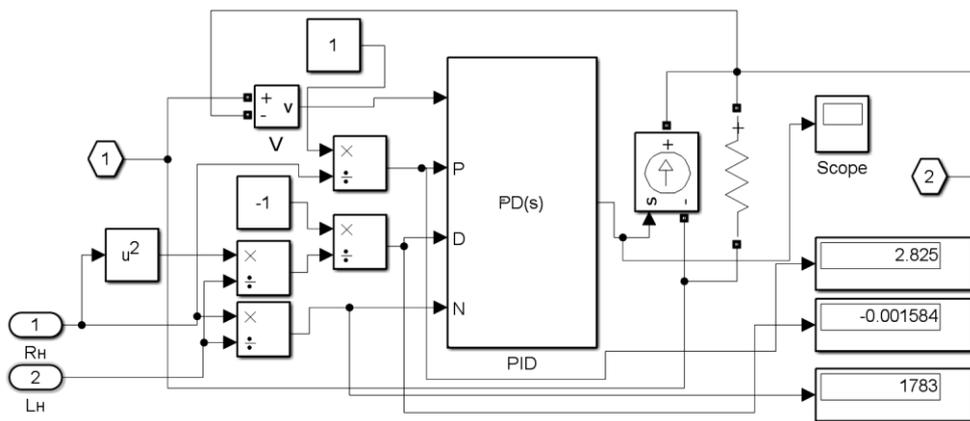
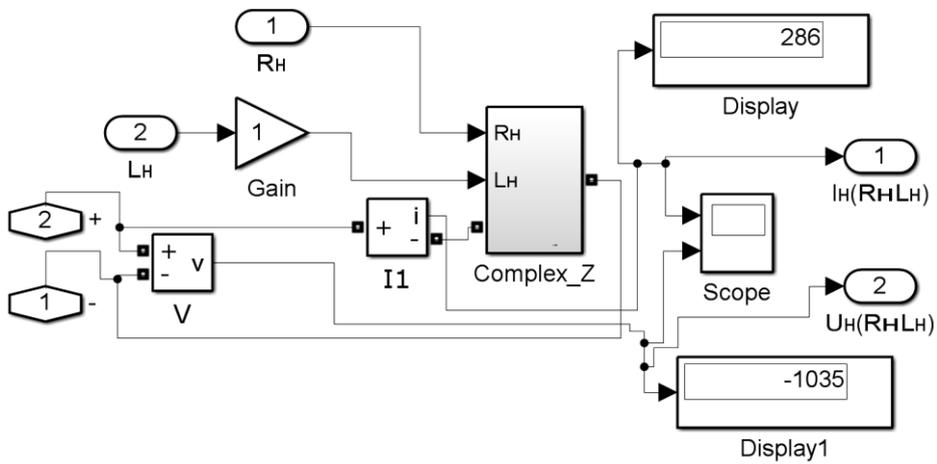


Рис. 6. Подсистемы Z_var и Complex_Z

Согласно рис. 6 комплексное сопротивление СИЗ реализовано на базе блока PD controller, передаточная функция которого имеет вид

$$W_{PD}(p) = P + D \frac{N}{1 + \frac{N}{p}} \quad (1)$$

Коэффициенты P , D и N рассчитываются исходя из операторного метода определения комплексного сопротивления

$$P = \frac{1}{R_n}; D = -\frac{L_n}{R_n^2}; N = \frac{R_n}{L_n} \quad (2)$$

Тепловая часть модели представлена блоком Тепло и состоит из двух связанных подсистем: PowerDensityBlock, осуществляющей расчет удельной мощности на поверхности загрузки, и HeatingBlock, осуществляющей расчет температур стали (рис. 7). Значение активной мощности, получаемой при моделировании ТПЧ, поступает в этот блок из подсистемы ElectricBlock.

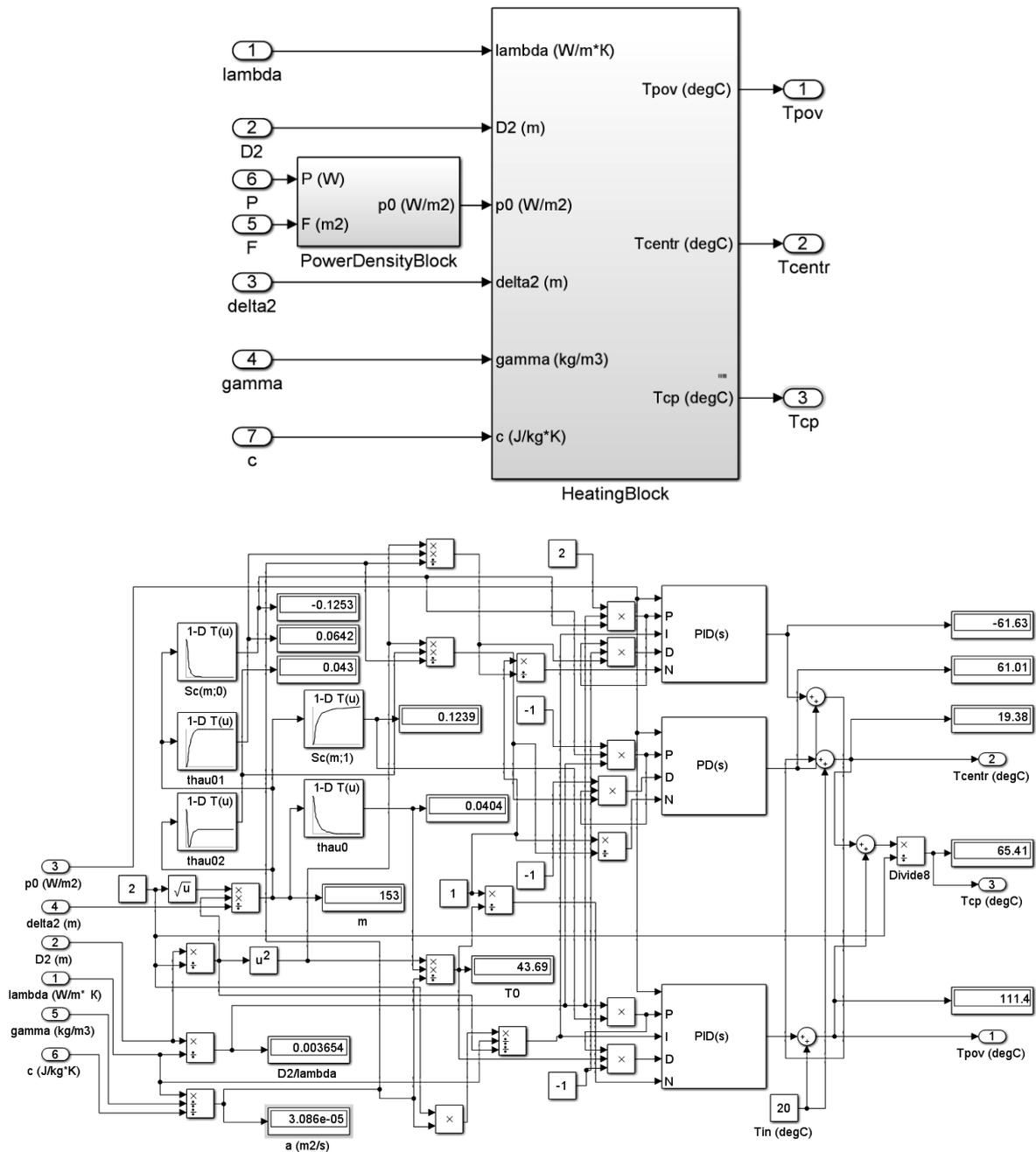


Рис. 7. Блок Тепло и подсистема HeatingBlock

Связь температуры точки заготовки $T(m, \tau)$ с удельной мощностью p_0 определяется выражением

$$T(m; \tau) = \frac{2p_0 R_2}{\lambda} [\tau + S(m, \beta, \tau)], \quad (3)$$

где $m = \frac{\sqrt{2}R_2}{\Delta_2}$ – относительный радиус загрузки; R_2 – внутренний радиус тигля ИТП, м; $\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{f}}$ – глубина проникновения тока в загрузку, м; ρ_2 – удельное электрическое сопротивление загрузки,

$$S(m, \beta, \tau) \approx \begin{cases} S_c(m, \beta) \left[2 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{01}}} \right) - \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{02}}} \right) \right] & \text{– для оси заготовки } (\beta = 0); \\ S_c(m, \beta) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \right) & \text{– для поверхности заготовки } (\beta = 1), \end{cases} \quad (4)$$

– обобщенная функция распределения температуры; $\beta = \frac{R}{R_2}$ – относительная координата рассматриваемой точки; $S_c(m, \beta)$ – предельные значения функции $S(m, \beta, \tau)$ при $\tau \rightarrow \infty$; $\tau_0, \tau_{01}, \tau_{02}$ – коэффициенты аппроксимации.

$$T(m; t) = \begin{cases} \frac{2p_0 R_2}{\lambda} \left[\frac{at}{R_2^2} + S_c(m, 0) \left[2 \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{01}}} \right) - \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{02}}} \right) \right] \right], & \text{при } \beta = 0; \\ \frac{2p_0 R_2}{\lambda} \left[\frac{at}{R_2^2} + S_c(m, 1) \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \right], & \text{при } \beta = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где $t_0 = \frac{R_2^2 \tau_0}{a}$, $t_{01} = \frac{R_2^2 \tau_{01}}{a}$, $t_{02} = \frac{R_2^2 \tau_{02}}{a}$ – постоянные времени, отражающие динамику роста температуры загрузки в соответствующих точках.

$$W_T(p) = \frac{L[T(m; t)]}{L[p_0(t)]} = \begin{cases} \frac{2a}{\lambda R_2} \frac{1}{p} + \frac{2R_2}{\lambda} S_c(m; 0) \left[\frac{2}{t_{01}p + 1} - \frac{1}{t_{02}p + 1} \right]; \\ \frac{2a}{\lambda R_2} \frac{1}{p} + \frac{2R_2}{\lambda} S_c(m; 1) \frac{1}{t_0 p + 1}. \end{cases} \quad (6)$$

где $L[T(m; t)]$, $L[p_0(t)]$ – изображения по Лапласу выходного и входного параметров загрузки [5].

Ом·м; f – частота тока, Гц; $\tau = \frac{at}{R_2^2}$ – критерий Фурье, характеризующий безразмерное время; t – время, с; p_0 – удельная мощность на поверхности заготовки, Вт/м²; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент теплопроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности загрузки, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость загрузки, Дж/(кг·К); γ – плотность загрузки, кг/м³;

Значения функции $S_c(m, \beta)$ в зависимости от коэффициентов $\tau_0, \tau_{01}, \tau_{02}$ при различных значениях β приведены в справочных таблицах [5].

Учитывая (3) и (4), функции распределения температуры во времени в соответствующих точках загрузки имеют вид

Расчет температуры центра и поверхности загрузки осуществляется с использованием передаточных функций индуктора ИТП:

Передаточная функция (6), характеризующая температуру поверхности загрузки, в Simulink реализуется с помощью

блока PID Controller (рис. 7, нижний). Передаточная функция блока PID Controller имеет вид

$$W_{PID}(p) = P + I \frac{1}{p} + D \frac{N}{1 + \frac{N}{p}}, \quad (7)$$

коэффициенты которой выражаются с учетом (6)

$$\begin{aligned} P &= \frac{2R_2}{\lambda} S(m;1), \\ I &= \frac{2a}{\lambda R_2}, \\ D &= -\frac{2R_2 t_0}{\lambda} S(m;1), \\ N &= \frac{1}{t_0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Передаточная функция (6), характеризующая температуру центра загрузки, в Simulink реализуется с помощью параллельно соединенных блоков PID Controller (рис. 7, верхний) и PD Controller. Передаточная функция блока PID Controller имеет вид (7), коэффициенты которой могут быть выражены с учетом (6)

$$\begin{aligned} P &= \frac{4R_2}{\lambda} S(m;0), \\ I &= \frac{2a}{\lambda R_2}, \\ D &= -\frac{4R_2 t_{01}}{\lambda} S(m;0), \\ N &= \frac{1}{t_{01}}. \end{aligned}$$

Передаточная функция блока PD Controller имеет вид (1), коэффициенты которой могут быть выражены с учетом (6)

$$\begin{aligned} P &= -\frac{2R_2}{\lambda} S(m;0), \\ D &= \frac{2R_2 t_{02}}{\lambda} S(m;0), \\ N &= \frac{1}{t_{02}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Моделирование проводилось на примере широко применяемого в промышленности оборудования для нагрева стали: индукционной тигельной печи ИСТ-0,4/0,32 с тиристорным преобразователем частоты ТПЧ-320-0,5/320-1,0, основные параметры которых приведены в табл. 1, 2. Электромагнитные и теплофизические свойства стали приведены в табл. 3.

Загрузка представляет собой кусковую цилиндрическую шихту диаметром $d_{ш} = 0,04$ м. Материал индуктора ИТП – медь с удельным электрическим сопротивлением $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и относительной магнитной проницаемостью $\mu_1 = 1$.

Результаты моделирования приведены на рис. 8-11. Выбранный временной интервал обусловлен тем, что совместный расчет преобразователя и индуктора во временной области требует больших затрат времени, так как постоянные времени в тепловой части модели существенно больше, чем в электрической ее части. Это означает, что тепловая часть модели должна рассчитываться с избыточно мелким шагом, а значит, время расчета определяется именно временем расчета тепловой части модели.

При частоте выходного напряжения преобразователя 1000 Гц и числе расчетных точек на один период напряжения, равном 50, требуемый расчетный шаг электрической части модели будет составлять $2 \cdot 10^{-5}$ с. В то же время тепловая постоянная времени нагреваемого тела может составлять 10-100 с и, соответственно, шаг расчета тепловой части модели может быть значительно больше, а именно 0,01-0,001 с. На данное соотношение между требуемыми расчетными шагами в тепловой части модели должно приходиться 50-500 шагов в электрической части модели, что в такое же число раз увеличивает время расчета модели в целом. Для выхода из сложившейся ситуации будет применен расчет с разделением во времени расчетов в тепловой и электрической частях модели с соответствующим изменением расчетного шага, алгоритм которого описан в [6].

Таблица 1

Технические данные индукционной тигельной печи ИСТ-0,4/0,32

Объём печи G , т	Мощность P , кВт	Номинальная частота тока f , кГц	Номинальное напряжение питающей сети U , В	Скорость плавки g , т/ч
0,4	320	1,0	3×380	0,36

Таблица 2

Технические данные тиристорного преобразователя частоты ТПЧ-320-0,5/320-1,0

Номинальная мощность на выходе $P_{вых}$, кВт	320
Полная мощность на выходе $S_{вых}$, кВА, не более	640
Номинальная частота на выходе $f_{вых}$, кГц	0,5/1,0
Напряжение на выходе (действующее значение) $U_{вых}$, В: номинальное значение допускаемый диапазон изменения	800 200-800
Номинальное напряжение на входе U , В	380
Допускаемый ток на входе I , А, не более	630
Допускаемая полная мощность на входе S , кВА, не более	450
Номинальный ток на выходе (основная гармоника) $I_{вых}$, А	630
Коэффициент полезного действия, при номинальном напряжении и базовой мощности η_n , %, не менее	94

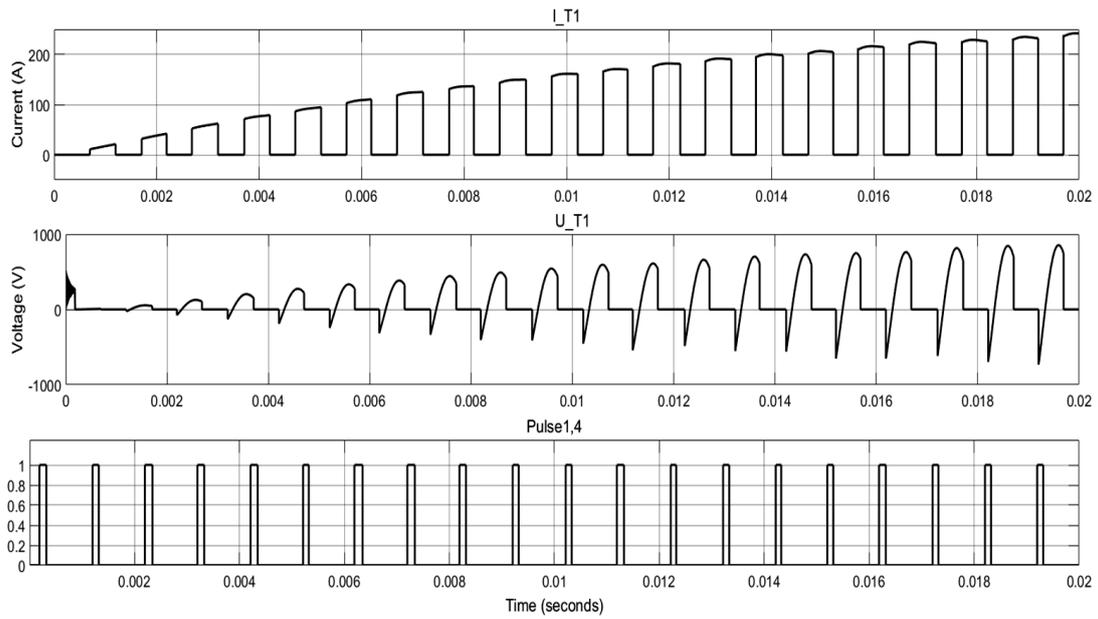
Таблица 3

Электромагнитные и теплофизические свойства стали

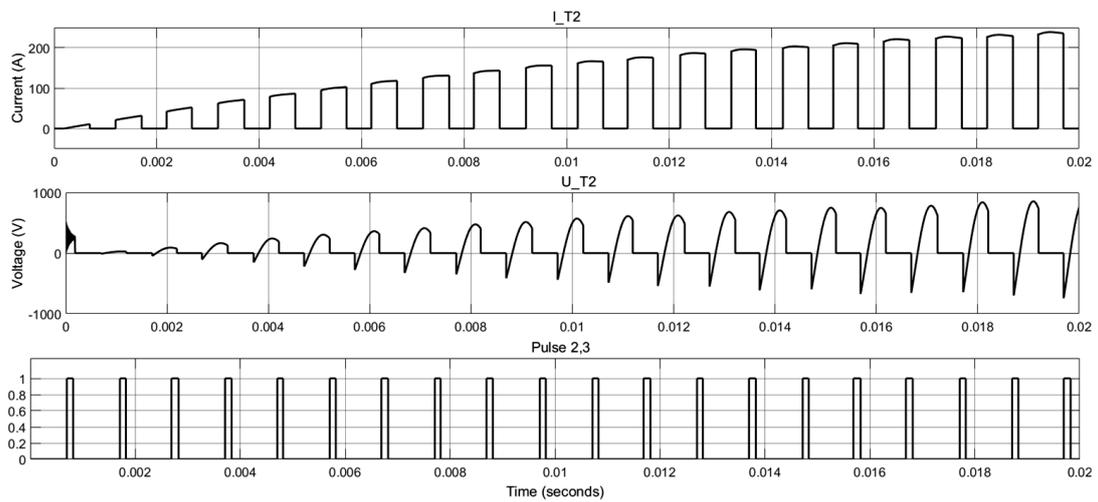
Удельное электрическое сопротивление при температуре 20°C ρ_0 , Ом·м	$1,429 \cdot 10^{-7}$
Относительная магнитная проницаемость при температуре 20°C μ_2	16
Плотность γ , кг/м ³	7200
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	100
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	450

Анализ полученных результатов говорит об адекватности имитационной модели, так как характер и вид зависимостей соответствует теоретическим данным [1, 2]. За интервал времени, равный 30 с, средняя температура загрузки массой 400 кг составила 65°C, температура поверхности за-

грузки – 114°C. Средняя активная мощность, выделяемая в загрузке, составляет 160 кВт. Характер зависимостей активной и реактивной мощностей (рис. 10) обусловлен изменением приведенных активного и индуктивного сопротивлений СИЗ в процессе нагрева.



a



б

Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений на тиристорах: а) VS1, VS4; б) VS2, VS3

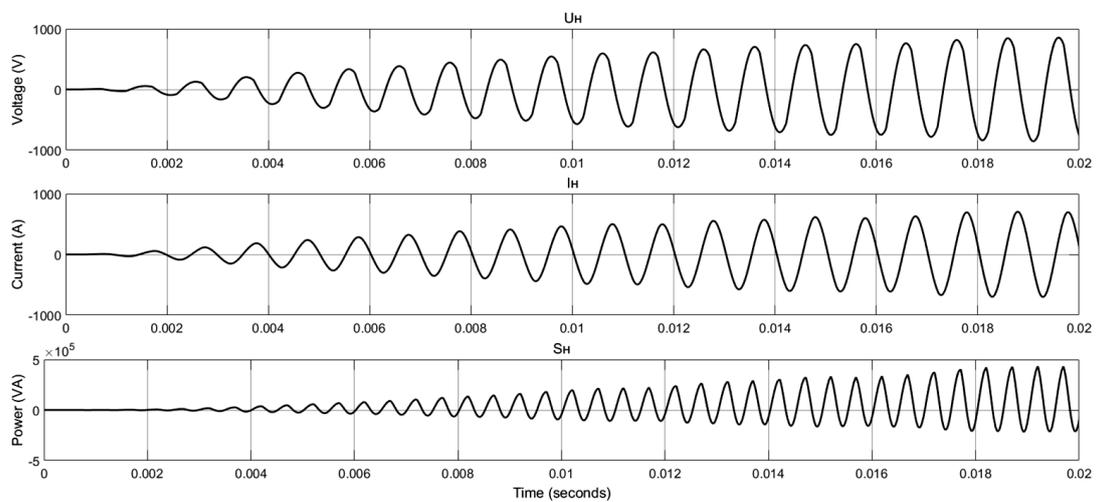


Рис. 9. Осциллограммы напряжения, тока и полной мощности на нагрузке

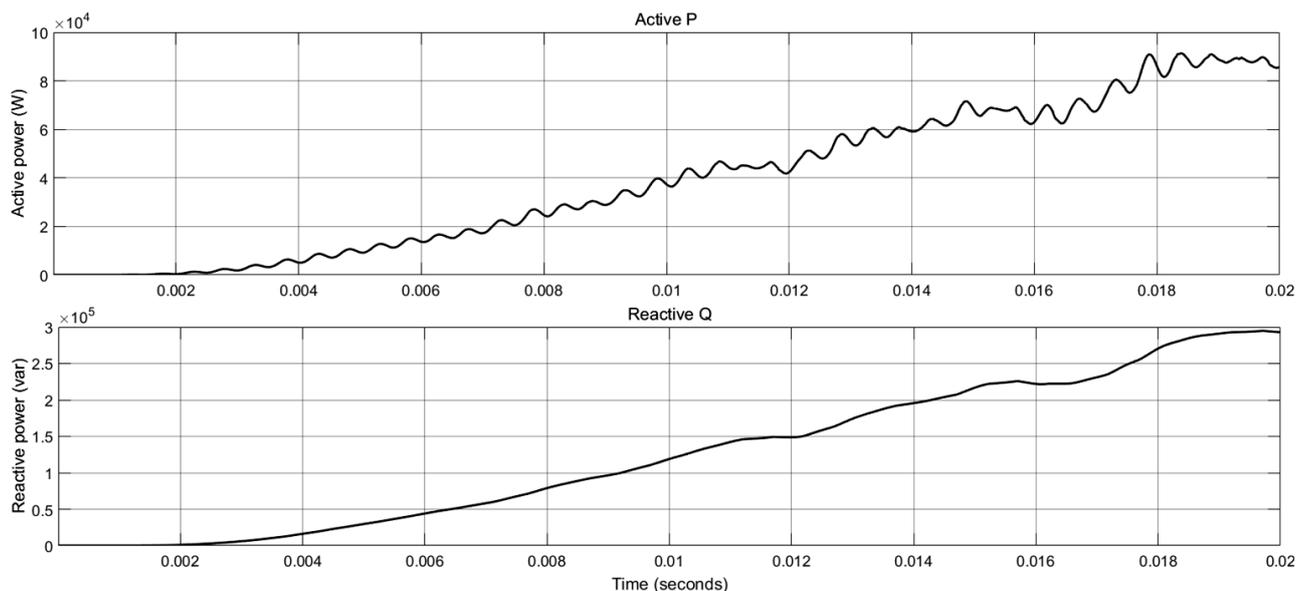


Рис. 10. Осциллограммы активной и реактивной мощностей в нагрузке

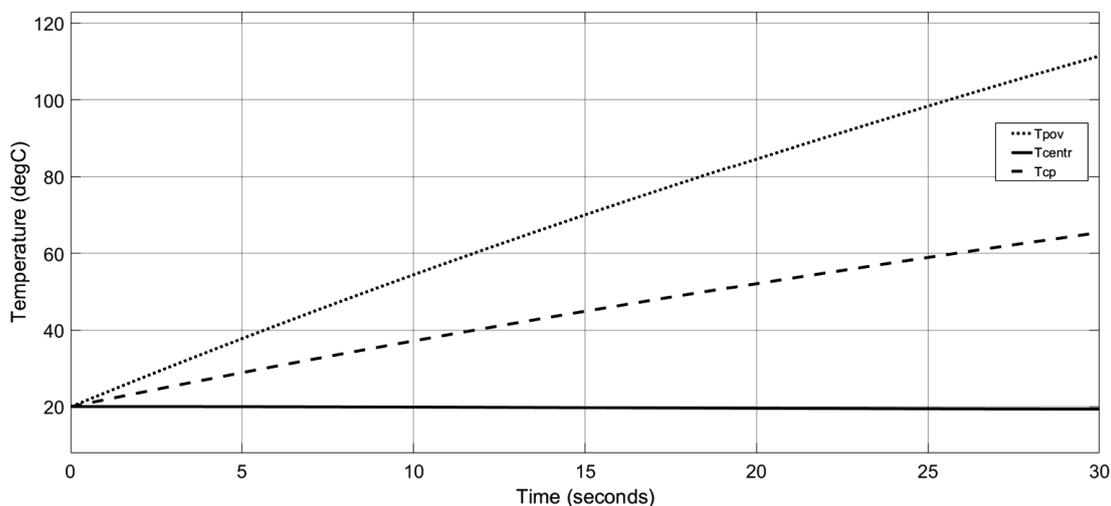


Рис. 11. Зависимости температур загрузки от времени

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомин Н.И.** Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. М.: Металлургия, 1979. 247 с.

2. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / Е.И. Беркович и др. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 208 с.

3. **Алексеева М.М.** Применение имитационного моделирования для расчета характеристик автономного инвертора тока / М.М. Алексеева // Материалы докладов XX аспирантско-магистерского семинара,

посвященного Дню энергетика. Казань, 6-7 дек. 2016 г. Казань, 2017. Т. 1. С. 107-108.

4. **Artyukhov I.I.** Investigation of characteristic of thyristor frequency converters for induction heating with simulation model / I.I. Artyukhov, M.M. Lotareva, V.P. Zaharov // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016): Conference Proceeding, Saratov, September 22-23. 2016. Vol. 2. P. 13-17.

5. Автоматическое управление электротермическими установками / А.М. Кручинин и др. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

6. **Черных И.В.** Методика моделирования установок индукционного нагрева в SIMULINK / И.В. Черных, В.И. Лузгин, А.Ю. Петров // Проектирование инженер-

ных и научных приложений в среде MATLAB: труды II научной конференции. 2004. С. 1653-1660.

Алексеева Марина Михайловна – студентка магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Marina M. Alekseeva – Undergraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim S. Alekseev – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

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.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313

ОПТИМИЗАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Э.О. Тимашёв, Д.А. Чирков, Н.В. Шулаков, А.Д. Коротаев

CYLINDRICAL LINEAR ELECTRONIC MOTOR SLIDER OPTIMIZATION

E.O. Timashev, D.A. Chirkov, N.V. Shulakov, A.D. Korotaev

Представлены результаты исследования зависимости тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя от конструкции его вторичного элемента. Исследование проводилось на модели двигателя, построенной в программном пакете ANSYS Maxwell, расчёт магнитного поля в которой ведётся методом конечных элементов.

Ключевые слова: цилиндрический линейный вентильный двигатель, тяговое усилие, моделирование

Для увеличения тягового усилия цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД) была проведена прямая оптимизация геометрии и параметров вторичного элемента графическим методом. Для этого были проведены многовариантные расчёты в программе ANSYS Maxwell с целью получения зависимости максимального усилия, развиваемого двигателем, от следующих параметров: ширина, диаметр, материал магнитов, коэффициент полюсного деления.

Расчётная модель цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами [1], представленная на рис. 1, состоит из индуктора, включающего корпус 1, зубцы 2 с коронками 3, ярмо 4, и трёхфазную обмотку 5; а также вторичный элемент, состоящий из штока 6, множества постоянных магнитов 7, полюсов 8 и немагнитных вставок 9. Индуктор неподвижно установлен в корпусе и представляет со-

The article presents the results of investigations into dependence of the tractive force in the cylinder linear electronic motor on the slider construction. The investigation was focused on the model of the motor designed using the program pack ANSYS Maxwell, where calculations of the magnetic field were conducted by the finite element method.

Keywords: cylindrical linear electronic motor, tractive force, modeling

бой множество катушек, образующих трёхфазную обмотку, которая создаёт бегущее магнитное поле вдоль оси корпуса. Двигатель находится в воздушной среде 10.

Расчётная модель двигателя в программе Maxwell состоит из 4 пар полюсов для ускорения расчётов, а у реального экспериментального модуля [2] имеются 16 пар полюсов, поэтому для приведения усилия расчётной модели к реальному модулю его надо умножить на 4.

Магнитные свойства редкоземельных постоянных магнитов характеризуются остаточной индукцией B_r и коэрцитивной силой H_c . Результаты анализа, проведённого в программе Maxwell, существующих редкоземельных постоянных магнитов от разных производителей в составе вторичного элемента ЦЛВД выявили, что наибольшее тяговое усилие двигатель имеет с магнитами с наибольшими значениями коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r .

Статические характеристики расчётного модуля ЦЛВД с использованием магнитов разных марок представлены на рис. 2, а справочные данные по магнитам приведены в табл. 1. На рис. 2 положительные значения тягового усилия показаны для движения вторичного элемента по направлению коронки зубца, а отрицательные значения – при движении против коронки зубца. Промышленность выпускает различные постоянные магниты с конкретными значениями B_r и H_c . Параметры B_r и H_c связаны между собой, поэтому рассматривать их влияние на тяговое усилие модуля ЦЛВД по отдельности нельзя. Можно исследовать влияние на характеристики только конкретных типов магнитов. Так, магнит № 5 в табл. 1 имеет $B_r = 1$ Тл, $H_c = 680$ кА/м, при этом тяговое усилие модуля ЦЛВД составляет 4384 Н. Этот магнит использован в экспериментальном модуле ЦЛВД.

При переходе на магнит № 3 табл. 1 с $B_r = 1,39$ Тл, $H_c = 980$ кА/м тяговое усилие модуля ЦЛВД возрастает до значения 5840 Н. Поэтому увеличение тягового усилия при переходе с магнита № 5 на магнит № 3 составляет $K_1 = F_3/F_5 = 1.332$. Таким

образом, тяговое усилие модуля ЦЛВД увеличивается на 33,2%.

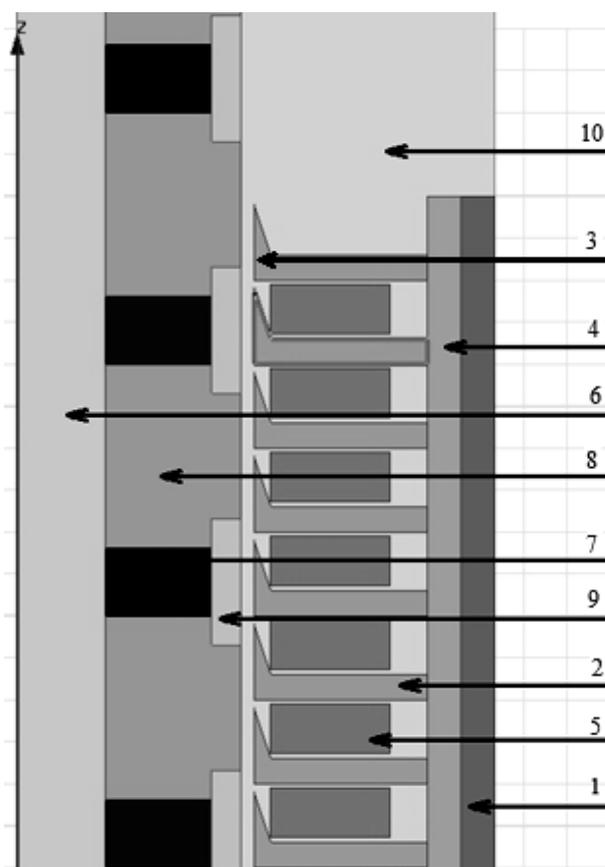


Рис. 1. Расчётная модель ЦЛВД

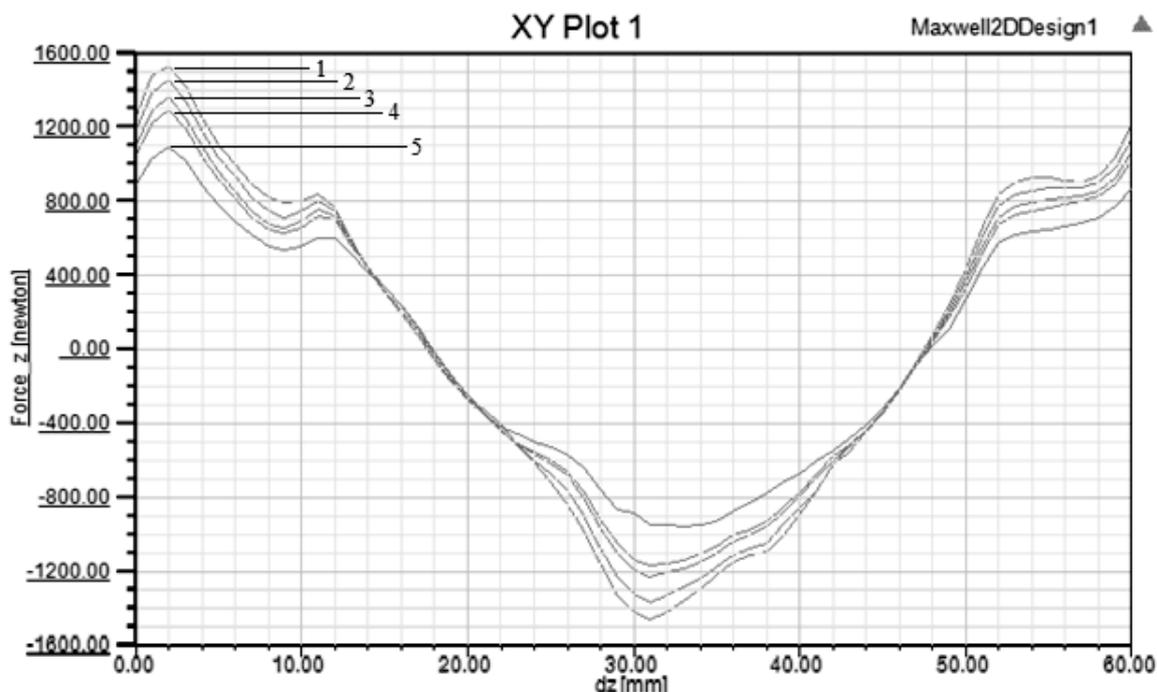


Рис. 2. Статические характеристики расчётной модели ЦЛВД с использованием магнитов 1, 2, 3, 4, 5 табл. 1

Параметры ЦЛВД в зависимости от марки используемых магнитов

№	Производитель	B_r , Тл	H_c , кА/м	F'_{1M} , Н	F_{1M} , Н	$F'_{1,}$ Н	$F_{1,}$ Н
1	Тульский завод постоянных магнитов	1,47	1138	1530	6120	1450	5800
2	ПОЗ-Прогресс, г. Екатеринбург, Пышма	1,39	980	1460	5840	1380	5520
3	ОАО Магнетрон, г. Владимир	1,26	900	1360	5440	1210	4840
4	ФГПУ СпецМагнит, г. Москва	1,22	800	1300	5200	1150	4600
5	ПОЗ-Прогресс, г. Екатеринбург, Пышма	1	680	1100	4400	960	3840

Оптимизация параметров магнита производится для модуля ЦЛВД. При этом изменяется ширина и диаметр магнита № 5, который используется в модуле ЦЛВД. На первом этапе изменяется только ширина магнита в пределах 2-14 мм. Зависимость тягового усилия модуля ЦЛВД от ширины магнита показана на рис. 3. Ширина магнита и соответствующее максимальные значение тягового усилия представлены в табл. 2. Уменьшение ширины магнита приводит к значительному уменьшению тягового усилия, поэтому нежелательно. Ширина магнита экспериментального модуля равна 8 мм.

За счёт увеличения ширины магнита с 8 до 12 мм тяговое усилие увеличивается на

14,5%. Дальнейшее увеличение ширины магнита нецелесообразно, так как при этом увеличиваются габариты и стоимость магнитов, а увеличение магнитной индукции не столь велико. Коэффициент тягового усилия за счёт увеличения ширины магнитов с 8 до 12 мм равен $K_2 = 1,145$.

На рис. 4 и в табл. 3 представлена зависимость тягового усилия модуля ЦЛВД от диаметра магнита D_m . С увеличением диаметра магнита увеличивается его площадь и уменьшается магнитное сопротивление, поэтому увеличиваются магнитный поток и магнитная индукция в зазоре двигателя.

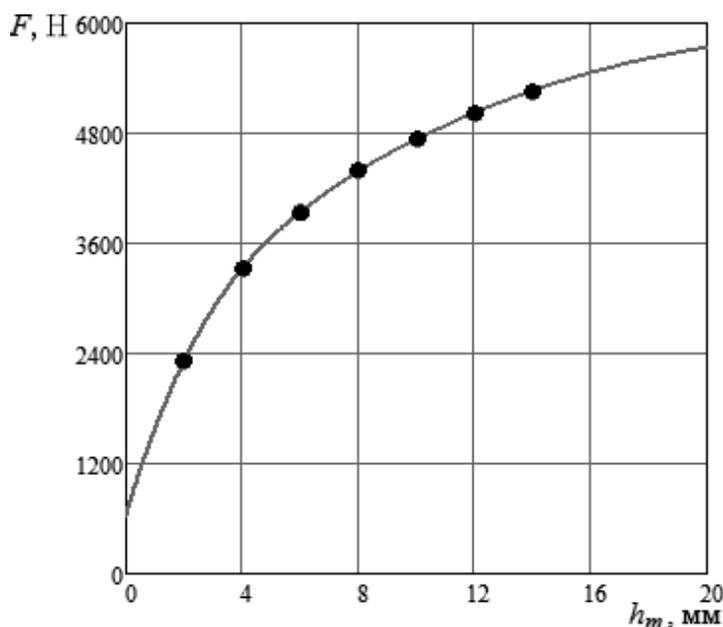


Рис. 3. Зависимость усилия модуля ЦЛВД от ширины магнита h_m

Зависимость тягового усилия модуля ЦЛВД от ширины магнита

h_m , мм	2	4	6	8	10	12	14
F , Н	577	830	984	1096	1183	1255	1315

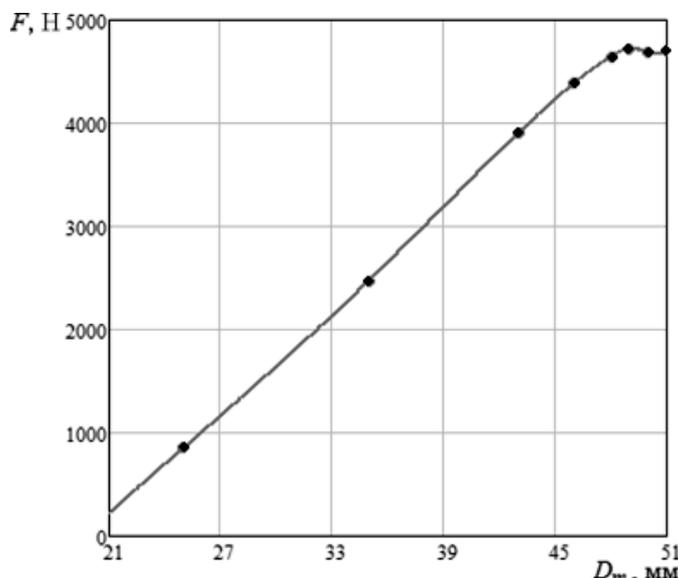


Рис. 4. Зависимость усилия модуля ЦЛВД от диаметра магнита D_m

Зависимость тягового усилия расчётного модуля ЦЛВД от диаметра магнита

D_m , мм	25	35	43	46	48	49	50	51	52
F , Н	213	619	975	1096	1161	1180	1172	1174	1220

Увеличивать диаметр магнита можно до 49 мм, так как дальнейшее увеличение диаметра магнита ограничивается реальным диаметром вторичного элемента. При диаметре магнита 49 мм тяговое усилие составляет 4720 Н. Коэффициент тягового усилия за счёт увеличения диаметра магнита с 46 до 49 мм равен $K_3 = 1,077$. Таким образом, увеличение диаметра магнита увеличивает тяговое усилие на 7,7%.

Расчётное значение коэффициента полюсного перекрытия α_p определяется по формуле

$$\alpha_p = b/\tau,$$

где b – ширина полюса двигателя; τ – полюсное деление.

Увеличение b , с одной стороны, уменьшает магнитное сопротивление вторичного

элемента и увеличивает магнитный поток в зазоре, с другой – уменьшается расстояние между соседними полюсами вторичного элемента и тем самым увеличивается его рассеяние. Увеличение рассеяния вторичного элемента приводит к уменьшению основного магнитного потока в зазоре, то есть влияние ширины полюса на тяговое усилие ЦЛВД неоднозначно, поэтому существует оптимальное α_p , при котором тяговое усилие максимально. На рис. 5 показана зависимость усилия расчётного модуля ЦЛВД от расчётного коэффициента полюсного деления α_p . В табл. 4 представлены максимальные тяговые усилия расчётного модуля ЦЛВД при различных α_p . Модуль ЦЛВД, для которого проводились эксперименты, имеет $\alpha_p = 0,5$ и тяговое усилие $1096 \cdot 4 = 4384$ Н.

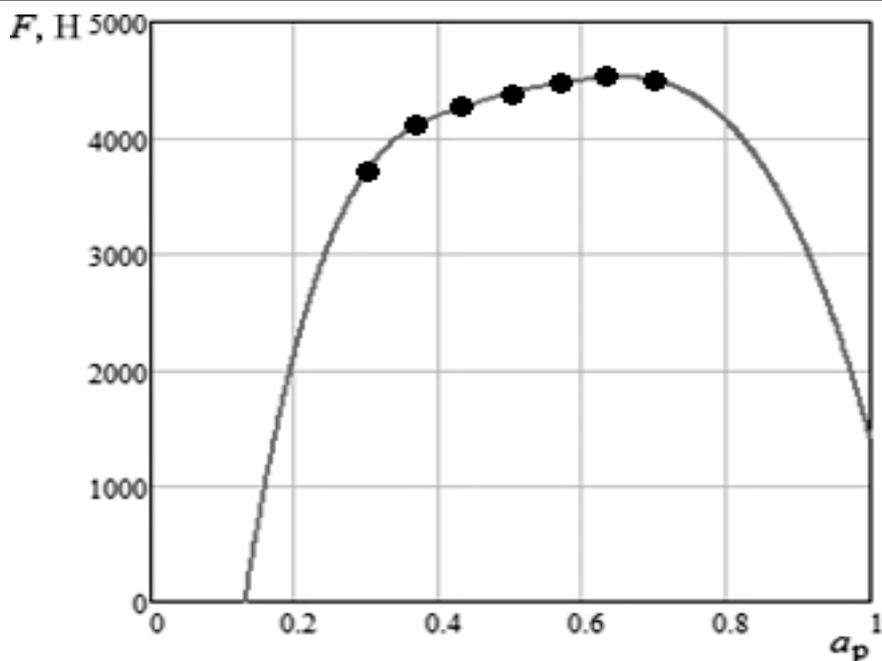


Рис. 5. Зависимость усилия расчётного модуля ЦЛВД от расчётного коэффициента полюсного перекрытия α

Таблица 4

Зависимость усилия модуля ЦЛВД от расчётного коэффициента полюсного перекрытия

α , о.е.	0,3	0,37	0,43	0,5	0,57	0,63	0,7
F , Н	213	619	975	1096	1161	1180	1172

Согласно рис. 5 при увеличении α_p от 0,3 до 0,7 тяговое усилие увеличивается до своего максимального значения при $\alpha_p = 0,63$, а затем уменьшается, то есть $\alpha_p = 0,63$ является оптимальным значением коэффициента полюсного деления, при котором тяговое усилие равно 4720 Н, а коэффициент увеличения тягового усилия за счёт подбора α_p составляет $K_4 = 1,076$, то есть усилие увеличится на 7,6%.

Тяговое усилие экспериментального модуля при номинальном токе фазы обмотки якоря 30 А составило 4384 Н. В результате оптимизации геометрии и типа используемых магнитов, коэффициента полюсного перекрытия можно значительно увеличить тяговое усилие модуля ЦЛВД, использовавшегося при проведении экспериментов, до значения $F = F_M K_1 K_2 K_3 K_4 = 7748$ Н. Таким образом, за счёт оптимизации тяговое усилие возможно увеличить в $7748/4384 = 1,77$ раза или на 77%. Удельное тяговое усилие на

единицу активной площади индуктора, которому соответствует тяговое усилие модуля ЦЛВД 7748 Н, равно

$$F_{y\partial} = F/S = 4,587 \text{ Н/см}^2,$$

где S – активная площадь индуктора.

Тяговое усилие цилиндрического линейного асинхронного двигателя, аналогичного по геометрии и линейной токовой нагрузке модулю ЦЛВД, не превышает 1200 Н [3], поэтому удельное тяговое усилие на единицу активной площади индуктора ЦЛАД равно

$$F'_{y\partial} = F'/S = 0,71 \text{ Н/см}^2.$$

Таким образом, использование ЦЛВД вместо ЦЛАД для добычи нефти из скважин позволяет увеличить усилие на плунжер насоса в $F/F' = 6,456$ раз, тем самым значительно сократить длину двигателя и уменьшить его массу, что позволит вести добычу на гораздо большей глубине.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тимашев Э.О.** Рабочие характеристики цилиндрического линейного вентильного двигателя / Э.О. Тимашев, Д.А. Чирков, А.Д. Коротаев // *Электротехника*. М.: Знак, 2018. № 11. С. 27-31.

2. **Коротаев А.Д.** Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // *Акту-*

альные проблемы энергосберегающих электротехнологий: материалы III Междунар. конф. АПЭЭТ-2014. Екатеринбург: Изд-во Урал. федер. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014.

3. **Веселовский О.Н.** Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Тимашев Эдуард Олегович – кандидат технических наук, директор департамента технического регулирования и развития Корпоративного научно-проектного комплекса НК «Роснефть»

Чирков Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Шулаков Николай Васильевич – академик АЭН РФ, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Коротаев Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Eduard O. Timashev – PhD, Director: Department of Technical Regulation and Development, Corporate Science and Project Complex NK Rosneft

Dmitry A. Chirkov – Postgraduate, Department of Electrotechnics and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University

Nikolai V. Shulakov – Academician of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnics and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University

Alexander D. Korotaev – PhD, Associate Professor Department of Electrotechnics and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University

Статья поступила в редакцию 19.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

ПОДХОД К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СТАРТЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

С.К. Гнутов, О.В. Раецкая

AN APPROACH TO NUMERICAL MODELING OF PHYSICAL FIELDS IN STARTER ELECTRIC MOTORS

S.K. Gnutov, O.V. Raetskaya

Представлен подход к численному моделированию физических полей стартерных двигателей методом конечных элементов. Рассмотрены варианты решения систем нелинейных уравнений для получения модели электростартерного пуска. Стартерные электродвигатели отличаются друг от друга в основном устройством и размещением в них элементов, расположенных за пределами активной части электродвигателей. Продемонстрирована тесная междисциплинарная связь изучаемых дисциплин в военном образовательном учреждении: математика-физика; математика-электротехника; математика-электротехника-информатика.

Ключевые слова: стартерный электродвигатель, метод конечных элементов, численное моделирование, магнитное поле, физические поля

В монографии профессора Копылова И.П. [1] отмечается: «... электромагнетизм, теплотехника и механика - вот три обширные теоретические дисциплины, на базе которых моделируются электротехнические устройства». В стартерных электродвигателях происходит электромеханическое преобразование энергии с возникновением электромагнитных усилий [2]. Специфические условия работы стартерных электродвигателей обуславливают необходимость применения уточненных полевых моделей. При этом желательно использовать системный подход, в котором при принятых допущениях все процессы (магнитные, тепловые, механические) рас-

This paper presents an approach to numerical modeling of physical fields of starter engines using the finite element method. The options for solving the systems of nonlinear equations are considered in order to obtain a model for electrostatic launch. The starter motors differ from each other mainly in the design and placement of elements located outside the active part of the electric motors. A close interdisciplinary relationship of the studied disciplines in the military educational institution is demonstrated: mathematics and physics; mathematics and electrical engineering; mathematics, electrical engineering and computer science.

Keywords: a starter electric motor, the finite element method, numerical modeling, magnetic field, physical field.

считываются в рамках общей системы с учетом всех сопутствующих факторов и их взаимосвязей. При реализации такого подхода эффективно использование единого метода моделирования разных физической явлений, например, на основе метода конечных элементов (МКЭ).

МКЭ базируется на вариационном исчислении [3]. Если известны плотности составляющих энергий в двумерной задаче, то для определения функционала необходимо интегрирование по области с координатами x, y . Например, обобщенный функционал Q для стационарных теплового и магнитного полей может быть представлен в виде

$$Q = \frac{1}{2} \iint_{xy} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + K \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 - 2R\varphi \right] dx dy,$$

где K – характеристика среды (коэффициент теплопроводности λ или удельное магнитное сопротивление среды ν); φ – искомая потенциальная функция поля (превышение температуры T или z -составляющая векторного магнитного потенциала A); R – возбуждающий фактор (объемная плотность мощности источников

тепловыделения в машине P или z -составляющая электрического тока j).

Можно показать, что при использовании положений вариационного исчисления минимизация подобного функционала соответствует решению уравнения Пуассона.

Физические поля могут быть нелинейными и анизотропными как по свойствам сред, так и по возбуждающим факторам. Энергетический функционал для двумерного магнитного поля при наличии магнитной анизотропии стали и намагниченности постоянных магнитов M имеет вид [4]

$$Q_M = \frac{1}{2} \int_{xy} \left\{ \left[v_x \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 + v_y \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 \right] - 2A \left(\frac{\partial M_y}{\partial y} - \frac{\partial M_x}{\partial x} + j \right) \right\} dx dy.$$

K и/или R могут зависеть от φ . Характерный пример – зависимость магнитной проницаемости сталей от индукции магнитного поля или намагниченности постоянных магнитов от магнитного состояния системы.

При зависимости K и/или R от φ минимизация функционала сводится к обеспечению условий минимума функционала, то есть решению системы из N , по количеству узлов, нелинейных алгебраических уравнений для $i = 1, 2, \dots, N$

$$\frac{\partial Q}{\partial \varphi_i} = f_i = 0.$$

Здесь f_i – невязка по выполнению закона полного тока, электрического или теплового балансов для i -го узла.

Матричное уравнение можно записать в виде

$$[Y]\{\varphi\} = \{R\}.$$

Здесь $\{\varphi\}$ – вектор размера N , по числу узлов конечно-элементной сетки, распределения потенциальной функции по области, может достигать десятков тысяч; $[Y]$ – мат-

рица размера $N \times N$, учитывающая геометрию и физические свойства модели – теплопроводности и теплоотдачи с поверхности, магнитной или диэлектрической проницаемостей; $\{R\}$ – вектор размера N возбуждающих факторов – объемных и граничных тепловых источников, сторонних токов, распределенных электрических зарядов.

Решение системы нелинейных уравнений может быть получено итерационным методом Ньютона с решением системы линейаризованных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждой итерации r . Так для магнитного поля величина векторного магнитного потенциала в узле i на итерации $r+1$ принимает значение

$$A_i^{r+1} = A_i^r + \Delta A_i^{r+1}, \quad i = 1, \dots, N,$$

где элементы матрицы-столбца $\Delta A_i^{r+1} \cdot A_i^{r+1}$ определяются из решения матричного линейаризованного уравнения на итерации r .

$$\begin{bmatrix} J_{11} \dots & J_{1d} \dots & J_{1N} \\ J_{i1} \dots & J_{id} \dots & J_{iN} \\ J_{N1} \dots & J_{Nd} \dots & J_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta A_1 \\ \Delta A_i \\ \Delta A_N \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_d \\ f_N \end{Bmatrix}.$$

Здесь $J_{id} = \frac{\partial}{\partial A_i} \left(\frac{\partial Q_M}{\partial A_d} \right)$ при $i = 1, \dots,$

N ; $d = 1, \dots, N$ - элемент матрицы Якоби, второй частной производной от функционала по векторным магнитным потенциалам в узлах i и d .

При использовании треугольных конечных элементов (рис. 1) величины c и b определяются координатами узлов элемента

$$c_{Lp} = \begin{matrix} x_{Lp} \\ Lk \\ Lm \end{matrix} - \begin{matrix} x_{Lp} \\ Lk \\ Lm \end{matrix} \quad \text{и} \quad b_{Lp} = \begin{matrix} y_{Lp} \\ Lk \\ Lm \end{matrix} - \begin{matrix} y_{Lp} \\ Lk \\ Lm \end{matrix}$$

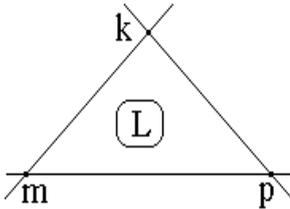


Рис. 1. Треугольный конечный элемент

Составляющие индукции по осям находятся как

$$Q_T = \frac{1}{2} \int_{xy} \left[\lambda_{x,t} \left(\frac{\partial T^2}{\partial x} \right) + \lambda_y \left(\frac{\partial T^2}{\partial y} \right) - 2PT \right] dx dy + \int_G \left(\frac{1}{2} \alpha T^2 - P_G T \right) dG.$$

Здесь G - граница теплообмена наружной поверхности стартера с окружающим воздухом с коэффициентом теплоотдачи α и удельной мощностью источников теплоты на границе P_G . Последний интеграл от-

$$B_{Lx}^r = \frac{1}{2S_L} \sum_{i=p,k,m} c_{Li} A_{Li}^r,$$

$$B_{Ly}^r = \frac{1}{2S_L} \sum_{i=p,k,m} b_{Li} A_{Li}^r.$$

Для стартера с термозависимыми магнитами необходим анализ его теплового состояния. Дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности относительно превышения температуры T над температурой окружающей среды T_{OC} , при коэффициенте теплопроводности λ и плотности тепловыделений P

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -P.$$

Функционал в методе конечных элементов для двумерного теплового поля стартерного электродвигателя при анизотропной теплопроводности с учетом граничного условия теплоотдачи имеет вид [3]

ражает отводимую/подводимую энергию через границу области.

Функционал при разбиении области стартерного электродвигателя на E треугольников

$Q =$

$$= \sum_{L=1}^E \frac{1}{2} \left[\frac{1}{4S_L} \sum_{i=p,k,m} \sum_{l=p,k,m} (\lambda_{Lx} b_{Li} b_{Ll} + \lambda_{Ly} c_{Li} c_{Ll}) T_{Li} T_{Ll} - 2P_L T_{Lcp} S_L + \sum_{\substack{i=p|k|m \\ l=k|m|p}} G_{Lil} (\alpha_{Lil} T_{Lil}^2 - 2P_{GLil} T_{Lil}) \right].$$

Невязка теплового баланса k -го узла на t -й итерации метода Ньютона составляет

$$\frac{\partial}{\partial T_{Lk}^t} \left(\sum_{L=1}^E Q_L^t \right) = \sum_L \left\{ \frac{1}{4S_L} \sum_{i=p,k,m} (\lambda_{Lx}^t b_{Li} b_{Lk} + \lambda_{Ly}^t c_{Li} c_{Lk}) T_{Li}^t - \frac{P_L^t S_L}{3} + \sum_{i=p,m} \frac{G_{Lki}}{6} [\alpha_{Lki}^t (2T_{Lk}^t + T_{Li}^t)] - 3P_{GLki}^t \right\}.$$

Элемент матрицы Якоби (m - столбец, k -я строка)

$$\frac{\partial}{\partial T_{Lm}^t} \left[\frac{\partial}{\partial T_{Lk}^t} \left(\sum_{L=1}^E Q_L^t \right) \right] =$$

$$= \sum_L^e \left\{ -\frac{S_L}{9} \frac{\partial P_L^t}{\partial T_{Lcp}^t} + \frac{1}{4S_L} \left[\sum_{i=p,k,m} \frac{1}{3} \left(\frac{\lambda_{Lx}^t}{\partial T_{Lcp}^t} b_{Li} b_{Lk} + \frac{\lambda_{Ly}^t}{\partial T_{Lcp}^t} c_{Li} c_{Lk} \right) T_{Li}^t + \left(\lambda_{Lx}^t b_{Lk} b_{Lm} + \lambda_{Ly}^t c_{Lk} c_{Lm} \right) \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{G_{Lki}}{6} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial \alpha_{Lkm}^t}{\partial T_{Lkm}^t} (2T_{Lk}^t + T_{Lm}^t) + \alpha_{Lkm}^t - \frac{3}{2} \frac{\partial P_{GLkm}^t}{\partial T_{Lkm}^t} \right] \right\}.$$

Выделяемые в элементах конструкции стартера потери могут зависеть от температуры. Например, с повышением температуры возрастает активное сопротивление обмотки якоря, следовательно, и омические потери. Потери в меди зависят от плотности тока j и температуры T

$$P_L(j_L, T_{Lcp} + T_{oc}) =$$

$$= C_3 j_L^2 [1 + 0,004(T_{Lcp} + T_{oc} - 20)],$$

где C_3 – постоянная, определенная для заданного коэффициента формы тока, коэф-

$$Q_{T,t} = \frac{1}{2} \iint_{xy} \left[\lambda_{x,t} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_t^2 + \lambda_{y,t} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_t^2 - 2PT + C_t \frac{\partial T_t^2}{\partial x} \right] dx dy + \int_G \left(\frac{1}{2} \alpha_t T_t^2 - R_{G,t} T_t \right) dG.$$

Решением уравнения нестационарного теплообмена является пространственно-временная функция, получаемая расчетом поля для ряда моментов времени с последующим интегрированием по времени. Выполняется расчет распределений функции φ по области для n моментов времени с временным шагом дискретизации h , то есть ищется совокупность временных слоев распределения функции в моменты времени $0, h, 2h, \dots, t, t+h, \dots, h(n-1)$.

При взаимном влиянии физических полей взаимозависимости физических явлений в электромеханических преобразователях могут быть даны в виде математических соотношений, а сама взаимозависимость проявляется во влиянии параметров одного поля на свойства материалов и возбуждающие поле факторы, определяющие распределение другого поля. Анализ магнитного поля позволяет вычислить локально по отдельным элементам значения потерь в магнитных материалах. При повышении температуры возрастает удельное электрическое сопротивление

коэффициента заполнения области медью и удельного электрического сопротивления при температуре 20°C.

При расчете нелинейных нестационарных физических полей во времени t в МКЭ в среде с теплоемкостью C_m для переменной T – превышения над температурой охлаждающей среды T_{oc} дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в осях (x, y) имеет вид

ние вихревым токам [5]. Поэтому объемные удельные потери в магнитопроводе как возбуждающий фактор теплового поля являются функцией температуры

$$P_{CT_T} = C_M \cdot B^2 \cdot [\xi - \beta_{CT}(T + 20)],$$

где C_M – постоянная, определенная для конкретного магнитного материала и заданной частоты при температуре 20°C;

$$\zeta = 1,01; \beta_{CT} = 0,0005 \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Таким образом, распределение магнитного поля оказывает влияние на характер теплового поля.

С другой стороны, тепловое поле может оказывать влияние на магнитное поле и магнитный поток в машине. Так, у магнитов NdFeB наблюдается сильная температурная зависимость магнитных свойств: с повышением температуры магнита снижаются его намагниченность и остаточная индукция. Это требует взаимосвязанного термомангнитного расчета при использовании их в электрических машинах.

Взаимосвязи физических полей могут быть учтены посредством представления их в виде обратных связей, определяемых по результатам расчета взаимодействующих полей (температуры, магнитных и электрических параметров, изменения конфигурации тел вследствие деформаций и т.д.). В этом случае при конечно-элементном моделировании необходима взаимоувязанная минимизация «энергетических» функционалов всех полей [6].

К настоящему времени разработаны мощные отечественные и зарубежные системы метода конечных элементов для задач механики, теплотехники, электромагнетизма: DIANA, NASTRAN, ASCA, COMPAS, SESAM, COSMOS, COSAF, PMD, ANSYS, MARC, SUPER, TITUS, MODULEF, ELCUT,

Opera, Femme и др. Обзор возможностей некоторых систем дан в [3]. Следует отметить, что разработка систем такого класса требует больших затрат (зачастую свыше 100 человеко-лет и более \$5 млн). Это возможно только в рамках национальных программ. Так, система NASTRAN создавалась по программе исследования космоса США НАСА. Пакеты достаточно большие, так программа FLUX 2D содержит около 50000 операторов Фортрана. Эти программы относительно дороги (до нескольких десятков тысяч долларов).

Для моделирования системы электро-стартерного пуска целесообразно разработать модель, учитывающую влияние температуры на параметры системы пуска и с использованием результатов расчета физических полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. М.: Высш. шк., 1994. 318 с.

2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.

3. **Казаков Ю.Б.** Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах / Ю.Б. Казаков, Ю.Я. Щелькалов. Иваново; Иван. гос. энерг. ун-т. 2001. 100 с.

4. **Ледовский А.Н.** Электрические машины с высококоэрцитивными магнитами / А.Н. Ледовский. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.

5. **Преображенский А.А.** Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. М.: Высш. школа, 1986. 352.

6. **Казаков Ю.Б.** Системный анализ взаимозависимых физических полей в электрических машинах / Ю.Б. Казаков, Е.Б. Герасимов // Электротехника. 1997. № 9. С. 5-9.

Гнутов Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин филиала ВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Сызрани

Раецкая Ольга Вилоровна – кандидат педагогических наук, преподаватель кафедры математики и естественнонаучных дисциплин филиала ВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Сызрани

Sergei K. Gnutov – PhD, Associate Professor Department of General Technical Disciplines, branch of the Russian Air Force Military Educational and Scientific Center «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Syzran)

Olga V. Raetskaya – PhD, Lecturer, Department of Mathematics and Science, branch of the Russian Air Force Military Educational and Scientific Center «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (Syzran)

Статья поступила в редакцию 15.04.19, принята к опубликованию 15.06.19

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВОЗА ТЭП-70

И.А. Менщиков, С.И. Баташов

AN AUTOMATED DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THE SYNCHRONOUS TRACTION GENERATOR OF THE DIESEL LOCOMOTIVE TEP-70

I.A. Menshchikov, S.I. Batashov

Приведены результаты оценки технического состояния тяговых генераторов пассажирского тепловоза серии ТЭП-70 с повышенным отработанным ресурсом. Проблемы оценки надежности тяговых генераторов магистрального пассажирского тепловоза серии ТЭП-70 на железнодорожном транспорте с повышенным отработанным ресурсом предлагается решать с помощью имитационного моделирования в пакете MATLAB & SIMULINK. Имитационное моделирование базируются на использовании математических моделей электрических машин трехфазного переменного тока и выбранных наиболее информативных контролируемых параметров функционирования тягового генератора.

Ключевые слова: *пассажирский тепловоз, тяговый синхронный генератор, моделирование*

Магистральный пассажирский тепловоз ТЭП70 (рис. 1) – односекционный пассажирский локомотив с электрической передачей переменного-постоянного тока предназначен для пассажирских перевозок на магистральных железных дорогах колеи 1520 (1524) мм климатического исполнения «У» по ГОСТ 15150 для всей сети железных дорог Российской Федерации.

Обслуживается тепловоз локомотивной бригадой из двух человек (машинист и его помощник), управление тепловозом – дистанционное, может осуществляться с двух кабин.

Постановка же тяговой единицы на ремонт по среднестатистическим данным приводит к нерациональным затратам.

The article presents the estimations concerning the technical condition of traction generators of the passenger locomotive series TEP-70 with the increased service life. The problems with estimation of reliability of traction generators in the main passenger locomotive of the TEP-70 series at the railway transport having an increased fulfilled resource are offered to be solved by means of the simulation modeling using the Matlab & SIMULINK package. The simulation modeling is based on the mathematical models to electric machines of three-phase alternating current and most informative controlled parameters of the traction generator.

Keywords: *passenger locomotive, traction synchronous generator, modeling*

Именно поэтому силы научных организаций направлены на создание стройной автоматизированной системы планово-предупредительного ремонта (АСППР), основанной на комплексном применении контрольных и диагностических устройств, для каждого узла конкретного локомотива. Эти устройства должны оценивать текущее состояние устройств и выдавать рекомендации ремонтному персоналу.

При практическом внедрении системы обслуживания по техническому состоянию на первый план выходят вопросы диагностики состояния оборудования, прогнозирования сроков проведения ремонтов и оценки качества их выполненных ремонтов.



Рис. 1. Магистральный пассажирский шестиосный тепловоз серии ТЭП-70

Решение задач автоматизации контроля технического состояния электрооборудования тепловоза удобно выполнять с помощью алгебраических методов, которые базируются на использовании информации, содержащейся в различных сочетаниях бинарных значений признаков и легко формируемой на графе. Это позволяет обходиться малыми выборками и обеспечивать высокую надежность распознавания.



Рис. 2. Генератор синхронный тяговый ГСТ 2800-1000У2 тепловоза ТЭП-70

В качестве подходящего математического аппарата моделирования целесообразно использовать аппарат, базирующийся на понятии теории графов с рассмотрением

отношений на множестве свойств функционирования объекта контроля, на множестве его параметров либо на множестве функциональных элементов [1].

Тяговые синхронные генераторы для локомотива в приемлемых габаритных размерах могут быть выполнены на тепловозах секционной мощностью до 7500 кВт, то есть они практически снимают ограничение по мощности. Синхронные генераторы допускают частоту вращения, более высокую, чем генераторы постоянного тока, что позволяет снизить массу дизель-генератора. Синхронный генератор более надежен из-за отсутствия коллекторно-щеточного аппарата и сложной изоляции, вращающейся обмотки якоря. Снижаются стоимость самого генератора и эксплуатационные расходы вследствие значительного уменьшения числа щеток, их изнашивания и времени на профилактические работы и ремонт.

Генератор синхронный тяговый ГСТ 2800-1000У2 предназначен для эксплуатации на тепловозе с передачей переменного тока, служит для преобразования механической энергии дизеля в электрическую и питания тяговых электродвигателей постоянного тока через выпрямительную установку (рис. 2).

Генератор представляет собой электрическую машину с двенадцатью явно выра-

женными полюсами на роторе, с независимым возбуждением защищенного исполнения, с независимой вентиляцией.

Он состоит из статора, ротора, подшипникового щита, подшипника ротора, щеткодержателей со щетками, патрубков входа и выхода охлаждающего воздуха.

Для детального изучения влияния внешних возмущений на устойчивость функционирования тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г и выявления диагно-

стических признаков была предложена имитационная модель (рис. 3) на основе применения современных компьютерных технологий реализуемых в среде MATLAB & Simulink [2, 3].

Результаты математического моделирования диагностического процесса электро-механической системы с тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г при устойчивом режиме функционирования представлены в табл. 1.

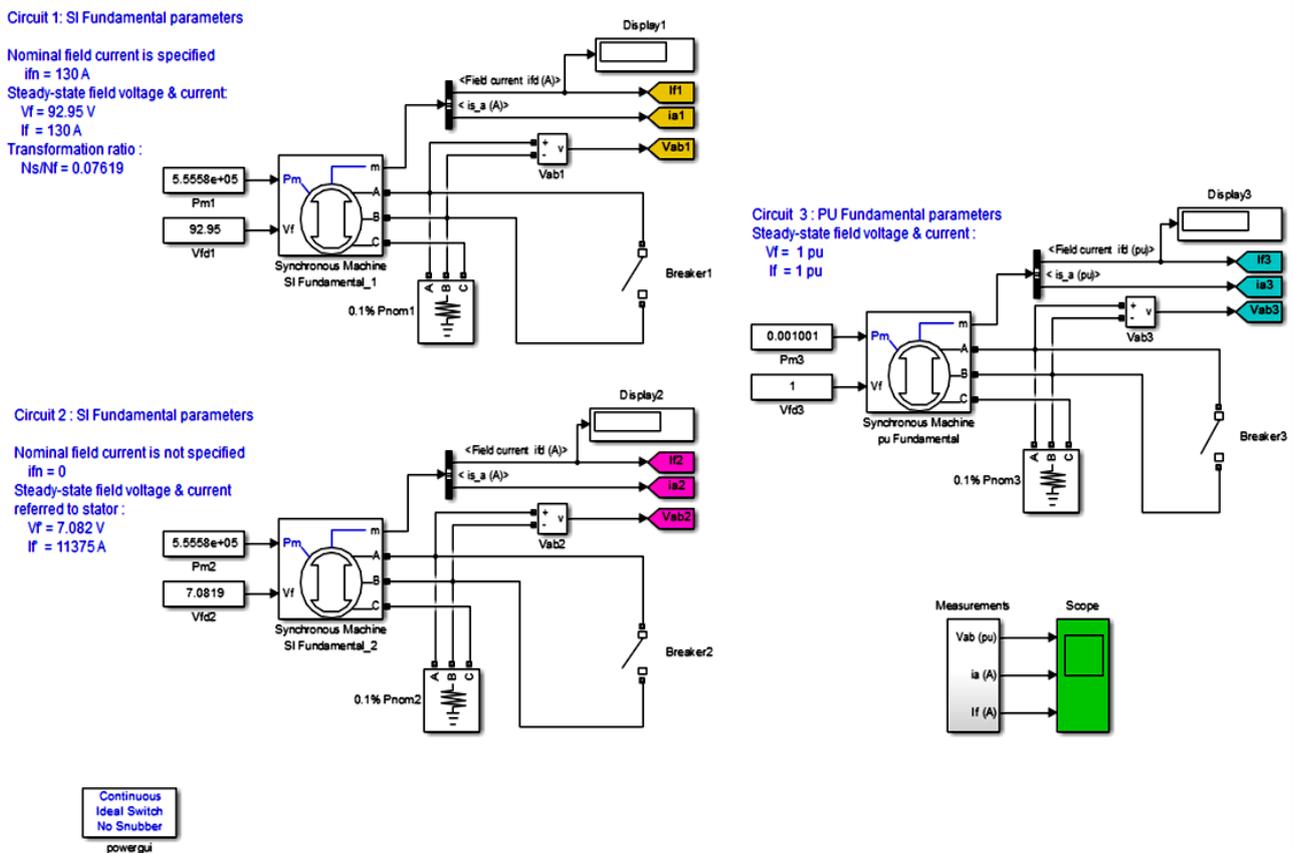


Рис. 3. Имитационная модель синхронного тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 тепловоза ТЭП-70

В результате моделирования устойчивого процесса функционирования тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г получены значения выходных диагностических параметров значения тока в цепи якоря I_a, I_b, I_c ; трех фазное напряжение в обмотки якоря U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ; мощность активная P и реактивная Q . В качестве входных параметров задавались значения

напряжения в обмотке возбуждения U_f и момент вращения ротора тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г Torque с помощью источника постоянного напряжения.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения U_{ab} , тока I_a фазы А, тока в обмотке возбуждения I_{fd} при устойчивом режиме функционирования.

Результаты математического моделирования диагностического процесса тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г при устойчивом режиме функционирования

Machine: Synchronous Machine pu Fundamental	Machine: Synchronous Machine SI Fundamental_2	Machine: Synchronous Machine SI Fundamental_1
Nominal: 50 кВА 400 V	Nominal: 50 кВА 400 V rms	Nominal: 50 кВА 400 V
Uab: 400 V 30.00°	Uab: 400 V 30.00°	Uab: 400 V 30.00°
Ubc: 400 V -90.00°	Ubc: 400 V -90.00°	Ubc: 400 V -90.00°
Uca: 400 V 150.00°	Uca: 400 V 150.00°	Uca: 400 V 150.00°
Ia: 13.365 0.00°	Ia: 13.365 A 0.00°	Ia: 13.365 A 0.00°
Ib: 13.365 A -120.00°	Ib: 13.365 A -120.00°	Ib: 13.365 A -120.00°
Ic: 13.365 A 120.00°	Ic: 13.365 A 120.00°	Ic: 13.365 A 120.00°
P: 5.3616e+03 W	P: 5.3615e+03 W	P: 5.5615e+03 W
Q: -1.9606e-03 Var	Q: -1.9606e-03 Var	Q: -1.9606e-03 Var
Pmec: 5.5616e+03 W	Pmec: 5.5616e+03 W	Pmec: 5.5616e+03 W
Torque: 1475.3 N.m	Torque: 1475.2 N.m	Torque: 1475.2 N.m
Vf: 1 pu	Vf: 7.0819 V	Vf: 92.95 V



Рис. 4. Осциллограммы: напряжения U_{ab} , тока I_a фазы А, тока в обмотке возбуждения I_{fd} при устойчивом режиме функционирования

В табл. 2 представлены результаты моделирования при неустойчивом режиме функционирования (межвитковым замыканием в обмотке якоря).

На рис. 5 представлены осциллограммы напряжения U_{ab} , тока I_a фазы А, тока в обмотке возбуждения I_{fd} при неустойчивом режиме функционирования (межвитковым замыканием в обмотки якоря).

В результате моделирования диагностических признаков тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г путем короткого замыкания в обмотке якоря установлено, что напряжение на обмотке якоря уменьшается в 5 раз, в фазе А увеличивается в 10 раз ток, ток в обмотке возбуждения также увеличивается в 3,5 раза.

Результаты математического моделирования диагностического процесса тягового генератора ГСТ 2800-1000У2 Г при межвитковом замыкании в обмотке якоря

Machine: Synchronous Machine pu Fundamental	Machine: Synchronous Machine SI Fundamental_2	Machine: Synchronous Machine SI Fundamental_2
Nominal: 50 кVA 400 V	Nominal: 50 кVA 400 V	Nominal: 50 кVA 400 V
Uab: 0.11574 V 30.00°	Uab: 0.11574 V 30.00°	Uab: 0.11574 V 30.00°
Ubc: 396 V -60.00°	Ubc: 396 V -60.00°	Ubc: 396 V -60.00°
Uca: 396 V 120.00°	Uca: 396 V 120.00°	Uca: 396 V 120.00°
Ia: 125 A 0.00°	Ia: 125 A 0.00°	Ia: 125 A 0.00°
Ib: 13.365 A -120.00°	Ib: 13.365 A -120.00°	Ib: 13.365 A -120.00°
Ic: 13.365 A 120.00°	Ic: 13.365 A 120.00°	Ic: 13.365 A 120.00°
P: 2.6794 W	P: 2.6794 W	P: 2.6794 W
Q: -9.4456e-3 Var	Q: -9.4456e-3 Var	Q: -9.4456e-3 Var
Pmec: 4.3406 W	Pmec: 4.3406 W	Pmec: 4.3406 W
Torque: 0.011514 N.m	Torque: 0.011514 N.m	Torque: 0.011514 N.m
Vf: 1	Vf: 7.0819 V	Vf: 92.95 V

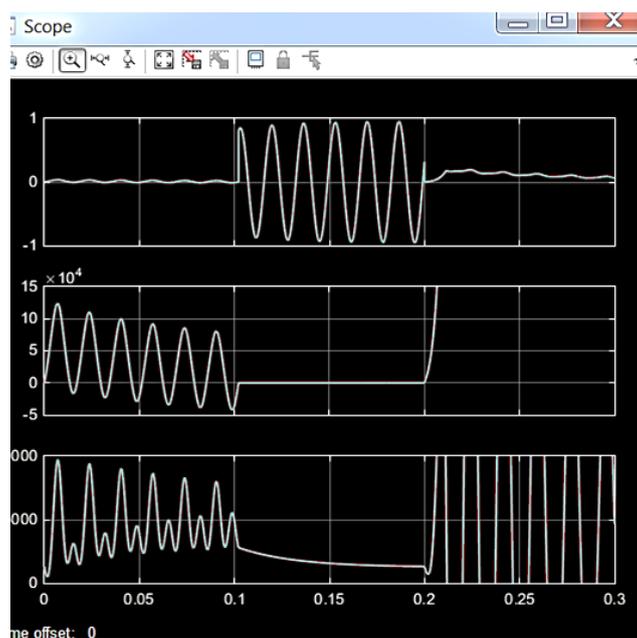


Рис. 5. Осциллограммы: напряжения U_{ab} , тока I_a фазы A , тока в обмотке возбуждения I_{fd} при межвитковом замыкании в обмотке якоря

Соответственно выходные параметры напряжения на обмотке ротора, ток в цепи якоря и ток в цепи обмотки возбуждения являются информативными диагностическими признаками.

Автоматизированная интеллектуальная система функциональной диагностики синхронного тягового генератора тепло-

воза ТЭП-70 в процессе длительной эксплуатации должна решать следующие задачи:

- определять вид дефекта;
- выявлять причину возникновения дефекта;
- прогнозировать последствия развития дефекта;

- вырабатывать общую оценку состояния (ГСТ 2800-1000У2) и его работоспособности;
- вырабатывать рекомендации по управлению работой (ГСТ 2800-1000У2);
- вырабатывать рекомендаций по совершенствованию технического обслуживания;

– накапливать базу знаний для повышения достоверности вырабатываемых рекомендаций.

Для решения необходимых задач предлагается функциональная схема автоматизированной интеллектуальной системы диагностики ГСТ 2800-1000У2, которая представлена на рис. 6.

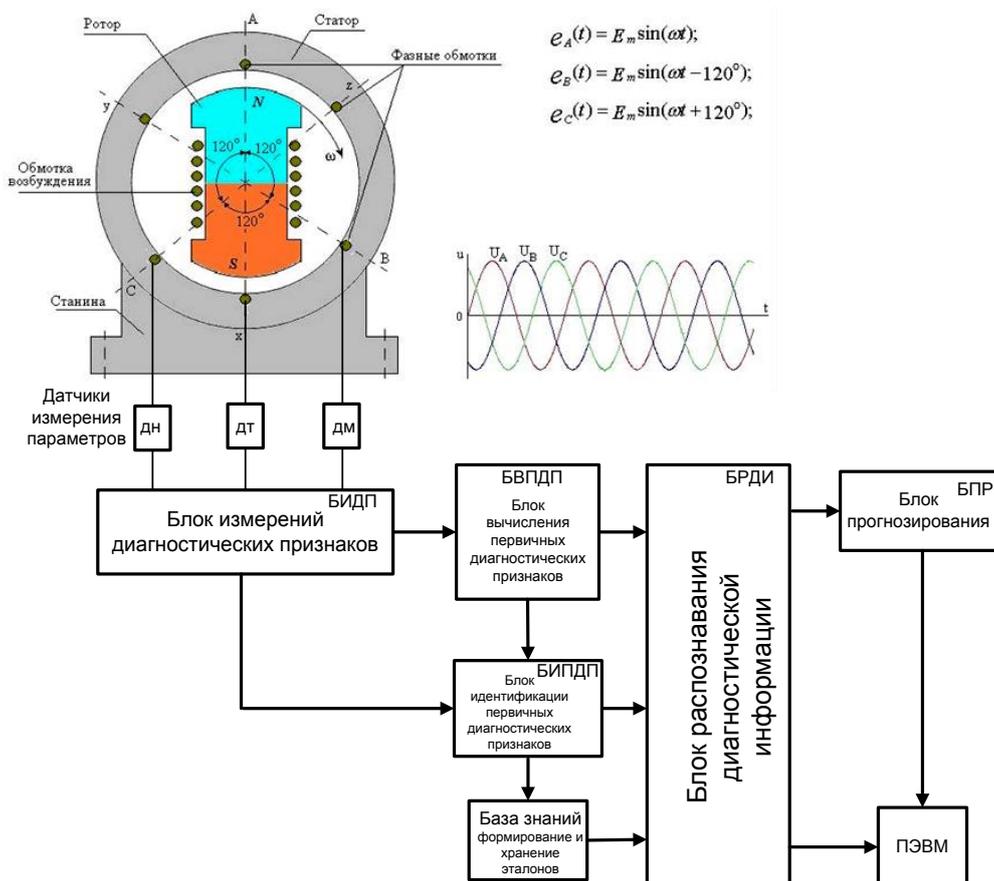


Рис. 6. Функциональная схема автоматизированной диагностической системы синхронного генератора ГСТ 2800-1000У2

Объектом диагностирования выступает обмотка якоря синхронного генератора ГСТ 2800-1000У2. С помощью первичных измерительных датчиков диагностическая информация подается в блок измерения и согласования первичной измерительной информации БИДП. В БИДП, производится калибровка измерительных каналов и при необходимости – аналоговое цифровое преобразование с заданной частотой дискретизации. На основе доступной измерительной информации в блоке вычисления первичных диагностических признаков БВПДП производится первич-

ное обобщение поступающих сигналов, как правило, на основе интегральных преобразований.

Мгновенные значения сигналов с БВПДП и БИДП позволяют производить динамическую идентификацию и подстройку параметров диагностической модели в блоке БРДИ. Важным преимуществом интеллектуальной диагностической системы является учет априорной информации на основе настраиваемой БАЗЫ ЗНАНИЙ, где хранятся информационные эталоны. Информация с блоков БВПДП, БИПДП и БАЗА ЗНАНИЙ пода-

ется в блок распознавания диагностической информации БРДИ, где на основе теории распознавания образов, методов кластерного спектрального анализа, методов классификации с обучением производится распознавание вида и уровня повреждения [4].

Сигналы с блока БРДИ не только отображаются на ПЭВМ системы, но и служат входными данными для блока прогнозирования состояния БПР, в котором прогнозируется тренд развития дефекта, рассчитывается остаточный ресурс объекта диагностирования и формируются рекомендации по алгоритму его отказоустойчивого управления.

Итак, установлено, что техническое состояние обмоток якоря тягового генератора можно контролировать с помощью энергетических показателей коэффициента мощности K_m . В результате моделирования устойчивого процесса функционирования СТ получены значения выходных диагностических параметров значения тока в цепи якоря I_a, I_b, I_c ; трех фазное напряжение в обмотки якоря U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ; мощность активная P и реактивная Q . В качестве входных параметров задавались значения напряжения в обмотке возбуждения U_f и момент вращения ротора тягового генератора Torque, с помощью источника постоянного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. СПб.: Питер, 2006. 751 с.

2. **Ануфриев И.Е.** MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. СПб.: БХВ – Петербург, 2005. 1104 с.

3. **Елизаров И.А.** Моделирование систем / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов,

А.Г. Схиртладзе. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 136 с.

4. Принципы создания автоматизированной адаптивной диагностической системы контроля электромеханических комплексов / И.А. Менщиков, Г.Г. Угаров // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 19-23.

Менщиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Баташов Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergey I. Batashov – PhD, Associate Professor, Department of Traction Equipment at the Russian Open Academy of Transport of the Russian University of Transport (МИТ)

Статья поступила в редакцию 02.06.19, принята к опубликованию 15.06.19

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.362.1

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ

Д.И. Артюхов, И.Н. Бурмистров, И.И. Артюхов

APPLICATION OF THERMAL ELECTROCHEMICAL CELLS TO POWER SUPPLY THE WIRELESS SENSORS

D.I. Artyukhov, I.N. Burmistrov, I.I. Artyukhov

В настоящее время сбор энергии является новой темой, которая все больше интересует исследователей в области электроники. Она основана на сборе очень небольших количеств энергии из окружающей среды с использованием небольших преобразователей. Собранный энергия используется для питания цепей с низким энергопотреблением, таких как беспроводные датчики. В статье представлена система питания датчиков, в которой термоэлектрохимические элементы используются для преобразования теплоты в электрическую энергию.

Ключевые слова: сбор энергии, термоэлектрохимическая ячейка, повышающий преобразователь постоянного тока, беспроводные датчики

Беспроводные датчики широко используются в промышленности, автомобилестроении, строительстве, медицине, научных исследованиях, системах безопасности. Использование батарей для питания этих датчиков во многих случаях затруднительно. Из-за удаленности объектов, на которых расположены датчики, или сложных условий их эксплуатации замена батарей является большой проблемой. Поэтому возникла и требует решения актуальная задача снабжения этих датчиков энергией, которую можно собирать и хранить на месте установки датчиков [1].

Currently, power generation is an emerging and challenging topic for researchers working in the field of electronics. It is based on generation of very small amounts of energy from the environment using small scale transducers. The generated energy is used to feed low power circuits such as wireless sensors. This paper presents a system to the sensor power supply where the thermo-electrochemical cells are used to convert heat into electrical energy.

Keywords: energy generation, thermo-electrochemical cell, step-up DC-DC converter, wireless sensors

Многие беспроводные сенсорные системы используются для мониторинга физических величин, которые изменяются медленно. Поэтому измерения могут проводиться и передаваться нечасто, что приводит к низкому рабочему циклу работы и, соответственно, к низкой требуемой средней мощности. Например, если сенсорной системе требуется 3,3 В при 30 мА (100 мВт) во время бодрствования, но она активна только в течение 10 мс каждую секунду, тогда средняя требуемая мощность составляет всего 1 мВт при условии, что ток сенсорной системы уменьшается

в микроампер во время неактивного состояния. Если один и тот же беспроводной датчик осуществляет выборку и передачу только раз в минуту, а не раз в секунду, средняя мощность падает ниже 20 мкВт. Это различие является значительным, потому что большинство форм сбора энергии предлагают очень мало стационарного питания, обычно не более нескольких милливатт, а в некоторых случаях только микроватты. Чем меньше средняя мощность, необходимая приложению, тем больше вероятность того, что оно может быть получено за счет собранной энергии.

Существуют различные источники сбора энергии [2]: солнечные, органические, вибрационные, тепловые, электромагнитные поля ближнего поля и электромагнитные поля дальнего поля (или радиочастоты).

Преобразователи для всех этих источников энергии имеют три общие характеристики:

- их электрическая мощность не регулируется и не может быть использована непосредственно для питания электронных схем;

- они не могут обеспечивать непрерывное электропитание;

- обычно они выдают очень небольшую среднюю выходную мощность в диапазоне от 10 до 10 мВт.

Важное требование к источникам питания – импульсы тока не должны приводить к полному исчерпанию накопленного за неактивный период количества энергии.

Исследователи уделяют большое внимание использованию низкопотенциальной тепловой энергии с использованием термоэлектрических генераторов. Типичные области применения - радиаторы отопления или трубы с горячими жидкостями. Также теплота от механического или электрического оборудования является потенциальным источником энергии, например, промышленные приводы. Процесс преобразования основан на эффекте Зеебека [3].

Термоэлектрический эффект, также известный как эффект Зеебека, является наблюдаемым свойством различных металлов и химических растворов. Он представ-

ляет собой прямое преобразование теплоты в электричество. Когда разность температур применяется к разнородным материалам, соединенным вместе, подвижный носитель заряда на горячем конце диффундирует к холодному концу, перенося теплоту и заряд. Накопление носителей заряда приводит к суммарному заряду на холодном конце, что приводит к электростатическому потенциалу.

Если разница температур ΔT между двумя концами мала, то термоэлектрическое напряжение ΔU на клеммах определяется по формуле

$$\Delta U = -S_e \cdot \Delta T,$$

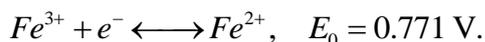
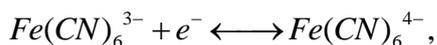
где S_e – коэффициент Зеебека.

Существуют два основных типа термоэлектрических элементов: твердотельные и жидкие электрохимические.

Твердотельные термоэлектрики – это традиционные устройства термоэлектрического преобразования, где применяемая разность температур между материалами типа P и N приводит к потоку электронов и выработке электричества. Типичные твердотельные термоэлектрики из теллурида висмута имеют коэффициент Зеебека до 230 мкВ/К. Твердотельные термоэлектрики эффективно работают при высоких температурах. Однако сбор энергии при низких температурах затрудняется их высокой стоимостью и ограниченностью применения материалов с токсичными или редкими элементами [4].

Стремление максимально увеличить эффективность термоэлектриков привело к созданию нового типа устройств, способных генерировать электрическую энергию за счет градиента температур между электродами. Такими устройствами являются жидкие термоэлектрохимические ячейки (ТЭХ) [5].

Жидкие ТЭХ используют температурную зависимость электрохимических окислительно-восстановительных потенциалов для переноса электронов и выработки электроэнергии. Термодинамика и электродинамика жидких ТЭХ описываются следующей обратимой окислительно-восстановительной химической реакцией:



Такая реакция позволяет получить коэффициент Зеебека на уровне 1,4 мВ/К.

Термоэлектрохимические ячейки являются перспективными устройствами для сбора отработанной теплоты для устойчивого производства энергии [6]. Исследования в области ТЭХ значительно расширились в последние годы, что обусловлено такими преимуществами, как их способность непрерывно преобразовывать теплоту в электрическую энергию, не производя выбросов и не потребляя материалы. До относительно недавнего времени коммерческая жизнеспособность ТЭХ была ограничена их низкой выходной мощностью и эффективностью преобразования. Тем не менее, в последнее время были достигнуты значительные успехи в производительности ТЭХ в результате улучшений материалов электродов, химического состава электролитов и окислительно-восстановительного потенциала и различных особенностей конструкции ячеек [7].

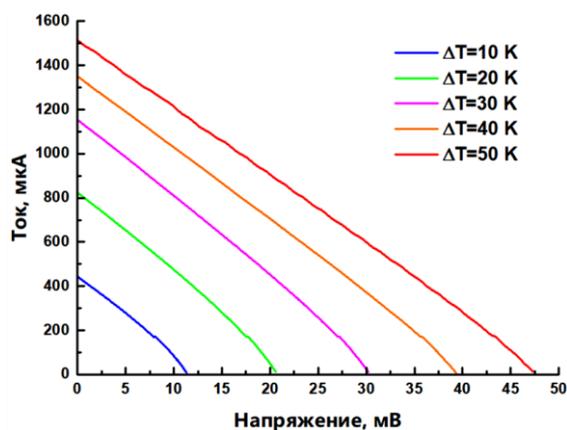


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ТЭХ при концентрации электролита 0,3 моль/л

В соответствии с характеристиками на рис. 2, при концентрации электролита 0,3 моль/л и разности температур $\Delta T = 50 \text{ K}$ величина ЭДС $E = 48 \text{ мВ}$, ток короткого замыкания $I_{KЗ} = 1,5 \text{ мА}$. Поэтому сопротивление R_0 имеет величину 32 Ом.

Изменение сопротивления нагрузки R_H приводит к изменению выходного напряжения ячейки и мощности, отдаваемой

Один из вариантов конструкции ТЭХ с электролитом на основе растворов калиевых солей гексацианоферратов/ферритов описан в [8]. В результате экспериментальных исследований ячейки для различных значений концентрации электролита и разности температур между электродами были получены вольт-амперные характеристики. На рис. 1 для примера показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) ячейки для концентрации 0,3 моль/л.

Анализ ВАХ ячейки показал, что при заданной концентрации электролита они смещаются практически параллельно при изменении разности температур ΔT . Наклон характеристик и напряжение холостого хода зависят от концентрации электролита. Это позволяет представить ячейку эквивалентным двухполюсником (рис. 2), у которого ЭДС E равна напряжению холостого хода U_{XX} , а внутреннее сопротивление определяется по формуле

$$R_0 = U_{XX} / I_{KЗ},$$

где $I_{KЗ}$ – ток короткого замыкания.

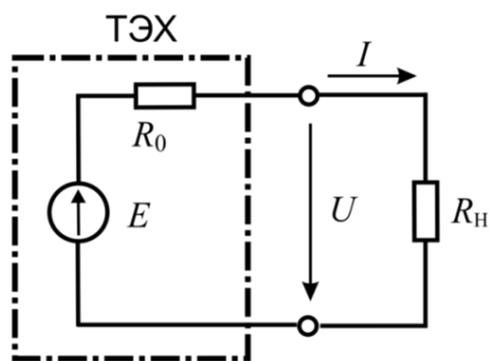


Рис. 2. Эквивалентная схема ТЭХ

в нагрузку. Соответствующие графики при концентрации 0,3 моль/л показаны на рис. 3. Из-за практически линейного вида ВАХ ячейки максимум отдаваемой мощности имеет место, когда $R_0 = R_H$, и определяется формулой

$$P_{\max} = 0,25 \cdot U_{XX} \cdot I_{KЗ}.$$

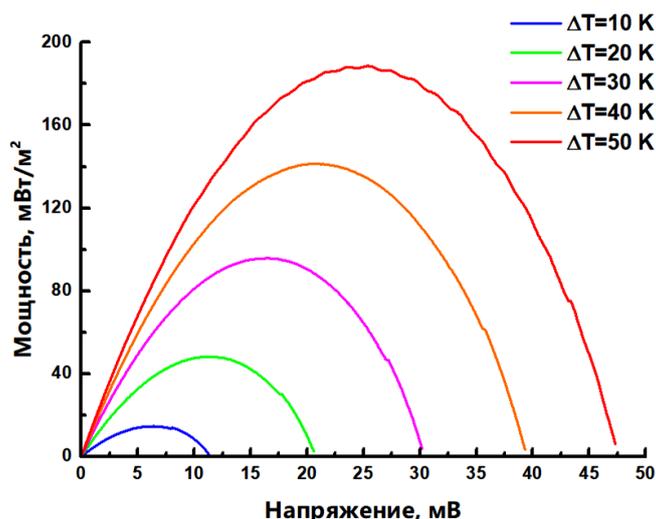


Рис. 3. Зависимость удельной мощности ТЭХ от напряжения при концентрации электролита 0,3 моль/л

Поскольку беспроводные датчики со сверхнизким энергопотреблением все чаще предлагаются для многих применений, существует огромная потребность в методах сбора микроэнергии для обеспечения питания датчиков. Тем не менее, технология управления питанием для сбора микроэнергии представляет собой большую проблему для накопления и управления энергией, поскольку напряжение, подаваемое в экстремальных условиях окружающей среды, намного ниже, чем пороговое напряжение стандартных электронных устройств, поэтому часто не подходит для стандартных микросхем управления питанием. Подаваемое напряжение от схемы сбора термоэлектрической энергии очень мало при небольшой разнице температур и может сильно варьироваться в зависимости от температуры окружающей среды.

На рис. 4 представлена упрощенная структурная схема системы электропитания беспроводных датчиков. Входное напряжение обеспечивается ТЭХ. Повышающий преобразователь постоянного тока необходим для преобразования сверхнизкого напряжения ТЭХ в полезный уровень напряжения для датчиков и встроенных систем (микропроцессор, радиочастотная связь). Он должен иметь возможность запускаться и эффективно работать при ультранизких напряжениях. В блоке накопления энергии используются электрические двухслойные конденсаторы (также называемые суперконденсаторами), имеющие длительный срок эксплуатации (более 10 лет). При этом для зарядки суперконденсаторов применимы простые цепи.



Рис. 4. Структурная схема системы электропитания беспроводных датчиков

Современные исследователи уделяют большое внимание разработке преобразователей постоянного тока, которые способны повышать очень низкие напряжения до ти-

пичных напряжений питания интегральных схем. В [9] представлен преобразователь, который основан на гибридной индуктивно-емкостной архитектуре и подходит так-

же для сбора энергии. Устройство может запитать нагрузку напряжением 1,2 В за счет преобразования входного напряжения 200 мВ, выдаваемого термоэлектрическим элементом при разности температур 5 К.

Специальный повышающий преобразователь постоянного тока со сверхнизким начальным напряжением 40 мВ представлен в [10]. Он обеспечивает несколько регулируемых выходных напряжений для беспроводных датчиков с низким энергопотреблением. Технические решения, которые предложены в [11, 12] и других работах, используют принцип двухступенчатого построения повышающих преобразователей постоянного тока. При этом первая ступень выполняется в виде самовозбуждающегося генератора с повышающим трансформатором и выполняет функцию запуска преобразователя от низких входных напряжений. Вторая ступень обеспечивает заряд суперконденсатора и формирует напряжения, которые необходимы для работы датчиков, микропроцессора и радиопередатчика.

Данная идея может быть реализована при использовании интегральной схемы

LTC3108, в составе которой имеется МОП-транзистор для построения самовозбуждающегося генератора [13]. При этом данная микросхема позволяет реализовать функции управления процессами заряда конденсаторов и регулирования нескольких напряжений в системе, в которой средняя потребляемая мощность очень низкая, но могут быть периодические импульсы нагрузки с более высоким потребляемым током.

Упрощенная схема первой ступени повышающего преобразователя постоянного тока с применением микросхемы LTC3108 показана на рис. 5. Для построения резонансного генератора Армстронга первичная обмотка повышающего трансформатора Т включена между выводом «плюс» ТЭХ и стоком МОП-транзистора в микросхеме LTC3108 (вывод 15). Исток транзистора соединен с выводом «минус» ТЭХ. На затвор транзистора (вывод 14 микросхемы) через конденсатор С2 поступает напряжение с вторичной обмотки повышающего трансформатора Т. Параллельно выводам ТЭХ подключен фильтрующий конденсатор C_{in} .

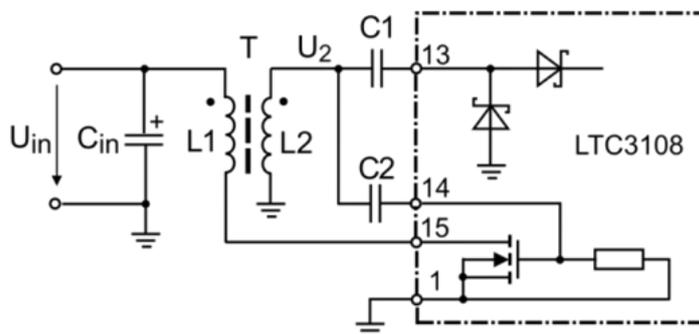


Рис. 5. Упрощенная схема первой ступени повышающего преобразователя

При подаче на вход генератора напряжения U_{in} необходимой величины возникают автоколебания, частота которых определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C}},$$

где L_2 – индуктивность вторичной обмотки трансформатора Т; C – суммарная емкость цепи, подключенной к вторичной обмотке. Она состоит из емкости конденсатора C_2 и паразитной емкости схемы.

Обычно частота колебаний находится в диапазоне от 10 до 100 кГц.

Коэффициент трансформации повышающего трансформатора определяет, насколько низким может быть входное напряжение U_{in} для запуска преобразователя. Использование соотношения 1:100 позволяет работать с пусковыми напряжениями от 20 мВ. Другими факторами, влияющими на рабочие характеристики, являются активное сопротивление обмоток трансформатора и индуктивность обмоток. Более

высокое активное сопротивление обмоток приведет к снижению эффективности.

Следует также отметить, что конструкция LTC3108 такова, что при снижении U_{in} входное сопротивление преобразователя увеличивается. Эта функция позволяет микросхеме LTC3108 достаточно хорошо приспосабливаться к ТЭХ с различными значениями внутренних сопротивлений.

Вторичная обмотка трансформатора питает зарядный насос и цепь выпрямителя, которая используется для питания интегральной схемы и зарядки выходных конденсаторов.

В экспериментальном образце системы электропитания датчиков был применен трансформатор LPR6235-752SMR [14], имеющий коэффициент трансформации 1:100. Индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора составляли

7,5 мкГн и 75 мГн соответственно, коэффициент магнитной связи – 0,95.

Конденсаторы на схеме рис. 5 имели следующие параметры: $C_{in} = 220$ мкФ, $C_1 = 1$ нФ, $C_2 = 330$ пФ.

Для накопления собранной с помощью ТЭХ энергии применен суперконденсатор ESHSR-0005C0-002R7, у которого емкость составляет 5 Ф, номинальное напряжение – 2,7 В.

Исследование опытного образца системы электропитания беспроводных датчиков было проведено для ряда значений напряжения U_{in} . На рис. 6 показаны осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора и на входе выпрямителя в микросхеме LTC3108 (вывод 13 микросхемы). Диаграммы напряжений были получены экспериментально на цифровом осциллографе Fluke 196С с двумя гальванически изолированными каналами.

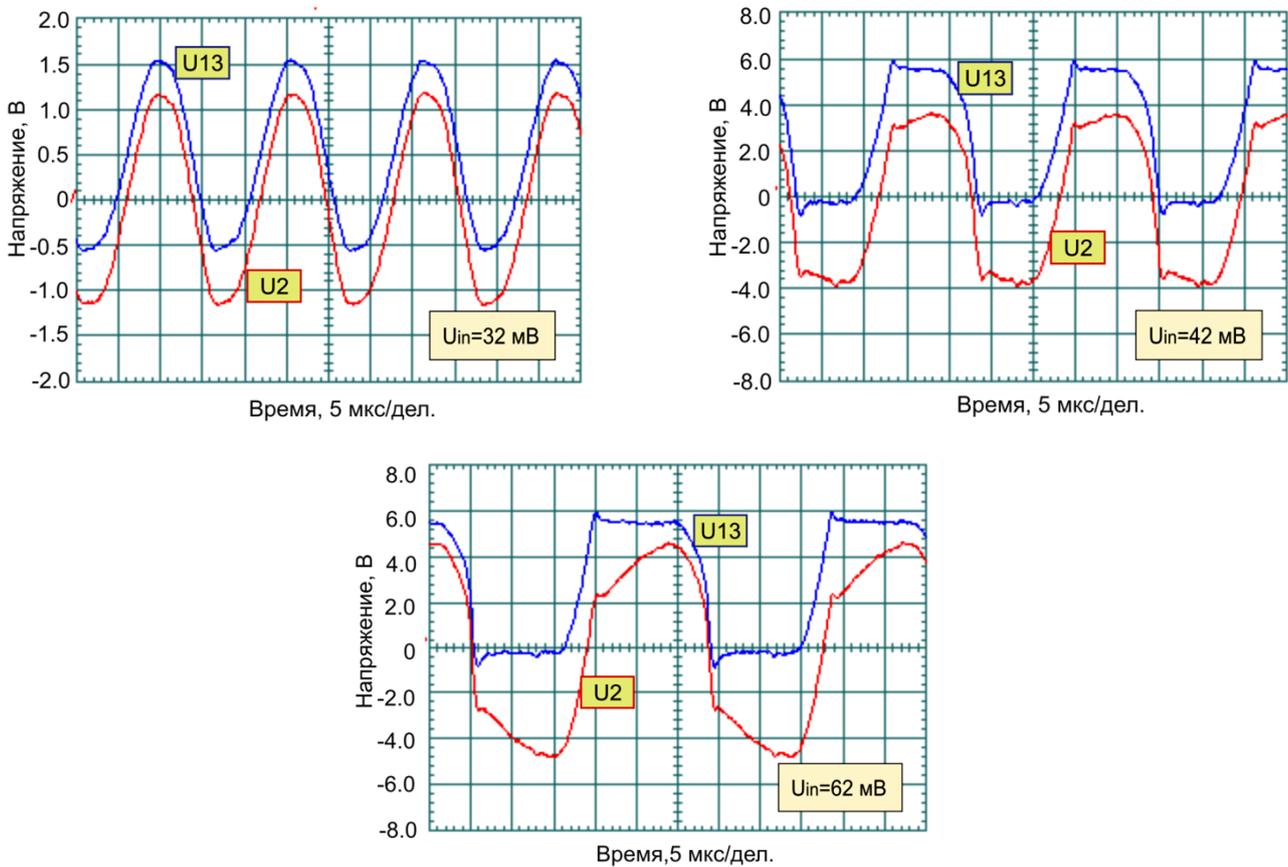


Рис. 6. Осциллограммы напряжений

Установлено, что повышающий преобразователь запускается при входном

напряжении 22 мВ. Однако при этом напряжении генератор работает неста-

бильно. Наблюдаются отклонение частоты и амплитудная модуляция напряжения U_2 на вторичной обмотке трансформатора. С увеличением напряжения генератор работает стабильно. В диапазоне напряжений U_{in} до 40 мВ напряжения U_2 и U_{13} являются синусоидальными. При даль-

нейшем увеличении U_{in} напряжение U_{13} ограничивается величиной 5,52 В.

Результаты эксперимента также показали, что увеличение входного напряжения U_{in} от 32 до 62 мВ сопровождается уменьшением частоты колебаний генератора с 62,3 до 34,9 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chalasanani S.** A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems / S. Chalasanani, J.M. Conrad // IEEE SoutheastCon, Huntsville. 2008. P. 442-447.
2. Self-powered ultra-low power DC-DC converter for RFenergy harvesting / S.-E. Adami, V. Marian, N. Degrenne at al. // FTFC, Jun 2012, Paris, France. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00719861>.
3. **Dupont M.F.** Thermo-electrochemical cells for waste heat harvesting – progress and perspectives / M.F. Dupont, D.R. MacFarlane, J.M. Pringle. Chem. Commun. 2017. Vol. 53. P. 6288-6302.
4. An electrochemical system for efficiently harvesting low-grade heat energy / Seok Woo Lee, Yuan Yang, Hyun-Wook Lee at al. // Nature Communications. 2014. URL: www.nature.com/naturecommunications. DOI: 10.1038/ncomms4942.
5. Liquid Thermoelectrics: Review of Recent and Limited New Data of Thermogalvanic Cell Experiments / A. Gunawan, C.-H. Lin, D.A. Buttry at al. // Nanoscale Microscale Thermophys. 2013. Eng. 17(4). P. 304-323.
6. Thermo-electrochemical Generator: Energy Harvesting & Thermoregulation for Liquid Cooling Applications / A.H. Kazim, A.S. Booshaghi, S.T. Stephens at. al. // Sustainable Energy Fuels. 2017. DOI: 10.1039/C7SE00161D.
7. Thermo-electrochemical cells based on polymer and mineral hydrogels for low-grade waste heat conversion / A. Shindrov, D. Artyukhov, M. Vikulova at al. // AIP Conference Proceedings 1899, 020016, 2017.
8. Исследование зависимости эффективности термоэлектрической ячейки от концентрации электролита / Д.И. Артюхов, Н.В. Киселев, Н.В. Горшков и др. // Вопросы электротехнологии. 2018. № 4 (21). С. 24-29.
9. **Richelli A.** A 0.2-1.2V DC/DC boost converter for power harvesting applications / A. Richelli, L. Colalongo, S. Tonoli // IEEE Trans. on Power Electronics. 2009. Vol. 24. № 6. P. 1541-1546.
10. **Carlson E.** 20mV Input Boost Converter for Thermoelectric Energy Harvesting / E. Carlson, K. Strunz, B. Otis // 2009 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers. P. 162-163.
11. An Ultra-low Input Voltage DC-DC Boost Converter for Micro-energy Harvesting System / Hua Yu, Hanzhong Wu, Yumei Wen, Li Ping // The 2nd International Conference on Information Science and Engineering. 2010. DOI:10.1109/ICISE.2010.5691809.
12. **Gruber J.-M.** Efficient Boost Converter for Thermoelectric Energy Harvesting / J.-M. Gruber, S. Mathis // AMA Conferences 2017 – SENSOR 2017 and IRS² 2017. DOI: 10.5162/sensor2017/P3.6.
13. Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager LTC3108. URL: <http://www.linear.com/LTC3108>.
14. Coupled Inductors LPR6235. Available: <http://www.coilcraft.com>.

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

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

Бурмистров Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor N. Burmistrov – Dr.Sc., Professor, Department of Chemistry and Materials Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 17.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

УДК 621.315.14

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Н.Ю. Шевченко, Г.Г. Угаров, С.Н. Кириллова, О.И. Елфимова

ANALYSIS OF PARAMETERS TO THE ICE-MELTING MODE IN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

N.Yu. Shevchenko, G.G. Ugarov., S.N. Kirillova, O.I. Elfimova

Для успешного проведения плавки гололеда необходимо определять расчетные параметры режимов плавки гололеда для конкретных климатических условий. Проведено аналитическое и графоаналитическое исследование влияния температуры воздуха, скорости и направления ветра при различной толщине стенки гололеда на максимально допустимы, токи плавки гололеда заданной длительности, на токи профилактического обогрева для проводов марки АС различных сечений воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, плавка гололеда, параметры режимов плавки гололеда

For successful ice melting it is necessary to determine the design parameters of ice melting modes for specific climatic conditions. The authors conducted an analytical and graphic-analytical study relating the influence of the air temperature, wind speed and direction at different ice wall thickness on the maximum permissible currents, ice melting currents of a given duration, on the currents of preventive heating for steel-aluminum wires of various diameters of overhead power lines with the voltage of 110 kV.

Keywords: overhead power transmission lines, ice melting, the parameters of the modes of fusion of ice

В современном мире остро стоит проблема борьбы с гололёдообразованием на высоковольтных линиях электропередачи. Электрические сети в период гололёдообразования подвергаются воздействию случайных возмущений с разными параметрами [1]. Наибольшее обледенение проводов воздушной линии электропередачи наблюдается на возвышенных участках линии, где выше скорость ветра и наиболее низкие температуры.

Виды гололёдных осадков представлены в табл. 1 [2].

На образование гололёда большое влияние оказывают и параметры воздушной линии: высота подвеса проводов (табл. 2), диаметр и жесткость провода.

С увеличением диаметра провода линии электропередачи и зависимости от скорости ветра в той или иной климатической зоне масса гололёда может сначала увеличиваться, а достигнув максимума – уменьшаться. Если скорость ветра направлена к проводам под углом, то масса гололёдного остатка будет пропорциональна синусу угла.

Таблица 1

Классификация видов гололёдных осадков

Наименование гололедного осадка	Плотность, ρ , г/см ³	Температура воздуха, °С
Гололёд стекловидный или матовый плотностью	0,8-0,9	от 0 до -2°С
Зернистая изморозь	0,4	от 0 до -4°С и от -4 до -8°С
Кристаллическая изморозь	0,05	от -12 до -16°С
Отложение мокрого снега	0,2-0,4	от 0 до -2°С
Сложное отложение (различные смеси этих осадков)	0,25-0,5	от 0 до -4°С

Таблица 2

Коэффициенты изменения массы гололёда от высоты подвеса провода

Высота подвеса провода, м	2	4	8	10	12	16	23
Коэффициенты изменения массы гололёда k	0,6	0,75	0,8-0,9	1,0	1,05-1,25	1,25-1,5	1,6-2,0

Расчетные параметры режимов плавки гололеда. В настоящее время в России основным техническим мероприятием по предотвращению гололедных аварий на воздушных линиях электропередачи является плавка гололеда переменным и постоянным током. Предотвращение гололедных отложений может быть достигнуто применением профилактического подогрева провода [3].

Для проектирования и эксплуатации воздушных линий электропередачи, а также для оптимизации стратегии борьбы с гололедно-изморозевыми отложениями необходимо оперативно определять для конкрет-

ных климатических условий расчетные параметры режимов плавки гололеда:

$I_{м.д.}$ – максимально допустимый ток по условию сохранения механической прочности провода при максимально-допустимой температуре провода,

$I_{дон.}$ – допустимый ток по условию сохранения нормативных габаритов линии,

$I_{но.}$ – ток профилактического обогрева,

$I_{пл.}$ – ток в проводе при плавке гололеда,

$I_{(m)}$ – ток плавки гололеда заданной длительности (Т),

$t_{пл.}$ – время плавки гололеда,

$\Theta_{пр.}$ – температура провода без гололеда.

Для проведения успешной плавки необходимо обеспечить выполнение следующих условий.

1. Для предотвращения пережога проводов ток плавки гололеда не должен превышать значения максимально допустимого тока по условию нагрева участков провода без гололеда:

$$I_{пл.} \leq I_{м.д.}, \quad (1)$$

а температура провода не должна превышать максимально допустимого значения: $\vartheta_{пр.} \leq \vartheta_{м.д.}$, которое для проводов типа АС составляет $\vartheta_{м.д.} = 90^\circ\text{C}$, для стальных тросов $\vartheta_{м.д.} = 100^\circ\text{C}$.

2. Нижняя граница тока плавки не должна превышать значение допустимого тока:

$$I_{пл.} \leq I_{дон.} \quad (2)$$

3. $I_{пл.} \geq I_{(T)}$ – ток плавки гололеда заданной длительности, не должен превышать тока плавки, то есть время плавки ($t_{пл.} \leq T$) лежит в пределах 40-60 минут.

4. Для предотвращения отложений гололеда необходимо обеспечить температуру провода на один-два градуса выше нуля: $\vartheta_{пр.} \geq 1-2^\circ\text{C}$.

При этом ток профилактического подогрева не должен превышать тока плавки гололеда: $I_{пл.} \geq I_{но}$ [4].

Расчетные условия должны выполняться не только при расчетных, но и при фактических климатических параметрах. Поэтому определение допустимых расчетных параметров режима плавки является актуальной задачей.

Цель исследования: сравнить расчетные параметры режимов плавки гололеда для проводов АС70-АС240 при различных климатических условиях.

Методы исследования: аналитический по алгебраическим уравнениям баланса тепловой энергии, выделяемой в проводнике, отводимой в окружающую среду и расходуемой на нагрев провода и плавление гололеда и графоаналитический с использованием графиков, построенных для проводов различных марок и выборочных значений климатических параметров.

Исходные данные: одноцепная ВЛ 110 кВ длиной 12 км, расположена в IV районе по гололеду, марка провода АС, опоры ПБ110. Параметры проводов представлены в табл. 3 [5].

Таблица 3

Исходные данные для исследования

Марка провода	АС70/11	АС120/19	АС150/24	АС185/29	АС240/39
Общее сечение, мм ²	79,3	136,8	173,2	210	274,6
Внешний диаметр, см	1,14	1,52	1,71	1,88	2,16
Удельное сопротивление постоянному току при $t_\theta = 20^\circ\text{C}$, Ом/км	0,429	0,249	0,198	0,162	0,124

Результаты исследования. Максимально допустимый ток $I_{м.д.}$ проводов определен при температурах воздуха $\vartheta_\theta = 0^\circ, -5^\circ, -10^\circ\text{C}$, скорости ветра $v = 2, 5, 10, 15$ м/с

$$I_{м.д.} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot C_0 \cdot [(273 + \vartheta_{м.д.})^4 - (273 + \vartheta_{возд.})^4] \cdot S + 1.1 \cdot k_\phi \cdot \sqrt{v \cdot d_{пр.}} \cdot (\vartheta_{м.д.} - \vartheta_{возд.})}{R_0(1 + \beta \cdot \vartheta_{м.д.})}}, \quad (3)$$

где ε – степень черноты тела, для окисления алюминия $\varepsilon = 0,6$; S – площадь поверхности излучения 1 м провода, см². $s = \pi \cdot d_{пр.} \cdot 100$; $d_{пр.}$ – диаметр провода, см;

при перпендикулярном направлении к проводу $\phi_\theta = 90^\circ$.

Максимально допустимый ток провода в установившемся режиме определялся из уравнения теплового баланса провода [6]:

$C_0 = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; k_ϕ – коэффициент, учитывающий направление ветра ($k_\phi = 1$ при угле ветра $\phi_\theta = 90^\circ$ и

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

$k_\varphi = 0,55$ при $\varphi_\theta = 0^\circ$); $\vartheta_{м.д.}$ – допустимая температура провода без гололеда; $\vartheta_{возд.}$ – температура воздуха; v – скорость ветра в двухминутном интервале осреднения, м/с; R_0 – сопротивление 1 м провода при

$\vartheta_{возд.} = 20^\circ\text{C}$, Ом/м; β – температурный коэффициент сопротивления алюминиевых проволок: 0,00403 1/°C.

Результаты расчетов представлены в табл. 4 и на рис. 1 и 2.

Таблица 4

Максимально допустимый ток проводов при различных климатических условиях

Марка провода	АС70/11	АС120/19	АС150/24	АС185/29	АС240/39
$\vartheta_{возд.} = 0^\circ\text{C}, v = 2 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	543	771	894	1014	1220
$\vartheta_{возд.} = 0^\circ\text{C}, v = 5 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	668	948	1100	1247	1482
$\vartheta_{возд.} = 0^\circ\text{C}, v = 10 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	785	1115	1293	1466	1742
$\vartheta_{возд.} = 0^\circ\text{C}, v = 15 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	860	1221	1416	1606	1908
$\vartheta_{возд.} = -5^\circ\text{C}, v = 2 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	557	791	917	1040	1236
$\vartheta_{возд.} = -5^\circ\text{C}, v = 5 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	685	973	1128	1279	1520
$\vartheta_{возд.} = -5^\circ\text{C}, v = 10 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	805	1143	1326	1504	1787
$\vartheta_{возд.} = -5^\circ\text{C}, v = 15 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	886	1259	1459	1655	1967
$\vartheta_{возд.} = -10^\circ\text{C}, v = 2 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	571	810	940	1066	1266
$\vartheta_{возд.} = -10^\circ\text{C}, v = 5 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	702	997	1155	1311	1557
$\vartheta_{возд.} = -10^\circ\text{C}, v = 10 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	825	1171	1358	154	1830
$\vartheta_{возд.} = -10^\circ\text{C}, v = 15 \text{ м/с}, \varphi_\theta = 90^\circ$					
$I_{м.д., А}^{(90)}$	908	1289	1495	1695	2015

С увеличением диаметра провода, понижением температуры и усилением ветра величина максимально допустимого тока увеличивается. Самые большие токи получились при температуре воздуха -10°C и скорости ветра 15 м/с при перпендикулярном направлении ветра к проводу.

Ток 40-минутной плавки гололеда цилиндрической формы составляет

65-70% от максимально допустимого тока.

Ток плавки гололеда заданной длительности $I_{(m)}$, отсчитываемый от момента нагрева провода до 0°C (t_n), определяется по уравнению баланса энергии в режиме непрерывной плавки неизменяющимся током при температуре провода $\vartheta_{np} = 0^\circ\text{C}$ по формуле:

$$I_{(T)} = \sqrt{\frac{c_L G_L \frac{\vartheta_0 - \vartheta_1}{2} + c_L J_{nl} (\vartheta_0 - \vartheta_{возд.}) + C_{nl} J_{nl} + \varepsilon \cdot C_{0l} (T_1^4 - T_\theta^4) s t_{nl} + 1,1 \cdot k_\varphi t_{nl} \sqrt{v \cdot (d_{np} + 2b)} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{возд.})}{0,5 R_0 t_{nl}}}, \quad (4)$$

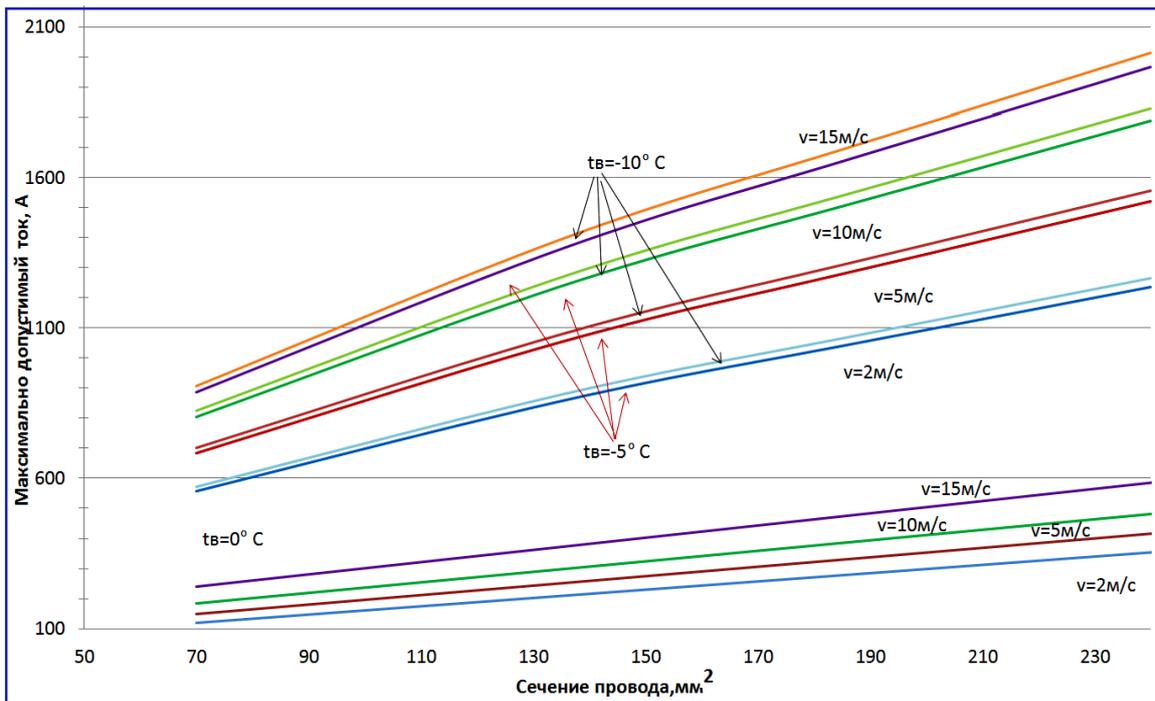


Рис. 1. Зависимость максимально допустимого тока от сечения провода при разных сочетаниях температуры воздуха и скорости ветра при его перпендикулярном направлении

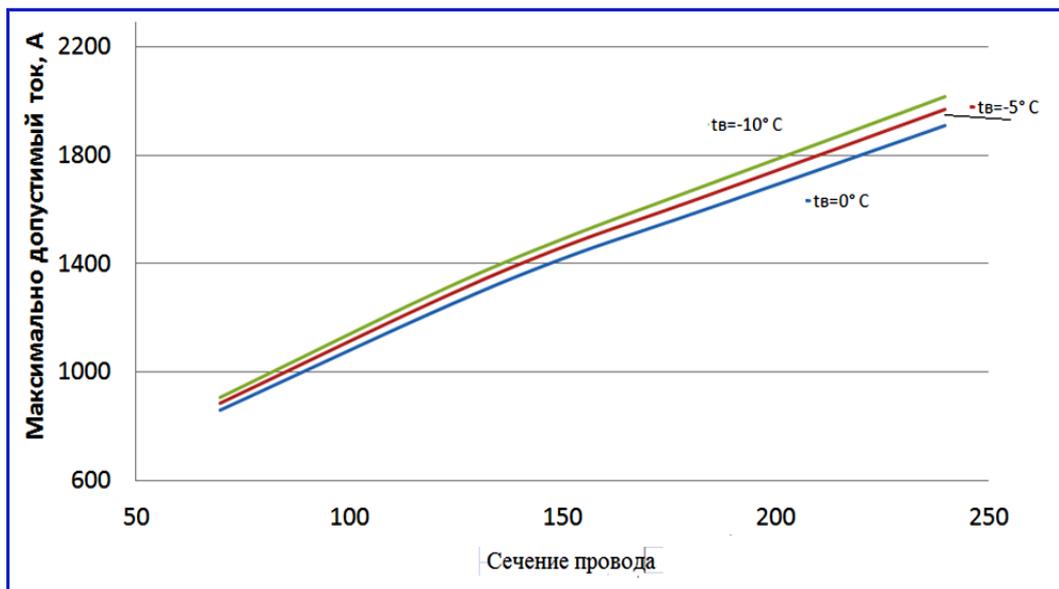


Рис. 2. Зависимость максимально допустимого тока от сечения провода при скорости ветра 15 м/с при изменяющейся температуре воздуха

где $G_{л} = \frac{\pi}{4} [(d_{np} + 2b)^2 - d_{np}^2] \rho_{\text{л}} \cdot 100$ – масса цилиндрической гололедной муфты толщиной b , г/м; $c_{\text{л}}$ – удельная теплоемкость: для льда $c_{\text{л}} = 2,26$ Вт·с/(г°С), для измороси $c_{\text{л}} = 2,09$ Вт·с/(г°С); $t_{\text{пл}}$ – время плавки гололеда, с, (принимается 40 минут); $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$; ϑ_1 – средняя температура поверхности ци-

линдра, находится в интервале температур ($\vartheta_{\text{возд.}}$, $\vartheta_0 = 0^\circ$); $J_{\text{пл}} = 110\rho_{\text{л}} d_{\text{np}} b$ – масса расплавляемого гололеда на 1 м провода, г/м; ε – степень черноты тела; $\varepsilon = 0,64$ – для льда; $\varepsilon = 0,3$ – для измороси; S – площадь поверхности 1 м гололедной муфты; $s = \pi \cdot (d_{\text{np}} + 2b) \cdot 100$, см²; $C_{\text{пл}}$ – теплота плавления гололеда, 333 Вт·с/г.

Полное время плавки гололеда постоянным током $I_{(m)}$ составило:

$$t_{\Sigma} = t_n + t_{nl} = 47,8 \text{ минут.}$$

На рис. 3 представлены зависимость тока плавки гололеда $I_{(m)}$ заданной длительности от скорости ветра и температуры воздуха при толщине стенки гололеда 1 см, а на рис. 4 – зависимость тока плавки голо-

леда $I_{(m)}$ при температуре воздуха -10°C и скорости ветра 15 м/с при разной толщине стенки гололеда.

Результаты расчетов токов плавки гололеда заданной длительностью при $\vartheta_{возд.} = -5^{\circ}\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$, $\varphi_{\delta} = 90^{\circ}$ представлены в табл. 5.

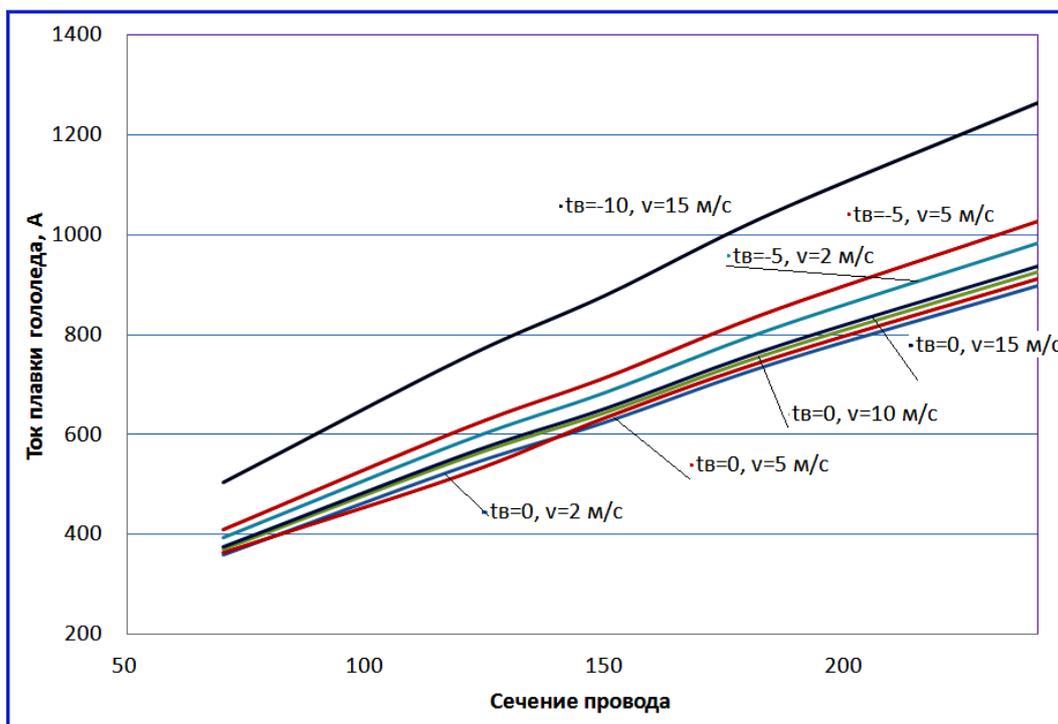


Рис. 3. Зависимость тока плавки гололеда от скорости ветра и температуры воздуха при толщине стенки гололеда 1 см

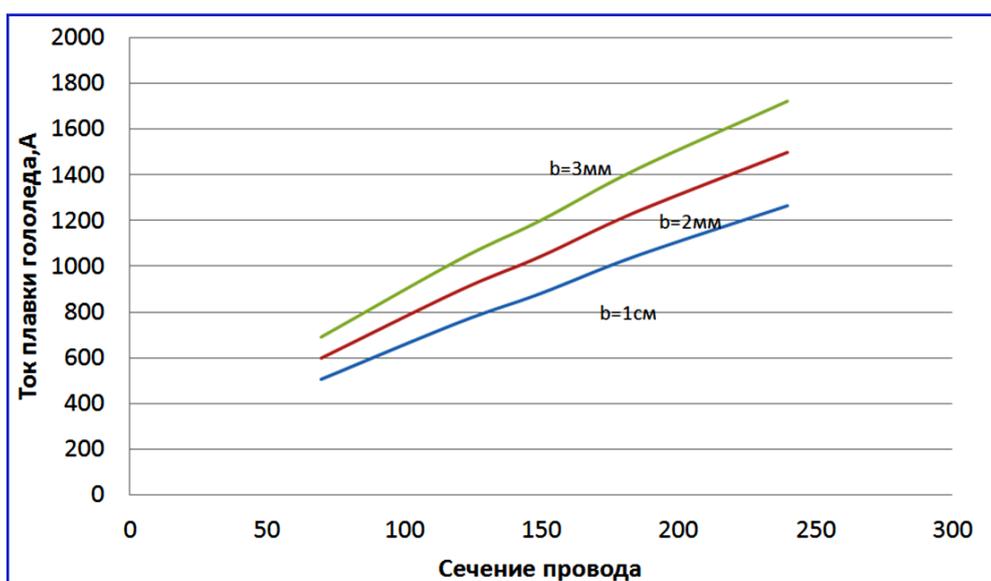


Рис. 4. Зависимость тока плавки гололеда при температуре воздуха -10°C и скорости ветра 15 м/с при разной толщине стенки гололеда

Таблица 5

Токи плавки гололеда заданной длительностью при заданных условиях:

$$\vartheta_{возд.} = -5^{\circ}\text{C}, v = 5 \text{ м/с}, \varphi_{\epsilon} = 90^{\circ}$$

Марка провода	АС70/11	АС120/19	АС150/24	АС185/29	АС240/39
$I_{м.д.б.}^{(90)}$, А	685	973	1128	1279	1520
при толщине стенки гололеда $b = 1$ см					
$I_{(T)}$, А	411	612	716	850	1028
при толщине стенки гололеда $b = 2$ см					
$I_{(T)}$, А	532	793	927	1101	1332
при толщине стенки гололеда $b = 3$ см					
$I_{(T)}$, А	634	945	1105	1312	1586

При увеличении стенки гололеда ток плавки приближается к максимально допустимому значению. При толщине стенки гололеда 1 см ток плавки составляет 65-70% от $I_{м.д.б.}^{(90)}$, следовательно, плавить желательно при толщине стенки гололеда около 1 см.

Ток плавки при толщине стенки гололеда 3 см превышает значение максимально допустимого тока по условию нагрева провода без гололеда при диаметрах провода свыше 1,7 см.

При снижении температуры воздуха с 0 до -5°C при скорости ветра 2 м/с и толщине

стенки гололеда 1 см ток плавки увеличивается на 9%. При увеличении ветра с 2 до 10 м/с при температуре воздуха -5°C ток увеличивается на 28%. При снижении температуры с 0 до -10°C и усилении ветра с 2 до 15 м/с ток плавки увеличивается на 40%.

Ток профилактического подогрева, предотвращающий отложения гололеда на проводах ВЛ благодаря поддержанию температуры провода около $1-2^{\circ}\text{C}$, определяется из уравнения теплового баланса по выражению

$$I_{ПО} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot C_0 \cdot [(273 + \vartheta_{np.})^4 - (273 + \vartheta_{возд.})^4] \cdot s + 1.1 \cdot k_{\varphi} \cdot \sqrt{v \cdot d_{np}} \cdot (\vartheta_{np.} - \vartheta_{возд.}) + c_g m' \cdot (\vartheta_{np.} - \vartheta_{возд.})}{R_0 (1 + \beta \cdot \vartheta_{np.})}} \quad (5)$$

где m' – скорость переохлажденной воды, г/(м·с); c_g – удельная теплоемкость воды: 4,18 Вт·с/(г·°C).

Проведено сравнение значений токов профилактического подогрева от температуры воздуха и скорости ветра. Результаты сведены в табл. 6.

Из таблицы видно, что значение тока профилактического подогрева сильно зависит от температуры воздуха и скорости ветра. Например, при скорости ветра 2 м/с и снижении температуры с 0 до -10°C ток возрастает в среднем в три раза. При увеличении ветра с 2 до 15 м/с при одинаковой температуре воздуха ток увеличивается в 1,6 раза.

В табл. 7 и на рис. 5 приведено сравнение параметров режима плавки гололеда толщиной 1 см при скорости ветра $v = 5$ мс, перпендикулярном направлении к проводу $\varphi_{\epsilon} = 90^{\circ}$, температуре воздуха -5°C .

Температура провода для данных условий определена по уравнению:

$$\begin{aligned} \vartheta_{np} &= \frac{\vartheta_{м.д.} \cdot I_{(T)}^2}{I_{м.д.б.}^{(90)2} \sqrt{v/v_б}} + \vartheta_{возд.} = \\ &= \frac{90 \cdot I_{(T)}^2}{1,58 \cdot I_{м.д.б.}^{(90)2}} - 5. \end{aligned} \quad (6)$$

Из расчетов следует, что все условия выполняются:

$$\begin{aligned} I_{нл.} &\leq I_{м.д.} ; \vartheta_{np.} \leq \vartheta_{м.д.} ; I_{нл.} \leq I_{дон} ; \\ I_{нл.} &\geq I_{(T)} ; I_{нл.} \geq I_{но} . \end{aligned}$$

Ток плавки гололеда больше тока профилактического обогрева в среднем в 3,5 раза. И если в гололедный период поддерживать нагрузку в пределах 70% от максимально допустимого значения, то можно обойтись и без плавки гололеда.

Токи плавки профилактического подогрева при различных метеорологических условиях

Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	АС70/11	АС120/19	АС150/24	АС185/29	АС240/39
		Ток профилактического подогрева, А				
0	2	65	91	105	119	143
	5	81	113	130	148	179
	10	95	134	154	174	211
	15	105	147	170	192	233
-5	2	159	224	258	291	352
	5	197	277	319	361	438
	10	232	327	377	427	517
	15	256	361	416	471	571
-10	2	216	302	349	394	477
	5	267	375	432	489	592
	10	315	442	511	577	700
	15	347	488	563	637	773

Таблица 7

Сравнение параметров режима плавки гололеда при скорости ветра $v = 5$ м/с, $\varphi_6 = 90^\circ$ и температуре воздуха -5°C

Марка провода	АС70/11	АС120/19	АС150/24	АС185/29	АС240/39
$I^{(90)}_{м.д.б.}$, А при $v = 2$ м/с, $\vartheta_{возд.} = 0^\circ\text{C}$	543	771	894	1014	1205
$I^{(90)}_{м.д.}$, А при $v = 5$ м/с, $\vartheta_{возд.} = -5^\circ\text{C}$	685	973	1128	1279	1520
$I_{доп.}$, А	479	682	790	896	1064
$I_{по.}$, А	197	277	319	361	438
$I_{пл} = I_{(T)}$, А $b = 1$ см	411	612	716	850	1028
$t_{пл.}$, мин	47,7	47,8	47,8	47,8	47,8
$\vartheta_{пр.}$ без гололеда, °С	27,6	30,9	31,5	35,0	36,4

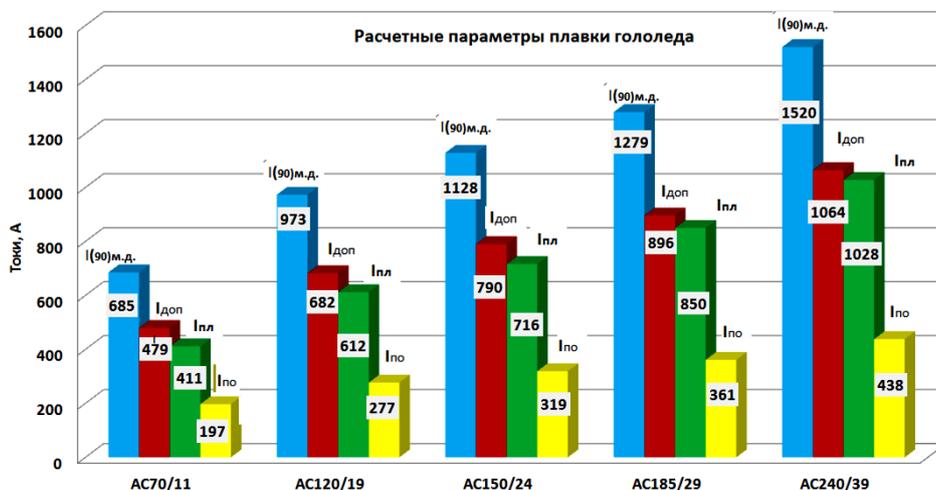


Рис. 5. Расчетные параметры плавки гололеда толщиной 1 см при скорости ветра $v = 5$ м/с, $\varphi_6 = 90^\circ$ и температуре воздуха -5°C

Итак, исследование показало, что расчетные параметры режимов плавки гололеда сильно зависят от климатических условий и диаметра провода. Расчеты проводились при одинаковой высоте подвеса провода и одинаковой жесткости провода. Для успешного проведения плавки гололеда необходимо иметь точную информацию по изменению метеорологических условий и автоматизированную программу расчета параметров плавки гололеда.

Выявлено, что с увеличением толщины стенки гололеда ток плавки приближается

к значению максимально допустимого тока, следовательно, самый экономичный режим будет при толщине стенки гололеда до 1 см. Поэтому важно иметь на линии средства диагностики раннего обнаружения гололеда на проводах. Ток профилактического подогрева меньше значения тока плавки гололеда толщиной в 1 см в 2,1-2,34 раза.

Наибольшие токи плавки гололеда и токи профилактического подогрева при низких температурах воздуха и большой скорости ветра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение эффективности воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ в гололедных районах / Г.Г. Угаров. М.: Перо, 2013. 186 с.

2. **Левченко И.И.** Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И.И. Левченко. М.: ИД МЭИ, 2007. 448 с.

3. **Шевченко Н.Ю.** Анализ концепций развития воздушных линий электропередачи 110-500 кВ, работающих в сложных метеоусловиях / Н.Ю. Шевченко // Электро-

оборудование, эксплуатации и ремонт. 2010. № 12. С. 8-12.

4. **Левченко И.И.** Расчет параметров плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / И.И. Левченко, А.А. Аллилуев, Е.В. Рябуха; Юж. Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002.

5. Правила устройства электроустановок. СПб.: ИД ДЕАН, 2014. 1108 с.

6. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. М.: Союзтехэнерго, 1987. 36 с.

Шевченко Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета

Кириллова Светлана Николаевна – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета

Natalya Yu. Shevchenko – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Volgograd State Technical University

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Volgograd State Technical University

Svetlana N. Kirillova – Lecturer, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Volgograd State Technical University

Елфимова Ольга Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета

Olga I. Elfimova – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 21.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

УДК 621.311, 621.315

**ОЦЕНКА ПРИОРИТЕТНОСТИ РЕМОНТА ЛЭП
НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО АНАЛИЗА
С УЧЕТОМ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ**

Д.А. Глухов, Г.Г. Угаров

**PRIORITY ASSESSMENT OF THE POWER LINES REPAIR BASED
ON RISK-ORIENTED ANALYSIS WITH ACCOUNT
FOR MAINTAINABILITY FACTOR**

D.A. Glukhov, G.G. Ugarov

Согласно действующим требованиям законодательства при рассмотрении заявки на вывод в ремонт ЛЭП с целью принятия решения ее нужно согласовать с системным оператором ЕЭС России, который должен учитывать техническое состояние ЛЭП. Однако в связи с отсутствием возможности объективно оценить техническое состояние, а также качество ремонта ЛЭП на сегодня назрела необходимость создания методики оценки рисков отказа ЛЭП с целью планирования и режимной подготовки ремонтных работ. В статье предложена такая методика, учитывающая интенсивность отказов ЛЭП, степень влияния ЛЭП на электроэнергетический режим энергосистемы, среднюю длительности нахождения ЛЭП в ремонте. Методика апробирована на примере энергосистемы Саратовской области.

Ключевые слова: *приоритетность ремонта ЛЭП, риск отказа ЛЭП, ремонтно-пригодность ЛЭП*

According to the present-day legal requirements, when considering an application for the repair work of an overhead power line, in order to make a decision relating the approval of the work, the system operator of the UPS of Russia must take into account the technical condition of the power line. However, due to the lack of opportunity to objectively assess the technical condition, as well as the quality of repair of the power line, there is a need to create a methodology for assessing the risks of failures in the power lines with the purpose of planning and pre-arrangement of the repair work. The authors have proposed a methodology which takes into account the intensity of failures in the power lines, the degree of influence of the power lines on the electric power mode in the power system, and the average time span needed for the repair works. The methodology was tested in relation to the power system in Saratov region.

Keywords: *priority of repair of the power lines, risk of failure of the power lines, maintainability of the power lines*

В рамках планирования и подготовки ремонтных работ в единой энергетической системе (ЕЭС) России Системный оператор выполняет согласование вывода в ремонт объектов электросетевого хозяйства [1].

С этой целью Системный оператор выполняет рассмотрение плановых, внеплановых и неотложных заявок, принимает к сведению и учитывает при планировании электроэнергетических режимов аварийные заявки владельцев объектов электроэнергетики на вывод в ремонт электросетевого и генерирующего оборудования [2].

Решение о согласовании (об отказе в согласовании) диспетчерской заявки принимается на основании анализа прогнозного электроэнергетического режима ЕЭС России с учетом [3]:

- эксплуатационного состояния объектов диспетчеризации;
- приоритетности реализации плановых ремонтов перед внеплановыми;
- необходимости минимизации включения (отключения) и длительной работы генерирующего оборудования в неэкономичных режимах.

Отказ в согласовании неплановой заявки на вывод в ремонт объекта электроэнергетики может стать причиной подачи заявителем аварийной заявки на планируемое к ремонту оборудование в случае его отказа, а излишний вывод в ремонт электросетевого или генерирующего оборудования может стать причиной снижения надежности и влечет за собой риск возникновения аварийного или вынужденного электроэнергетического режима с высокими рисками нарушения электроснабжения.

Учитывая сложность принятия решения персоналом Системного оператора о согласовании диспетчерской заявки на вывод в ремонт объекта диспетчеризации, на сегодня назрела необходимость создания методики оценки рисков отказа линий электропередач (ЛЭП) и электрооборудования (ЭО), находящихся в эксплуатации, с целью планирования и режимной подготовки ремонтных работ.

Риск отказа электрооборудования. Под риском понимается событие, которое

может произойти в будущем с определенной вероятностью и нанести определенный ущерб [4]. Риск может быть результатом как действия, так и бездействия [5].

Оценку риска отказа ЭО R можно определить как произведение вероятности возникновения отказа и ущерба от такого отказа [6]:

$$R = Q(t)U, \quad (1)$$

где $Q(t)$ – вероятность наступления отказа; U – ущерб от отказа.

Ущерб вследствие отказа ЭО оценивается в денежных единицах [7]. Экономический ущерб для предприятий, являющихся потребителями электрической энергии, при повреждении ЭО, находящегося в их эксплуатации, определяется как сумма технологического ущерба и ущерба, обусловленного проведением ремонтных работ [8]. Для сетевой компании при отказе ЛЭП к указанным составляющим добавляется составляющая ущерба, вызванного штрафными санкциями со стороны потребителя.

Однако использовать стандартный подход для определения ущерба от отказа ЛЭП или иного ЭО на уровне Системного оператора невозможно, поскольку в диспетчерском управлении и ведении Системного оператора находятся ЛЭП, отключение которых зачастую не приводит к погашению потребителей. При этом отключение таких ЛЭП так или иначе может привести к ухудшению параметров электроэнергетического режима, снижению эффективности работы станций, снижению устойчивости энергосистемы.

В связи с этим при определении риска отказа ЛЭП на уровне Системного оператора необходимо руководствоваться алгоритмом принятия решения на основе матрицы риска [9].

Относительный ущерб от отказа ЛЭП.

Предлагается ввести понятие «индекс относительного ущерба» $U_{отн}$, который будет определяться на основании степени влияния ЛЭП на электроэнергетический режим энергосистемы, а также по степени ущерба. Определение индекса относительного ущерба предлагается определять в соответствии с классификацией ЛЭП, приведенной в таблице.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Классификация ЛЭП по степени влияния на допустимые параметры режима

п	п.п.	Описание критерия	Индекс ущерба, о.е.
Все виды ЛЭП			
1		Системообразующие ЛЭП, изменение состояния которых значительно влияет на запас статической устойчивости по активной мощности и напряжению в энергосистеме	0,9
2		ЛЭП, влияющие на допустимый переток активной мощности в контролируемом сечении:	
	2.1.	ЛЭП, пропускная способность которых определяет допустимый переток активной мощности в контролируемом сечении в нормальной схеме в соответствии с [10]	0,79
	2.2.	ЛЭП, пропускная способность которых определяет допустимый переток активной мощности в контролируемом сечении только в ремонтной схеме в соответствии с [10]	0,76
	2.3.	ЛЭП, вывод в ремонт которых снижает допустимый переток в контролируемом сечении или приводит к увеличению загрузки контролируемого сечения	0,73
3		ЛЭП схемы выдачи мощности электростанций, не входящие в состав контролируемых сечений, обеспечивающие статическую и динамическую устойчивость генерирующего оборудования:	
	3.1.	ЛЭП, определяющие величину допустимой генерации электростанции в нормальной схеме	0,7
	3.2.	ЛЭП, работающие по схеме «блок генератор-трансформатор-линия»	0,675
	3.3.	ЛЭП, пропускная способность которых определяет величину допустимой генерации электростанции в ремонтной схеме	0,65
	3.4.	ЛЭП, вывод в ремонт которых создает ограничения по допустимой генерации электростанций	0,625
ЛЭП с двухсторонним питанием			
4		ЛЭП, не входящие в состав контролируемых сечений, но создающие ограничения при планировании и управлении электроэнергетическим режимом (чаще всего оборудованы автоматикой ограничения перегрузки оборудования в соответствии с [11] с действием на изменение топологии электрической сети):	
	4.1.	ЛЭП, пропускная способность которых определяет величину допустимых балансовых перетоков между частями энергосистемы	0,6
	4.2.	ЛЭП, вывод в ремонт которых приводит к возникновению ограничений по допустимым балансовым перетокам между частями энергосистемы	0,55
Тупиковые ЛЭП			
6.		ЛЭП, отключение которых может привести к потере управляющих воздействий устройств режимной или противоаварийной автоматики энергосистем (ЛЭП с УПАСК)	0,4
7.		Межгосударственные ЛЭП, обеспечивающие договорные обязательства по поставкам ЭЭ (не влияющие на электроэнергетический режим энергосистемы)	0,3
Все виды ЛЭП			
8		ЛЭП, обеспечивающие надёжность электроснабжения потребителей:	
	8.1.	ЛЭП, отключение которых влечет полное прекращение электроснабжения потребителей (3 категория надёжности в соответствии с [12])	0,2
	8.2.	ЛЭП, вывод в ремонт которых создает риск нарушения электроснабжения важных потребителей при нормативном возмущении (1 и 2 категория надёжности в соответствии с [12])	0,15
9.		ЛЭП, не оказывающие влияния на электроэнергетический режим (ЛЭП, находящиеся под напряжением, аварийное отключение которых не приводит ни к каким последствиям, кроме необходимости их ремонта).	0,1

Приведенная в таблице классификация универсальна для всех ЭС ЕЭС России, однако при детальном анализе относительного ущерба от отказа ЛЭП необходимо вносить корректировки, учитывающие нетиповые особенности конкретной ЭС. Принцип назначения величины относительного ущерба основан на том, что введено 9 категорий ЛЭП. В зависимости от ранга каждой категории присвоен индекс относительного ущерба на 0,1 о.е. больший, чем у предыдущей категории. Некоторые категории ЛЭП имеет дополнительные подкатегории. В зависимости от количества подкатегорий в каждой категории проградуйрована шкала изменения индекса относительного ущерба. При наличии двух подкатегорий цена деления устанавливается в 0,05 о.е., при наличии трех – 0,03 о.е., при наличии четырех – 0,025 о.е.

Ранжирование критериев произведено на основании [10-12], а также иных нормативно-технических документов в области электроэнергетики, регламентирующих требования к управлению электроэнергетическими режимами ЭС.

Такой подход при планировании средств на ТО и Р позволит провести сравнительный ущерб от отказа ЛЭП и позволит определить относительный риск отказа ЛЭП:

$$\frac{Y_{ВЛ1}}{Y_{ВЛ2}} = \frac{k_f Y_{омн1}}{k_f Y_{омн2}} = \frac{Y_{омн1}}{Y_{омн2}}, \quad (2)$$

где k_f – коэффициент (функциональная зависимость), учитывающий соотношение реального ущерба от отказа ЛЭП к относительному ущербу $Y/Y_{омн}$, руб./о.е.

Стоит отметить, что индекс относительного ущерба – понятие условное. Для его определения необходимо учитывать особенности конкретной энергосистемы.

С этой целью разработана классификация ЛЭП по степени влияния на допустимые параметры режима энергосистемы. На основании проведения аналогичного анализа по ЛЭП 110-220 кВ, являющимся объектами диспетчеризации Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ каждой ЛЭП

присвоен индекс относительного ущерба от 0,1 до 0,9 о.е.

Оценка приоритетности ремонта на основе анализа риска. На основании данных ПК «База аварийности в электроэнергетике» за 2011-2018 годы рассчитана интенсивность отказа ЛЭП 110-220 кВ, являющихся объектами диспетчеризации Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ с целью определения вероятности отказа $Q(t)$:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (3)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы ЛЭП; λ – интенсивность отказов ЛЭП, год⁻¹; t – рассматриваемый промежуток времени, год.

Также рассчитан относительный риск отказа ЛЭП $R_{омн}$:

$$R_{омн} = Q Y_{омн} = (1 - e^{-\lambda t}) Y_{омн}. \quad (4)$$

С увеличением затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) снижается интенсивность отказов ЭО, а значит, снижается и вероятность отказа ЭО, снижается и риск отказа. При этом затраты на ТО и Р должны быть рациональными. Это значит, что они не могут превышать стоимость ущерба. Более того, сумма затрат и ущерба, которая исчисляется в рублях, имеет ярко выраженный минимум [6, 13] (рис. 1), а это значит, что для нахождения оптимальной суммы вложений нужно определить минимум функции:

$$R_3 + 3 = \frac{R}{3^\alpha} + 3, \quad (5)$$

где R – риск отказа ЭО (ЛЭП) без учета затрат на ТО и Р; R_3 – риск отказа ЭО (ЛЭП) с учетом затрат на ТО и Р; 3 – затраты на ТО и Р, руб.; α – чувствительность изменения вероятности отказа к увеличению затрат на ТО и Р. Для определения оптимального соотношения распределения средств на ТО и Р между ЛЭП с учетом нахождения минимума функции суммы затрат и риска (рис. 1) необходимо для каждой из них решить следующую задачу:

$$K_i = \frac{2\alpha_i \sqrt{R_{омн.i}}}{\sum_{i=1}^N 2\alpha_i \sqrt{R_{омн.i}}} = \frac{2\alpha_i \sqrt{Q_i Y_{омн.i}}}{\sum_{i=1}^N 2\alpha_i \sqrt{Q_i Y_{омн.i}}} = \frac{2\alpha_i \sqrt{(1 - e^{-\lambda_i}) Y_{омн.i}}}{\sum_{i=1}^N 2\alpha_i \sqrt{(1 - e^{-\lambda_i}) Y_{омн.i}}}, \quad (6)$$

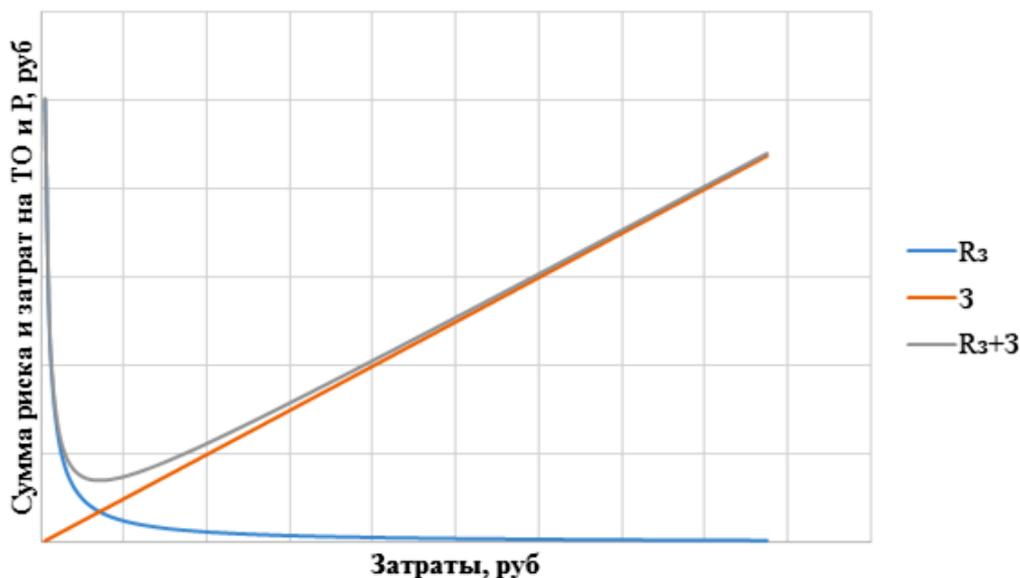


Рис. 1. Зависимость риска от затрат на ТО и Р

где K_i – коэффициент, характеризующий долю затрат от всех затрат на ТО и Р, которую необходимо потратить на конкретную ЛЭП; α_i – чувствительность изменения вероятности отказа к увеличению затрат на ТО и Р для i -й ЛЭП; N – общее количество ЛЭП; Q_i – вероятность отказа i -й ЛЭП; $Y_{отн.i}$ – относительный ущерб от отказа i -й ЛЭП о.е.; λ_i – интенсивность отказа i -й ЛЭП, год⁻¹.

Таким образом, учитывая, при распределении средств на ТО и Р нет необходимости учитывать все составляющие ущерба от отказа ЛЭП в рублях. Достаточно иметь данные об интенсивности отказов для каждой ЛЭП, а также индекс относительного ущерба при отказе ЛЭП.

Введем понятие «индекс приоритетности ремонта ЛЭП I'_{np} , который приравняем к K_i . При планировании ремонтов ЛЭП, а также при рассмотрении заявок на вывод в ремонт ЛЭП указанный индекс позволит оценить эксплуатационное состояние ЛЭП исходя из величины риска ее отказа, а также степени ее ремонтпригодности.

Учет ремонтпригодности ЛЭП. Ремонтпригодность ЛЭП зависит от чувствительности изменения вероятности отказа к увеличению затрат на ТО и Р. При низкой ремонтпригодности, ремонт малоэффективен. Это стоит также учитывать при планировании ремонтов.

Введем понятие «индекс приоритетности ремонта ЛЭП без учета ремонтпригодности» I'_{np} :

$$I'_{np} = \frac{R_{отн.i}}{\sum_{i=1}^N R_{отн.i}}. \quad (7)$$

Для объективной оценки приоритетности вывода в ремонт ЛЭП необходимо учесть чувствительность изменения вероятности отказа к увеличению времени нахождения в ремонте. Иными словами, если при увеличении затрат времени и прочих ресурсов на ремонт ЛЭП интенсивность отказов меняется несущественно, то индекс приоритетности для ЛЭП должен быть снижен. Для планирования ремонтов ЛЭП на уровне Системного оператора чувствительность изменения вероятности отказа к увеличению затрат на ТО и Р необходимо заменить на чувствительность изменения вероятности отказа к увеличению времени нахождения ЛЭП в ремонте α'_i :

$$\alpha'_i = \frac{\partial_{рем.i}}{Q_i} = \frac{t_{рем.i}}{T} \div Q_i = \frac{t_{рем.i}}{T(1-e^{-\lambda_i})}, \quad (8)$$

где $\partial_{рем.i}$ – доля от общего времени нахождения в ремонте ЛЭП, о.е.; $t_{рем.i}$ – общее время нахождения в ремонте ЛЭП за рас-

смагиваемый промежуток времени, час;
 T – промежуток времени, за который проводится анализ, ч.

Тогда индекс приоритетности ремонта будет определяться соотношением

$$I_{np} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt[2\alpha_i]{R_{отн.i}}}{\sum_{i=1}^N \sqrt[2\alpha_i]{Q_i Y_{отн.i}}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt[2\alpha_i]{Q_i Y_{отн.i}}}{\sum_{i=1}^N \sqrt[2\alpha_i]{(1 - e^{-\lambda_i}) Y_{отн.i}}} \quad (9)$$

Для оценки важности учета ремонтнопригодности проведены сравнительные расчеты индекса приоритетности ремонта для ЛЭП, являющихся объектами диспетчеризации Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ, с учетом (9) и без учета ремонтнопригодности (7). Результаты для ЛЭП 110-220 кВ ОЗ Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ с наибольшим индексом приоритетности ремонта с учетом ремонтнопригодности приведены на рис. 2.

На основании проведенного анализа выявлено, что среди ЛЭП с наибольшим уровнем риска отказа не попали в перечень ЛЭП с наиболее высоким уровнем индекса приоритетности ремонта следующие ЛЭП:

- ВЛ 220 кВ, Балаковская АЭС – Ершовская;
- ВЛ 220 кВ, Балаковская АЭС – Горный.

Это указывает на то, что ремонт, проводимый на этих линиях за период с 2011 по 2018 гг. был неэффективным. Это свидетельствует о низком качестве ремонта или о крайне неудовлетворительном состоянии указанных ЛЭП.

На рис. 3. Приведена типичная зависимость интенсивности отказов от времени согласно теории надежности [14]. Как видно из рисунка, выделяют три периода эксплуатации оборудования: 1 – приработка; 2 – нормальная работа; 3 – старение, износ. На основании проведенных расчётов, можно предположить, что ЛЭП с низким уровнем ремонтнопригодности находятся в периоде эксплуатации «старение, износ». Это является основанием для планирования капитального ремонта указанных ЛЭП или планирования их реконструкции.

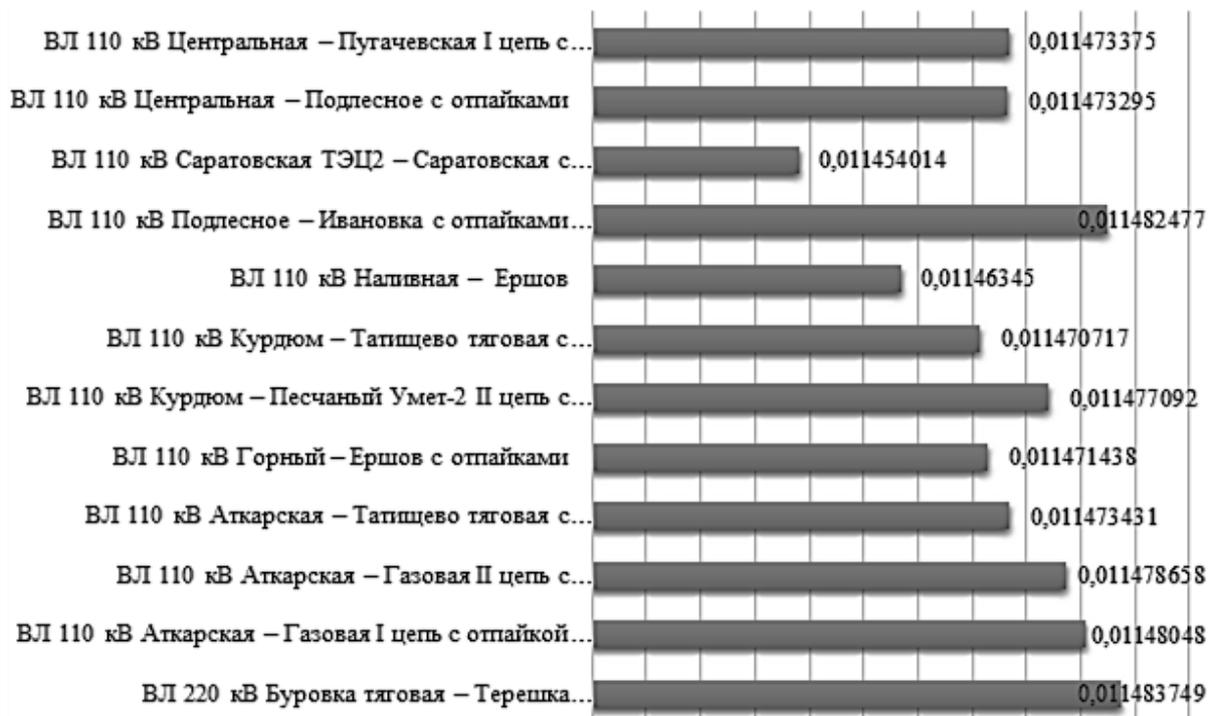


Рис. 2. ЛЭП 110-220 кВ ОЗ Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ с наибольшим индексом приоритетности ремонта

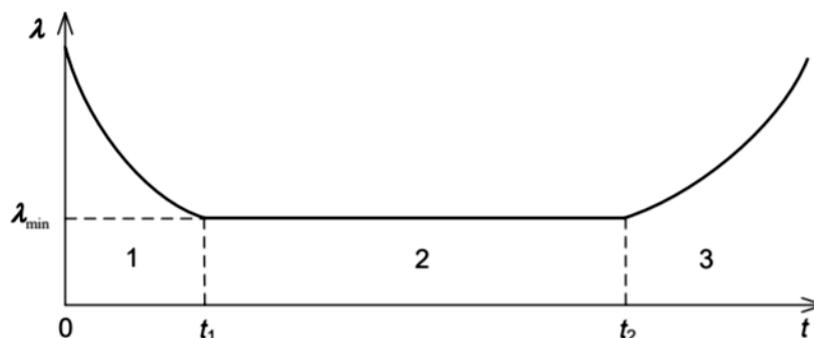


Рис. 3. Интенсивность отказов оборудования в зависимости от времени

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика оценки приоритетности ремонта ЛЭП на основе риск-ориентированного анализа с учетом ремонтпригодности. Выявлено, что ремонтпригодность ЛЭП оказывает влияние на приоритетность ремонта. При незначительном снижении интенсивности отказов ЛЭП вне зависимости от затрат времени и прочих ресурсов на ее ремонт индекс приоритетности для ЛЭП должен быть снижен, поскольку она является неремонтпригодной.

2. Проведен анализ аварийности ЛЭП, являющихся объектами диспетчеризации Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ с целью определения вероятности их отказа.

3. Разработана классификация ЛЭП по степени влияния на допустимые параметры режима энергосистем.

4. Проведен анализ ЛЭП, являющихся объектами диспетчеризации Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ, с целью определения индекса относительного ущерба от их отказа на основе разработанной классификации.

5. Проведен анализ ремонтов ЛЭП в энергосистеме Саратовской области с целью определения чувствительности изменения вероятности отказа к увеличению времени нахождения ЛЭП в ремонте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2003. № 13. Ст. 1177.

2. Российская Федерация. Правительство. Правила оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике: постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 854.

3. Российская Федерация. Правительство. Правила вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации: постановление Правительства РФ от 26 июля 2007 г. № 484.

4. Политика управления рисками ОАО «Россети» / ОАО «Россети». М., 2014. 10 с.

5. ГОСТ Р 51901.21-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.

6. Павлов В.В. Анализ рисков и оптимизация затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования с использованием методик RBI и RCM / В.В. Павлов, А.Б. Самохвалов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 2. С. 48-51.

7. Khan F. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance inspection scheduling and planning / F. Khan, M. Haddara // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2003. Vol. 16. – № 6. P. 561-573.

8. Борисов Ю.С. Организация ремонта и технического обслуживания / Ю.С. Борисов. М.: Машиностроение, 1978. 360 с.

9. ГОСТ Р 55234.3-2013. Практические аспекты менеджмента риска. Процедуры проверки и технического обслуживания

оборудования на основе риска. М.: Стандартинформ, 2014. 51 с.

10. Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок: Методические указания по устойчивости энергосистем, утвержденные приказом Минэнерго РФ от 03.08.2018. № 630.

11. ГОСТ Р 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автома-

тика энергосистем. Нормы и требования, утвержденный приказом Росстандарта от 15.11.2012.

12. Правила устройства электроустановок / Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. 610 с.

13. **Лапшина К.Н.** Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных промышленных объектов / К.Н. Лапшина, К.А. Скляр, А.А. Чухлебов // Инженерные системы и сооружения. 2013. № 4 (13). С. 33-42.

14. **Endrenyi J.** Reliability modeling in electric power systems. P. imprenta: Chichester. 1980. 338 p.

Глухов Дмитрий Александрович – ведущий специалист отдела устойчивости и противоаварийной автоматики службы электрических режимов Филиала АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» «Камышинского технологического института» Волгоградского государственного технического университета

Dmitry A. Glukhov – Head Specialist of Anti-Accidental Stability and Emergency Automatics Department, Electricity Services, AO United Power System, Saratov branch

Gennady G. Ugarov – Dr. Sc., Professor Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

УДК 621.314

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ СЕЛЬСКИХ РАЙОНОВ

И.И. Артюхов, Г.Н. Тулепова, С.В. Молот

CHARACTERISTICS OF THE SOLAR-DIESEL HYBRID SYSTEMS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF REMOTE RURAL AREAS

I.I. Artyukhov, G.N. Tulepova, S.V. Molot

Одной из наиболее актуальных проблем электроэнергетики является электроснабжение объектов, находящихся на зна-

One of the most pressing problems in the power industry is the power supply of consumers residing at a considerable distance

чительном удалении от централизованных электрических сетей. Эта проблема решается, главным образом, за счет применения дизель-генераторов. Однако значительный расход дизельного топлива, необходимость его доставки сложными транспортными схемами в тяжелых метеорологических условиях резко увеличивают себестоимость электроэнергии. При этом качество электроэнергии, вырабатываемой дизель-генераторами, во многих случаях не соответствует требованиям нормативных документов, что приводит к нарушению работоспособности электрооборудования, снижает срок его службы, вносит дополнительный дискомфорт в тяжелые условия жизни на удаленных поселениях.

Современные тенденции построения систем электроснабжения удаленных районов предусматривают интенсивное использование возобновляемых источников энергии. При этом из-за множества факторов географического, климатического, этнического характера возникает большое количество вариантов реализации проекта гибридного электроснабжения. В статье анализируется опыт создания и внедрения гибридных комплексов различного назначения. Предлагается вариант построения гибридного солнечно-дизельного комплекса, который может быть применен для автономного электроснабжения удаленного сельского поселения, в составе которого имеются не только жилые постройки, но и некоторая производственная база.

Ключевые слова: гибридная система электроснабжения, дизель-генератор, солнечные панели, качество электроэнергии.

В настоящее время имеется большое количество объектов, не подключенных к централизованным сетям. Эта ситуация характерна для России, Казахстана, многих других стран Азии, Африки и Латинской Америки. Электроснабжение таких объектов представляет собой сложную задачу, решение которой требует значительных материальных затрат. В большинстве случаев электроснабжение удаленных объектов осуществляется на базе дизель-

from the centralized electrical networks. This problem is commonly solved through application of diesel generators. However, these generators are characterized for large fuel consumption, and with poor transportation system under severe meteorological conditions the price for electricity grows up significantly. At the same time, the quality of power produced by diesel generators, in the majority of cases does not meet the requirements of regulatory documents, which leads to disruption of electrical equipment, reduces its service life, introduces additional discomfort into tough living conditions in the out settlements.

The current trends in the construction of power supply systems in the remote areas provide for an intensive use of renewable energy sources. At the same time, due to multitude geographical, climatic, and ethnic factors, a large number of options for implementation of a hybrid power supply system arise. The article analyzes the experience in creating and implementing hybrid plants for various purposes. Additionally, the article proposes a variant of a hybrid solar-diesel plant for autonomous power supply of remote rural settlements including not only residential buildings but also some production facilities.

Keywords: hybrid power system, diesel generator, solar panels, voltage quality

генераторов. Благодаря большому спросу на дизель-генераторы (ДГ), предприятиями различных стран выпускается широкая гамма этих источников энергии, достигнут высокий уровень надежности и автоматизации дизель-генераторов. Однако остается самый главный недостаток – высокий расход дизельного топлива, которое необходимо доставлять в удаленные районы. При этом доставка топлива в удаленные районы зачастую зависит от погодных

условий, от времени года, поэтому не всегда возможна, что является одной из главных причин снижения надежности электроснабжения [1].

Для различных типов ДГ удельный расход топлива в номинальном режиме согласно паспортным характеристикам составляет 210-280 г/кВт·ч и с уменьшением нагрузки дизель-генератора имеет тенденцию к возрастанию. Кроме того, на расход топлива влияют техническое состояние двигателя, качество топлива и высота местности над уровнем моря. Немаловажной проблемой электроснабжения от ДГ является низкое качество электроэнергии. Эта проблема приобретает особую остроту в тех случаях, когда суммарная мощность электроприемников становится соизмеримой с мощностью ДГ, в результате чего сбросы / набросы нагрузки сопровождаются колебаниями напряжения, наличие однофазных электроприемников приводит к несимметрии напряжений, а большое количество электроприемников, потребляющих несинусоидальный ток, существенно искажает форму сетевого напряжения.

Проблемой электроснабжения удаленных районов, обусловленной высоким расходом дизельного топлива, активно занимаются многие исследователи. В качестве альтернативы ДГ предлагается использовать устройства, использующие возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнце, ветер и т.д. Однако результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что разработка и внедрение систем электроснабжения (СЭС) на основе ветрогенераторов и солнечных панелей не всегда приводит к быстрому достижению желаемого эффекта. Это объясняется высокой стоимостью фотоэлектрических и электромеханических преобразователей, накопителей энергии, в частности, литиево-ионных батарей, устройств силовой электроники, контроллеров и других элементов. В этой ситуации оптимальное решение состоит в использовании гибридных комплексов, в которых ДГ используются в сочетании с системой генерирования электроэнергии на основе ВИЭ [2].

При разработке и конструировании СЭС с использованием ВИЭ трудно учесть и спрогнозировать фактические климатические условия. Графики нагрузки электроприемников также являются стохастическими величинами. Каждый конкретный случай создания гибридной СЭС имеет свою специфику. Если в регионе имеется большой потенциал ветровой энергии, то гибридные СЭС строятся на базе ветродизельных установок. В географических зонах с высоким уровнем солнечной радиации и с большими перепадами скоростей ветра целесообразно применять солнечно-дизельные комплексы. Такая ситуация характерна, например, для приграничных регионов России и Казахстана.

В условиях больших территорий и малой плотности населения использование гибридных технологий позволяет решить задачу электрификации объектов, расположенных в сельской местности, которые находятся на значительном удалении от централизованной сети и подключение к ней является экономически невыгодным. В большинстве случаев такие объекты включают следующие типы потребителей:

- отдельно стоящие дома;
- оборудование и объекты общего использования (например, уличное освещение, школы, поликлиники и центры социальной защиты, культовые объекты, административные здания и т.д.);
- объекты предпринимательской деятельности (например, фермерские хозяйства, мастерские, небольшие производства, объекты торговли и т.д.);
- специфические установки (например, общественные насосные станции, центры зарядки аккумуляторов).

Исследования по гибридным СЭС, объединяющим ВИЭ и ДГ, начались более 30 лет назад, но лишь немногие результаты о внедрении систем и анализе экспериментальных данных были опубликованы. Первые работы, описывающие гибридные системы с ВИЭ, появились в середине 1980-х годов [3], но литература о гибридных системах не была широко представлена до начала 1990-х годов. Всплеск публикационной ак-

тивности по гибридным СЭС был обусловлен необходимостью решения задач по повышению устойчивости и надежности сетей, поскольку к небольшим автономным сетям на основе ДГ подключались источники, использующие энергию ветра [4].

В конце 1990-х годов публикуются работы, в которых производится анализ подключенных к сети фотоэлектрических систем, а также гибридных солнечно-дизельных комплексов [5, 6]. Появляется много статей, которые посвящены оптимизации гибридных систем. В [7] проводится оптимизация гибридной системы, включая не только солнечные панели и комплект ДГ, но также батареи, зарядное устройство, ветрогенератор и инвертор. В работе [8] изучена экономическая целесообразность замены стационарных дизельных установок в сельской Бразилии на гибридные солнечно-дизельные установки с накопителем энергии в виде аккумуляторов. Было установлено, что модернизация СЭС является экономически целесообразной для небольших (мощностью до 50 кВт) дизельных систем. В работе [9] построена модель экономии средств на преобразование СЭС паром с применением дизель-генератора в гибридную солнечно-дизельную систему. В работе [10] предложен метод моделирования, с помощью которого предсказана себестоимость гипотетической автономной системы на основе дизель-генератора, ветрогенератора и солнечных панелей. Показано, что сочетание ВИЭ и ДЭС значительно

снизит эксплуатационные расходы на производство электроэнергии.

Необходимо отметить работы, авторы которых использовали экспериментальные данные, подтверждающие выводы о том, что гибридная система может производить электроэнергию дешевле, чем дизель-генераторы. Интересный результат получен в статье [11], которая посвящена преобразованию СЭС на основе ДГ в гибридную систему (рис. 1). На основе полученных данных было показано, что применение гибридных технологий без накопления энергии может снизить потребление дизельного топлива. Авторы работы отказались от включения аккумуляторных батарей в гибридную систему на том основании, что потери от заряда батарей увеличивают потребление дизельного топлива. При этом допускалось такое ограничение для гибридной СЭС, что общий энергетический вклад солнечной батареи в гибридную систему без хранения энергии не может превышать 10% из-за тенденции солнечных элементов к деградации параметров.

Авторы работы [12] изучили экономическую выгоду (или ее отсутствие) из десяти солнечно-ветро-дизельных гибридных систем, установленных в Таиланде за период с 1990 по 2004 год. На основании экспериментальных данных и моделирования в программе HOMER представлена информация о технико-экономических показателях исследуемых систем.

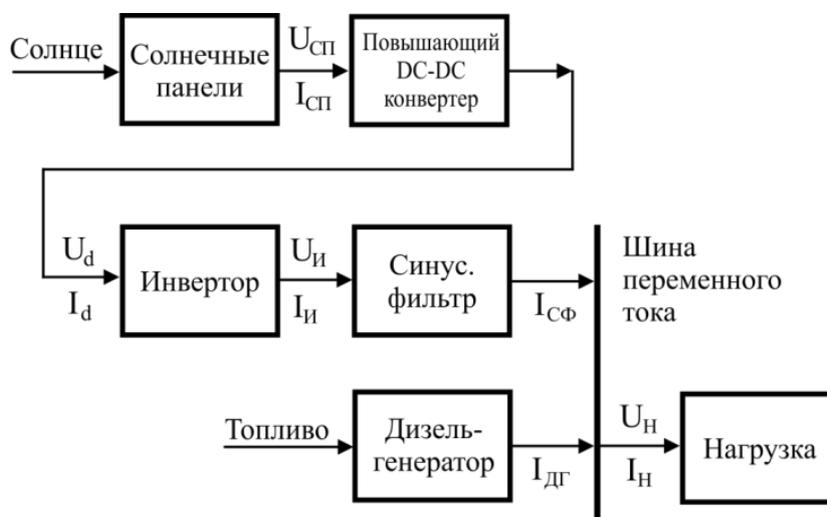


Рис. 1. Структурная схема солнечно-дизельного комплекса без накопителя энергии

При разработке гибридных СЭС выбор оптимальных параметров солнечных панелей, ДГ и аккумулятора является важной проблемой. В [13] на основе разработанной методики моделирования гибридных СЭС показано, что оптимальная конфигурация автономной системы в условиях Индии будет в том случае, если 50% годового спроса на энергию обеспечивает ДГ, а остальные 50% поставляются фотоэлектрической станцией, объединенной с батареей. Минимальная стоимость электроэнергии составляет 13,1 рупий/кВт·ч в предположении, что цена дизельного топлива составляет 60 рупий/л).

Имеются также примеры успешной реализации проектов по электрификации сельских объектов с использованием гибридных технологий [14].

В 2008 году в Танзании была установлена гибридная солнечно-дизельная система. Она включает в себя солнечные панели мощностью 655 Вт и трехфазный ДГ мощностью 12 кВт. Аккумуляторная батарея из пяти свинцово-кислотных аккумуляторов с напряжением 12 В и емкостью 200 А·ч образует накопитель энергии. СЭС имеет контроллер заряда с отслеживанием точки максимальной мощности, двунаправленный инвертор с максимальной мощностью 500 Вт и стабилизатор напряжения.

Система распределения разделена на секции переменного и постоянного тока, обеспечивающие различные нагрузки. Постоянный ток используется ночью для целей освещения, переменный ток – в дневное время. Нагрузка постоянного тока стабильна на уровне около 50 Вт в течение ночи, немногим более является потребление вечером. Таким образом, энергия, используемая в системе постоянного тока, составляет менее 1 кВт·ч в сутки. Нагрузка переменного тока имеет более неустойчивый характер. Она подвержена изменениям как в течение дня, так и изо дня в день и с недели на неделю. В ночное время нет потребности в электроэнергии от сети переменного тока. В рабочее время средняя потребляемая мощность переменного тока составляет около 150 Вт с пиками около 500 Вт. Общее потребление энергии со-

ставляет от 1,5 до 2 кВт·ч в день без учета выходных дней.

Проект гибридной системы на 16 кВт реализован в Мавритании для поселения, которое насчитывает 340 домашних хозяйств. График нагрузки ДГ мощностью 44 кВт имеет типичную форму с пиковой нагрузкой 28 кВт вечером в летний сезон, однако в утренние часы базовая нагрузка значительно ниже (около 9 кВт). По этой причине средний коэффициент загрузки генераторной установки является низким (21%), что приводит к значительному расходу топлива. Гибридная система спроектирована с учетом растущего спроса на электроэнергию (3% в год) и оптимизирована таким образом, чтобы снизить расход топлива. В дополнение к ДГ установлены солнечные панели мощностью 15 кВт, аккумуляторная батарея емкостью 145 кВт·ч и инвертор на 16 кВт. Предварительное моделирование гибридного комплекса показало, что солнечные панели обеспечат около 40% потребностей в энергии, и что ДГ будет использоваться более эффективно (коэффициент загрузки 57% через пять лет).

Гибридная система мощностью 5,2 кВт функционирует в Сенегале. Она осуществляет электроснабжение удаленной деревни, в которой насчитывается 900 жителей. Гибридный комплекс состоит из массива солнечных панелей мощностью 5,2 кВт, ветрогенератора мощностью 5 кВт, аккумуляторной батареи на 120 кВт·ч и дизельной генераторной установки мощностью 6,8 кВт, используемой только в качестве резерва для тех дней, когда солнечная энергия и энергия ветра не заряжают батарею.

Гибридная силовая установка в Мали обеспечивает электроэнергией 217 домашних хозяйств (приблизительно 3000 человек). Мощность массива солнечных панелей составляет 72 кВт. Особенностью этой станции является то, что массив панелей подразделен на два поддиапазона с различными функциями и различными регуляторами. Первая подматрица (34,5 кВт) подключена к шести инверторам SMA Sunny Mini Central. Вторая подматрица поддиапазона 37,5 кВт подключена к блоку аккумуля-

ляторных батарей через контроллер заряда постоянного тока и к набору из девяти двунаправленных инверторов SMA SI 5048, собранных для создания трехфазного питания напряжением 380 В переменного тока.

Аккумуляторная батарея емкостью 1185 кВт·ч была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить электропитание объекта в течение трех дней. Генератор мощностью 140 кВт включается вручную в случае недостаточного производства электроэнергии солнечными панелями и низкого уровня заряда аккумуляторной батареи. Планируется, что ДГ будет использоваться менее 500 часов в год.

Необходимо отметить, что, несмотря на большое количество работ, остаются нерешенными многие проблемы, которые имеют место при создании и эксплуатации солнечно-дизельных комплексов для электроснабжения сельских объектов.

В Российской Федерации с 1 июля 2016 г. введена в действие группа национальных стандартов по возобновляемой энергетике, разработанных на основе комплекса технических действующих спецификаций Международной электротехнической комиссии (МЭК) IEC/TS 62257-2003. Целью этих стандартов является обеспечение различных участников проектов электрификации сельских объектов (децентрализованных потребителей) (эксплуатирующий персонал, поставщики, кураторы проекта, установщики оборудования и др.) документацией по установке работающих на основе возобновляемых источников энергии и гибридных энергетических систем переменного тока номинальным напряжением до 500 В, постоянного тока номинальным напряжением до 750 В и номинальной мощностью до 100 кВА.

Группа стандартов на основе МЭК 62257 содержит рекомендации по выбору необходимой системы в требуемом месте, проектированию и эксплуатации этой системы, поддержанию ее в рабочем состоянии. Требования и нормы, установленные в этих стандартах, не являются исчерпывающими для реализации проектов электрификации сельских объектов (децентрализо-

ванных потребителей) Российской Федерации. Данные стандарты содействуют использованию возобновляемых источников энергии в электрификации сельских районов, и в настоящее время они не содержат требований к разработке экологически чистых технологий (выбросы CO₂, углеродных кредитов и т.д.).

Содержание группы стандартов на основе МЭК 62257 является целостным с разбиением на части, отражающие вопросы безопасности и устойчивого развития систем электроснабжения при минимальной стоимости издержек за срок службы. Одной из основных целей данной группы стандартов является обеспечение необходимых требований в области применения малых электростанций на основе ВИЭ и гибридных автономных СЭС.

Общие положения по вопросам электрификации сельских объектов представлены в ГОСТ Р 56124.1-2014 [15], который распространяется на децентрализованные системы электроснабжения сельских объектов в случаях, если эти потребители электрической энергии имеют небольшую мощность (суммарно до 100 кВА) и/или они находятся на значительном удалении от централизованной (национальной/региональной) электрической сетей, и подключение к ней является экономически невыгодным.

Одним из актуальных вопросов создания автономной СЭС является выбор ее конфигурации. Известен ряд публикаций, принадлежащих, в том числе и авторам настоящей статьи, например, [16-18], в которых при выборе конфигурации гибридной СЭС предпочтение отдается схеме с общей шиной постоянного тока (рис. 2). Однако, как показал анализ большого количества источников информации, применение данной схемы для электроснабжения удаленных сельских объектов без учета особенностей графика электрической нагрузки сопровождается завышением установленной мощности ряда ее компонентов. Это не может не отразиться на величине капитальных затрат на создание СЭС.

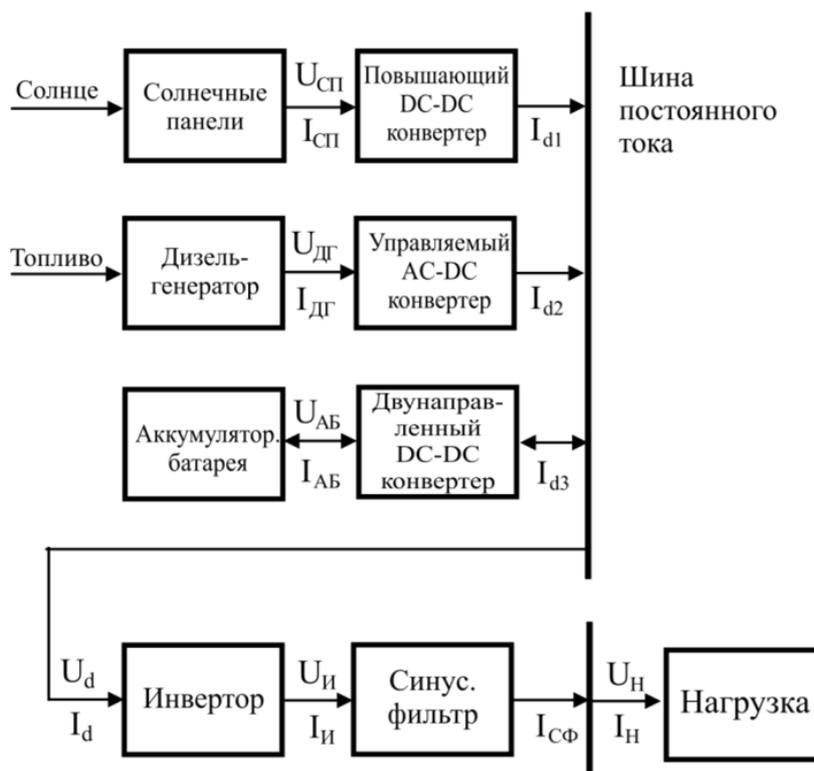


Рис. 2. Структурная схема солнечно-дизельного комплекса с общей шиной постоянного тока

Типичный график электрической нагрузки для села обычно имеет несколько пиков. Самый большой пик – вечерний. Он может быть от двух до пяти раз больше, чем средний суточный уровень, и обусловлен включением осветительных и бытовых приборов. Два других пика (утренний и полуденный) заметно меньше. Спрос на электроэнергию в сельских районах в ночное время довольно ограничен (или не существует в небольших деревнях), и, следовательно, уровень нагрузки в ночное время, как правило, очень низкий по сравнению с вечерними и утренними пиками.

Системы генерации, состоящие только из ДГ, как правило, не запускаются для питания очень низкой нагрузки в течение нескольких часов, потому что в этом случае дизели подвергаются деградации, а очень неэффективное потребление топлива делает такой режим экономически нецелесообразным. По этой причине в небольших деревнях ночью ДГ отключаются.

Существенное различие между утренним и вечерним уровнями спроса способствует использованию двух разных генераторных установок для лучшего

соответствия этим уровням нагрузки. Оснащение гибридного комплекса накопителем энергии, например, в виде аккумуляторных батарей позволяет работать системе на низкую нагрузку в течение многих часов в ночное время и при соответствующем уровне мощности солнечных панелей частично или полностью покрывать нагрузку в утренние и полуденные максимумы. Дизель-генератор используется для покрытия вечернего пика и при необходимости заряжает батарею. Возможны также другие стратегии управления источниками энергии в гибридной системе.

На рис. 3 показана структурная схема солнечно-дизельного комплекса, предназначенного для электроснабжения удаленного сельского поселения, в составе которого входят не только жилые постройки, но и некоторая производственная база. В предлагаемой схеме также имеется звено постоянного тока. Однако через него проходит не весь поток энергии, а только некоторая часть, необходимая для работы бытовой техники и осветительных приборов.

Первичными источниками энергии являются ДГ и солнечные панели. Дизельный

двигатель вращает вал синхронного генератора, который вырабатывает трехфазную систему напряжения промышленной частоты. Основная часть энергии ДГ используется электроприемниками производственных механизмов, меньшая часть преобразуется в энергию постоянного тока с помощью диодного выпрямителя. Выпрямитель подключен к ДГ через фильтр, обеспечивающий электромагнитную совместимость выпрямителя с синхронным генератором. На выходе диодного выпрямителя установлен импульсный понижающий преобразователь

напряжения, который позволяет управлять потоком энергии, подаваемой в звено постоянного тока.

Солнечная батарея вырабатывает электрическую энергию постоянного тока. Батарея имеет нелинейную вольт-амперную характеристику, ход которой зависит от уровня энергетической освещенности и температуры батареи. Для согласования солнечной батареи со звеном постоянного тока в схеме на рис. 3 служит импульсный повышающий преобразователь напряжения, оснащенный емкостным фильтром.

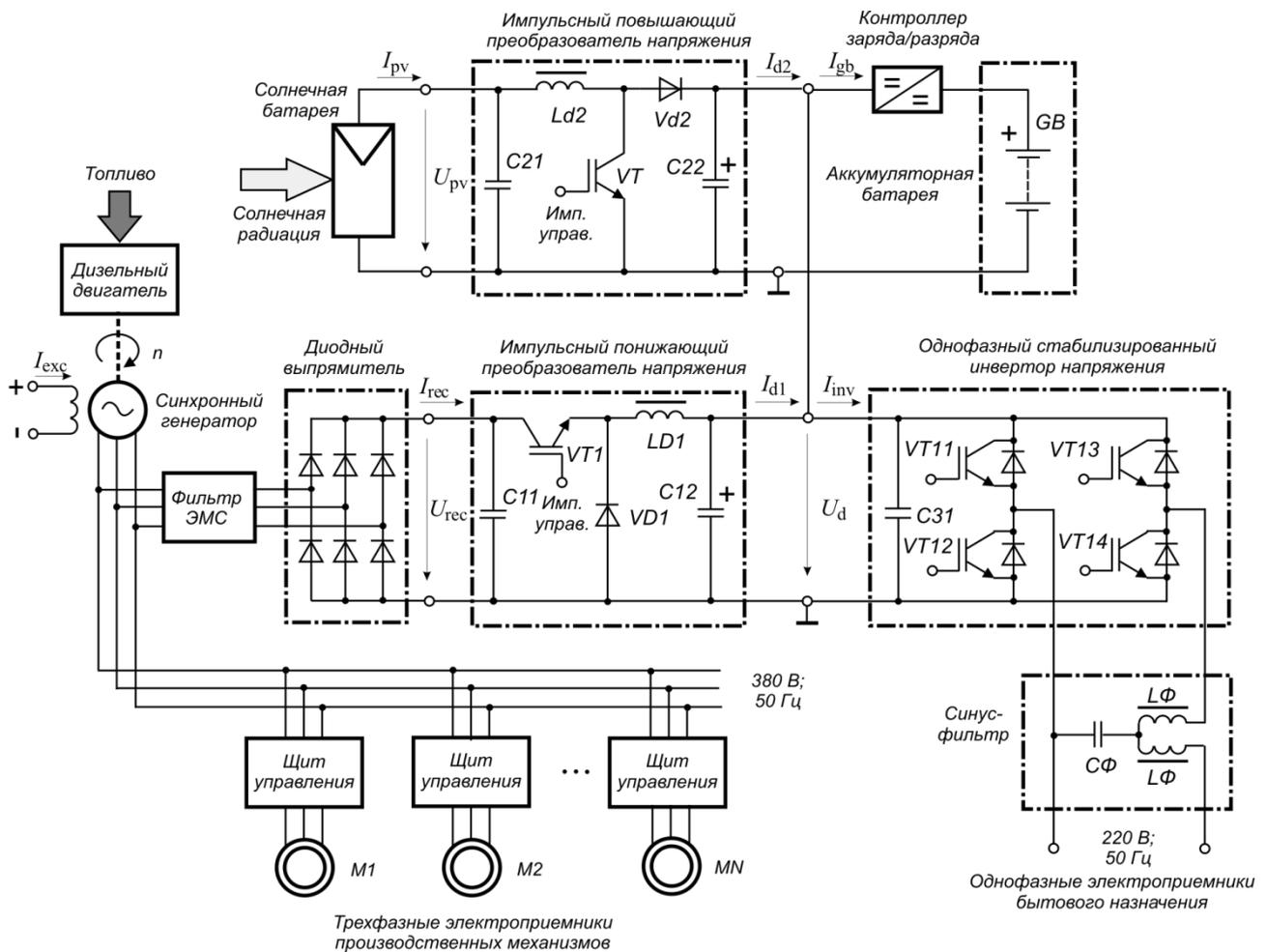


Рис. 3. Структурная схема солнечно-дизельного комплекса

К звену постоянного тока через контроллер заряда / разряда подключена аккумуляторная батарея, которая в зависимости от режима работы СЭС заряжается от напряжения в звене постоянного тока при совместной или отдельной работе дизель-генератора и солнечной батареи

или отдает энергию в звено постоянного тока.

От звена постоянного тока получает питание однофазный стабилизированный инвертор, который формирует однофазное переменное напряжение 220 В/50 Гц. К выходу инвертора через синус-фильтр под-

ключаются однофазные электроприемники бытового назначения.

Для уменьшения установленной мощности оборудования предлагаются следующие рекомендации по его выбору. Мощность фотоэлектрической системы, включающей в себя солнечную батарею, импульсный повышающий преобразователь напряжения и аккумуляторную батарею, должна быть такой, чтобы обеспечивалось круглосуточное электроснабжение бытовых потребителей. В дневное время при благоприятной погоде для электроснабжения бытовых потребителей используется энергия солнечной батареи, избыток которой направляется

для заряда аккумуляторной батареи. В ночное время инвертор берет энергию от аккумуляторной батареи.

ДГ используется, главным образом, для электроснабжения электроприемников производственного назначения, поэтому в ночное время отключается. В тех случаях, когда мощностей солнечной и аккумуляторных батарей окажется недостаточно для электроснабжения бытовых электроприемников, ДГ должен покрывать возникший дефицит мощности с помощью диодного выпрямителя и импульсного понижающего преобразователя напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лукутин Б.В.** Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
2. **Воронин С.М.** Возобновляемые источники энергии в автономных системах энергоснабжения сельских объектов / С.М. Воронин. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2005. 118 с.
3. **Reiniger K.** Optimization of Hybrid Stand-alone Systems / K. Reiniger, T. Schott, A. Zeidler // Proceedings of the European Wind Energy Association Conference and Exhibition (Rome, Italy). 1986. P. 196-210.
4. **Contaxis G.C.** Short-term Scheduling in a Wind Diesel Autonomous Energy System / G.C. Contaxis, J. Kabouris // IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6. P. 1161-1167.
5. **Seeling-Hochmuth G.C.** A Combined Optimization Concept for the Design and Operation Strategy of Hybrid-PV Energy Systems / G.C. Seeling-Hochmuth // Solar Energy 61. 1997. P. 77-87.
6. **Colle S.** Uncertainty in Economical Analysis of Solar Water Heating and Photovoltaic Systems / S. Colle, S.L. Abreu, R. R  ther // Proceedings of the Solar World Congress (Jerusalem, Israel). 1999. P. 1227-1235.
7. **Colle S.** Economic Evaluation and Optimization of Hybrid Diesel / Photovoltaic Systems Integrated to Utility Grids / S. Colle, S.L. Abreu, R. R  ther // Solar Energy 76. 2004. P. 295-299.
8. **Schmid A.L.** Replacing Diesel by Solar in the Amazon: Short-term Economic Feasibility of PV-Diesel Hybrid Systems / A.L. Schmid, C. Augusto, A. Hoffmann // Energy Policy 32. 2004. P. 881-898.
9. Operation Control of Photovoltaic / Diesel Hybrid Generating System Considering Fluctuation of Solar Radiation / J.S. Park, T. Katagi, S. Yamamoto et al. // Solar Energy Materials and Solar Cells 67. 2001. P. 535-542.
10. **Chedid R.** Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems / R. Chedid, S. Rahman // IEEE Transactions on Energy Conversion 12.1997. P. 79-85.
11. **R  ther R.** Hybrid Diesel / Photovoltaic Systems without Storage for Isolated Mini-grids in Northern Brazil / R. R  ther, D.C. Martins, Bazzo // Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Anchorage, USA). 2000. P. 1567-1570.
12. **Phuangpornpitak N.** PV Hybrid Systems for Rural Electrification in Thailand / N. Phuangpornpitak, S. Kumar // Renewable & Sustainable Energy Reviews 11. 2007. P. 1530-1543.
13. **Barade Monika G.** Design and Optimization of Photovoltaic-Diesel Generator-Battery Hybrid System for Off-grid Areas / Monika G.

Barade, Anindita Roy // International Journal of Current Engineering and Technology. MIT College of Engineering. (Pune, India). MECHPGCON 2016, INPRESSCO ICJET Special Issue-5 (June, 2016). P. 344-353.

14. **Léna Grégoire**. Rural electrification with PV hybrid systems. Overview and recommendations for further deployment / Léna Grégoire // IEA PVPS Task 9, Subtask 4, Report IEA-PVPS T9-13:2013. 52 p.

15. ГОСТ Р 56124.1-2014. Возобновляемая энергетика. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации. Рекомендации. Ч. 1. Общее введение для сельской электрификации. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.

16. Гибридная система электроснабжения с объединенным звеном постоянного

тока / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, Е.Т. Ербаев и др. // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3(8). С. 96-100.

17. Autonomous Power Supply System Based on a Diesel Generator and Renewable Energy Sources for Remote Rural Areas / I.I. Artyukhov, S.F. Stepanov, S.V. Molot et al. // Proceedings of the 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (Brno, Czech Republic). 2018. DOI: 10.1109/EPE.2018.8395978.

18. Adaptive Control of Energy Flows in the Hybrid Power Supply System / I.I. Artyukhov, S.F. Stepanov, G.N. Tulepova et al. // Proceedings of the International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2018. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542260.

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

Тулупова Гульсим Нуржановна – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., старший преподаватель кафедры «Энергетика» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана

Молот Светлана Викторовна – ассистент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Gulsim N. Tulepova – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Senior Lecturer, Department of Power Engineering at Zhangir-Khan Western Kazakhstan Agrarian-Technical University

Svetlana V. Molot – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский,
В.А. Колчев, Т.А. Веткасова

DEVELOPMENT OF DC CONVERTERS FOR INTELLIGENT POWER SYSTEMS

E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, Yu.B. Tomashevsky,
V.A. Kolchev, T.A. Vetkasova

Приведена схема и описана теория работы импульсного преобразователя для питания двух независимых или функционально связанных нагрузок, в том числе многоуровневых инверторов в системах электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии. Результаты математического моделирования свидетельствуют об эффективности предложенного принципа построения схем импульсных преобразователей для систем интеллектуальной энергетики.

Ключевые слова: инвертор, выходное напряжение, импульсный преобразователь, математическая модель

Постановка задачи. В настоящее время в силовой электронике актуальной задачей является формирование нескольких уровней постоянного напряжения от одного источника. Эта задача возникает, например, при создании многоуровневых преобразователей с ограниченным числом источников энергии, что характерно для современных систем интеллектуальной энергетики, таких как микрогрид [1]. Речь идет о создании целого класса интерфейсных преобразователей, обеспечивающих взаимодействие источников возобновляемой энергии в архитектурах с общей шиной постоянного напряжения [2], от которой получают питания автономные инверторы напряжения (АИН) для создания сетей переменного тока с заданными параметрами.

The article describes a scheme and a theory of operation of an impulse converter for powering two independent or functionally connected loads, including multilevel inverters in power supply systems based on renewable energy sources. The results of mathematical modeling indicate the effectiveness of the proposed principle of designing the schemes of impulse converters for intelligent energy systems.

Keywords: inverter, output voltage, impulse converter, mathematical model

Известно, что кривая выходного напряжения традиционных схем АИН не удовлетворяет требованиям существующих стандартов. Для улучшения кривой широко применяются многоуровневые инверторы [3], в которых требуемое качество выходного напряжения достигается ценой усложнения их цепей постоянного тока. Они должны обеспечивать несколько стабилизированных напряжений для формирования необходимых уровней его выходной кривой. Каждое из этих напряжений формируется на выходном конденсаторе соответствующего канала звена постоянного тока.

Другой проблемой АИН, помимо формирования кривой напряжения, близкой к синусоидальной, является способность воспринимать реактивную мощность

нагрузки, которая в большинстве случаев носит активно-индуктивный характер.

В многоуровневых инверторах рассматриваемая проблема возврата реактивной мощности усложняется, поскольку вместо конденсаторов фильтра для восприятия обратного потока энергии используются конденсаторы, которые ответственны за качество кривой выходного напряжения инвертора. Таким образом, процесс компенсации реактивной мощности нагрузки инвертора оказывает влияние на процесс формирования выходной кривой. Действительно, реактивная мощность конденсаторов должна соответствовать возвращаемой реактивной мощности нагрузки. При питании нагрузки с высоким коэффициентом мощности величина реактивной мощности конденсаторов определяется в основном требованиями фильтрации. При средних и низких значениях коэффициента мощности нагрузки выходные конденсаторы заряжаются значительным обратным током инвертора, не управляемым транзисторами преобразователя. Это приводит к неконтролируемому увеличению напряжения соответствующего уровня, и, следовательно, к искажению выходной кривой. Этот эффект можно минимизировать увеличением емкости конденсаторов, но это приведет к ухудшению динамических и массогабаритных показателей преобразователя. К тому же, поскольку заранее неизвестно, каков коэффициент мощности нагрузки и как он меняется в процессе работы, то ёмкость конденсаторов формирующих уровни напряжения, должна быть избыточной.

В связи с этим разработана и исследована другая схема звена постоянного тока преобразователей на основе многоуровневых инверторов, эффективно решающих рассматриваемую проблему, является актуальной задачей. В случае использования в качестве первичного источника постоянного тока выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром, емкость которого способна воспринимать реактивную мощность индуктивного характера, очевидным решением проблемы является применение в качестве регулируемого звена реверсивного импуль-

сного преобразователя постоянного напряжения [3]. Это обусловлено как необходимостью восприятия обратного потока электромагнитной энергии, связанного с индуктивной составляющей нагрузки инвертора, так и требованием стабилизации напряжения уровней инвертора. В обоих случаях соответствующие порции электромагнитной энергии возвращаются в емкости LC -фильтра выпрямителя. Такое решение рассмотрено в работе [3].

Метод решения проблемы. В настоящей работе рассматривается альтернативное решение проблемы, основой которого является неререверсивный импульсный преобразователь постоянного напряжения (ИППН). Рассмотрим схему импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИППН) с двумя выходами, показанную на рис. 1. На ней идеальные ключи $K_1 - K_6$ соответствуют полностью управляемым вентилям. Вентили $K_7 - K_{10}$ образуют коммутатор, осуществляющий связь импульсного преобразователя с нагрузкой.

Принцип действия преобразователя. Регулирование и стабилизация выходного напряжения и тока реактора в рассматриваемом ИППН производится на основе широтно-импульсной модуляции. Предполагается, что преобразователь питает два однофазных мостовых инвертора напряжения, нагруженных на активно-индуктивную нагрузку.

Рассмотрим основные возможные состояния, в которых может находиться преобразователь.

В состоянии S_1 (рис. 2) через открытые вентили K_1 и K_2 происходит накопление электромагнитной энергии в индуктивном накопителе L . При этом вентили $K_3 - K_6$ находятся в запорном состоянии, а конденсаторы C_1 и C_2 формируют напряжения u_1 и u_2 на выходе инвертора.

При проводящем состоянии вентиля K_3 и диода D_1 и выключенном состоянии ключей $K_1, K_2, K_4 - K_6$ возникает состояние S_2 (рис. 3), при котором энергия, запасенная ранее в накопителе L , передается в конденсатор C_1 и подключенную к нему нагрузку.

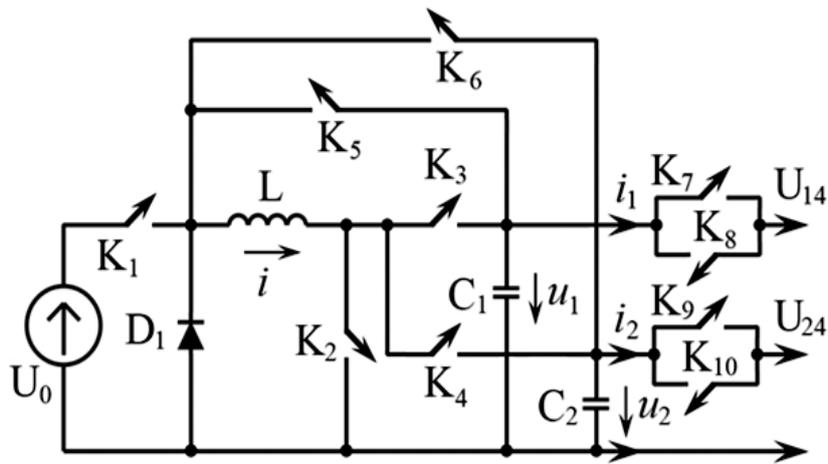


Рис. 1. Импульсный преобразователь постоянного напряжения с двумя выходами

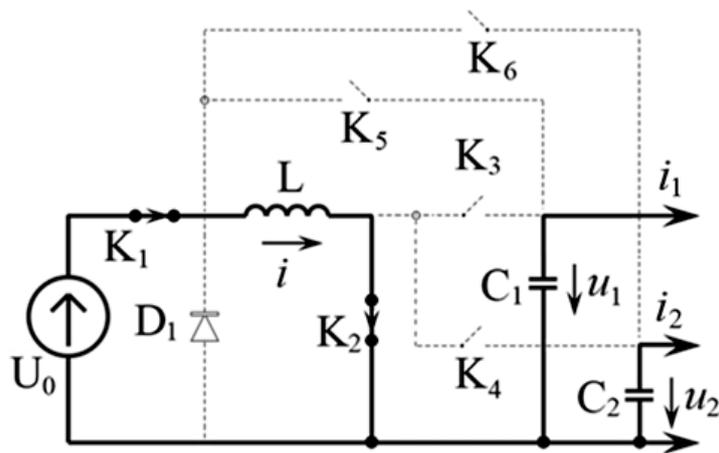


Рис. 2. Состояние S_1

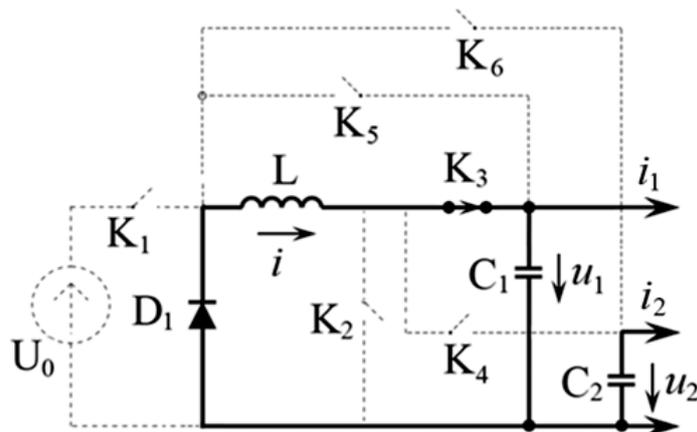


Рис. 3. Состояние S_2

Состояние S_3 (рис. 4) аналогично состоянию S_2 , от которого оно отличается заменой ролей вентилях K_3 и K_4 . При этом энергия накопителя L передается в конденсатор C_2 и подключенную к нему нагрузку.

В проводящем состоянии вентиля K_2 и диода D_1 и выключенном состоянии вентилях K_1 и $K_3 - K_6$ реализуется состояние S_4 (рис. 5), в котором накопитель L изолирован от цепи нагрузки, а энергия,

накопленная в нем, консервируется в контуре, образуемом ключом K_2 и диодом D_1 .

Состояния S_5 и S_6 обеспечивают решение аналогичных задач для стабили-

зации напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 соответственно. Рассмотрим подробно работу схемы в состоянии S_5 (рис. 6).

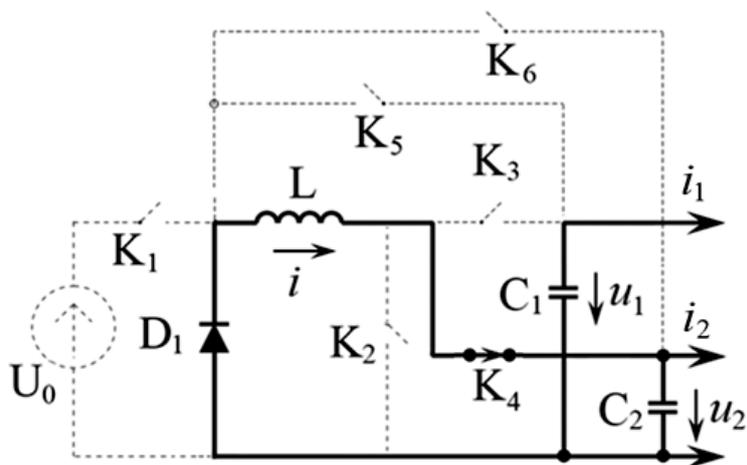


Рис. 4. Состояние S_3

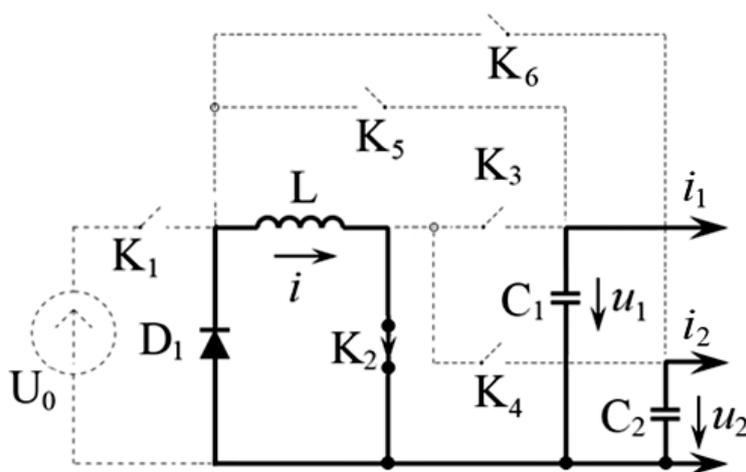


Рис. 5. Состояние S_4

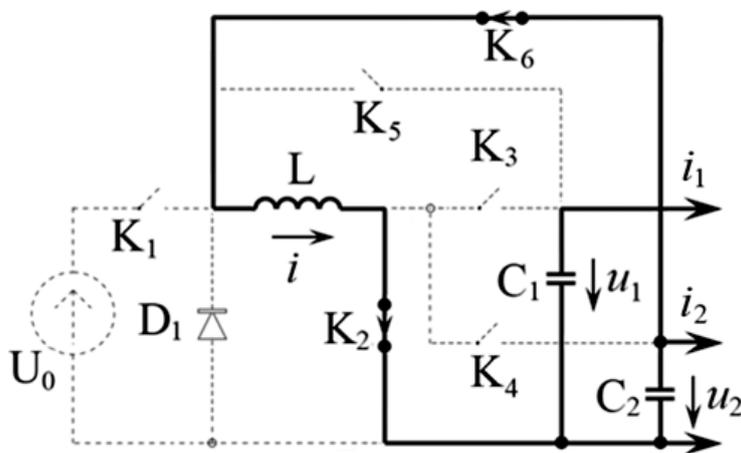


Рис. 6. Состояние S_5

Состояние актуально для двух ситуаций. Первая возникает при возврате реактивной мощности в ИППН от инвертора, питающегося от конденсатора C_1 , через его обратные диоды. Это может приводить к неконтролируемому увеличению напряжения. Однако благодаря конфигурации проводящих вентилях в рассматриваемом состоянии возникает цепь: «+» конденсатора C_1 , открытый ventиль K_5 , индуктивность L , открытый ventиль K_2 , «-» конденсатора C_1 . Ток в этой цепи является током индуктивности, полярность которого способствует разряду

конденсатора C_1 и стабилизации напряжения на нем.

Описание работы преобразователя в состоянии S_6 (рис. 7) аналогично приведенному описанию заменой вентиля K_5 и конденсатора C_1 на ventиль K_6 и конденсатор C_2 .

Существенно, что в состояниях S_5 и S_6 напряжение на индуктивности положительно и, следовательно, ток через нее в этом состоянии нарастает, то есть происходит накопление энергии в магнитном поле катушки, которая в состояниях S_2 и S_3 может быть передана в нагрузку.

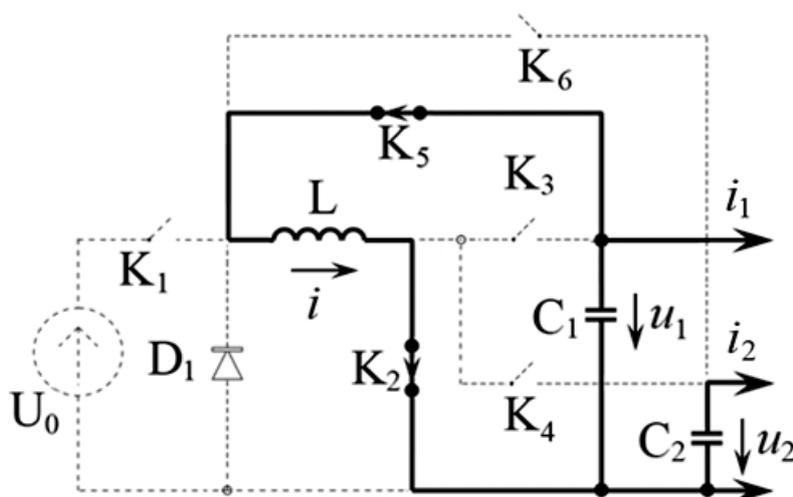


Рис. 7. Состояние S_6

Таким образом, особенность рассматриваемой схемы преобразователя заключается в способе восприятия источниками формирования уровней обратного тока инвертора: накапливается возвращаемая энергия на индуктивном накопителе и в последующем она передается в нагрузку в качестве активной мощности.

Варианты взаимных переходов состояний при коммутации управляемых вентилях иллюстрируются графом рис. 8. На нем символы $K_i \uparrow$ и $K_i \downarrow$, изображенные у дуг графа и означающие включение и выключение i -го ключа, указывают на условия соответствующего перехода.

Центральное положение состояния S_4 указывает на целесообразность его использования как промежуточного при реализации различных режимов работы

преобразователя. Это следует из того, что каждый переход удобно проводить за счет минимального числа коммутаций вентилях. В противном случае из-за различной инерционности процессов коммутации вентилях возможны конфликтные ситуации в порядке переходов и, как следствие, возникновение некорректных, в том числе аварийных состояний. Как следует из рис. 8, в рассматриваемой схеме переходы между состояниями S_1 , S_2 , S_3 , осуществляемые через промежуточное состояние S_4 , как раз возможны через коммутации единственного ключа.

Переходы из состояния S_4 в состояние S_2 , из состояния S_4 в состояние S_3 и соответствующие обратные переходы осуществляются за счет последовательных коммутаций пары вентилях.

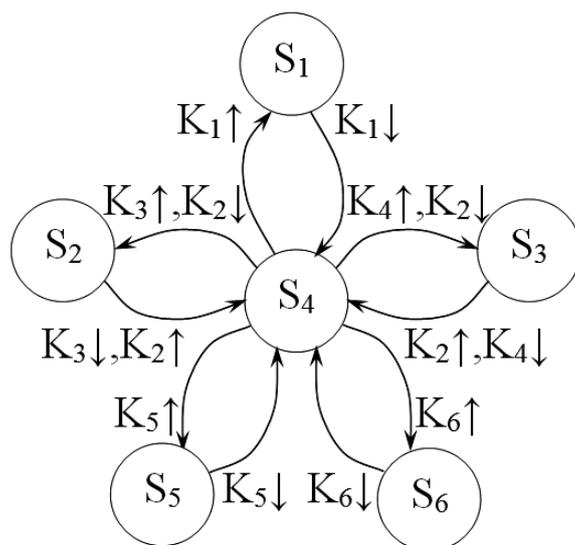


Рис. 8. Граф переходов состояний

Переход из состояния S_4 в состояние S_2 осуществляется следующим образом. Непосредственно перед коммутацией на управляющий электрод вентиля, соответствующего ключу K_3 , подается отпирающий сигнал. При этом ключ K_3 остается в запертом состоянии, поскольку на него подается запирающее напряжение конденсатора C_1 через проводящий ключ K_2 . Переход происходит в состояние S_2 в момент снятия с управляющего электрода ключа K_2 отпирающего сигнала. В результате возникающая при этом ЭДС самоиндукции в накопителе L переводит ключ K_3 , открытый по управляющему электроду, в проводящее состояние.

Обратный переход из состояния S_2 в состояние S_4 осуществляется подачей на управляющий электрод вентиля K_2 отпирающего сигнала. Это вызывает запираание вентиля K_3 , поскольку на него подается запирающее напряжение конденсатора C_1 через проводящий вентиль K_2 . После этого необходимо снять с управляющего электрода вентиля K_3 отпирающий сигнал.

Аналогично реализуются переход из состояния S_4 в состояние S_3 и обратный ему переход.

Режимы работы преобразователя при питании автономных инверторов. Рассматриваемый ИППН предназначен для создания стабилизированного постоянного напряжения питания инвертора напряжения при резистивно-индуктивной нагрузке.

В случае многоуровневого инвертора имеется в виду стабилизация уровней выходной кривой инвертора.

Стабилизация напряжения осуществляется с некоторой допустимой погрешностью. В частности, допустимая величина погрешности стабилизации напряжения Δu может быть принята равной $\pm 3\%$ от номинального значения U_n .

Поскольку рассматриваемый здесь в качестве нагрузки ИППН инвертор имеет активно-индуктивную нагрузку, то далее рассматриваются два основных режима. При $i_1 > 0$ ($i_2 > 0$) реализуется режим передачи активной мощности в цепь нагрузки, а при $i_1 < 0$ ($i_2 < 0$) – режим восприятия реактивной мощности нагрузки инвертора.

Рассматриваемый ниже принцип стабилизации основывается на представлении индуктивного накопителя L с запасенной в нем электромагнитной энергией как источника тока, подключаемого в дозированные промежутки времени попеременно к конденсаторам C_1 и C_2 таким образом, чтобы компенсировать изменения напряжения на нем, вызванные током инвертора. Поэтому в рассматриваемой схеме ИППН необходимо обеспечить такую величину тока реактора, чтобы было возможным стабилизировать напряжения на выходном конденсаторе как в режиме передачи активной мощности инвертора, так и при восприятии реактивной мощности, возвра-

щаемой через его обратные диоды. Этого можно добиться путем стабилизации тока индуктивного накопителя на уровне ожидаемых максимальных значений входных токов инверторов i_1 и i_2 . Соответствующее стабилизируемое значение тока индуктивности обозначается ниже как I_m . Это значение тока целесообразно стабилизировать также с $\pm 3\%$ точностью.

С учетом сказанного можно предложить релейный алгоритм стабилизации напряжений на выходе импульсного преобразователя и тока индуктивного накопителя, схематично представленный на рис. 9.

Согласно этому алгоритму система управления преобразователем обеспечивает

на каждом периоде работы ИППН коммутации управляемых вентиляей, необходимых для реализации переходов состояний, соответствующих дугам графа. Дуги снабжены условиями осуществления перехода Q_{ij} , где первый индекс указывает на исходное состояние, а второй - на результирующее состояние перехода.

Состояния S_4^* по конфигурации совпадают с состоянием S_4 , однако являются промежуточными для обеспечения переходов $S_1 \rightarrow S_2$, $S_1 \rightarrow S_5$, $S_1 \rightarrow S_3$, $S_1 \rightarrow S_6$. Длительность нахождения преобразователя в этих состояниях определяется необходимым временем осуществления соответствующих коммутаций.

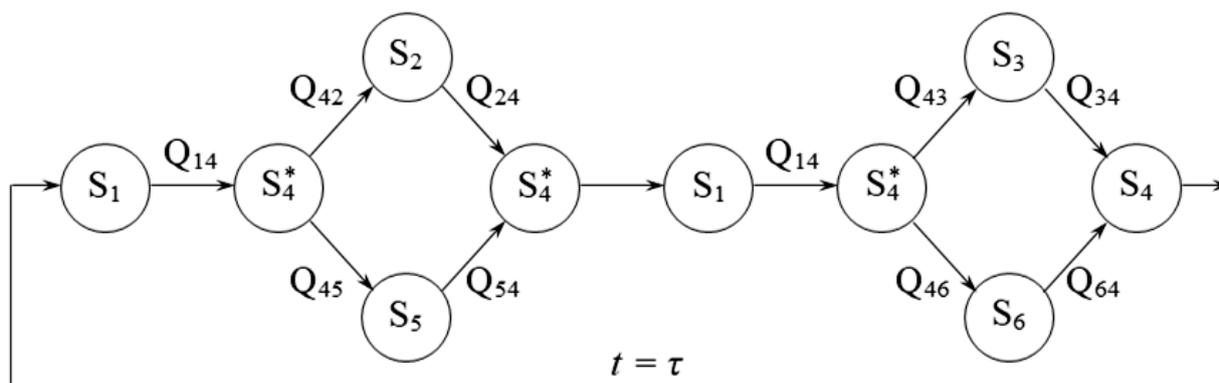


Рис. 9. Релейный алгоритм стабилизации напряжений на выходе импульсного преобразователя и тока индуктивного накопителя

В начале каждого периода ИППН находится в состоянии S_1 , в конце – в состоянии S_4 . Возвращение в исходное состояние происходит при выполнении условия $t = \tau$, где τ – период работы ИППН, t – время, отсчитываемое от начала периода.

Условие Q_{14} состоит в выполнении неравенства $i > 0,93 I_m$, что обеспечивает возможность стабилизации напряжения на конденсаторах в состояниях S_2 и S_5 .

Условие Q_{42} состоит в выполнении условия $i_1 \geq 0$, что требует перехода в состояние S_2 для стабилизации напряжения u_1 в режиме передачи энергии, накопленной в конденсаторе C_1 , в нагрузку.

Условие Q_{24} состоит в выполнении неравенства $u_1 > 0,97 U_n$, то есть в достижении требуемой точности стабилизации в

режиме потребления энергии нагрузкой от конденсатора C_1 .

Условие Q_{54} состоит в выполнении неравенства $u_1 < 1,03 U_n$, то есть в достижении требуемой точности стабилизации в режиме восприятия энергии, возвращаемой нагрузкой конденсатору C_1 .

Условие Q_{45} состоит в выполнении неравенства $i_1 < 0$, что требует перехода в состояние S_5 для стабилизации напряжения u_1 в режиме восприятия энергии, возвращаемой нагрузкой, конденсатором C_1 .

Аналогично условие Q_{43} состоит в выполнении условия $i_2 \geq 0$, что требует перехода в состояние S_3 для стабилизации напряжения u_2 в режиме передачи энергии, накопленной в конденсаторе C_2 , в нагрузку.

Условие Q_{46} состоит в выполнении неравенства $i_2 < 0$, что требует перехода в состояние S_6 для стабилизации напряжения u_2 в режиме восприятия энергии, возвращаемой нагрузкой, конденсатором C_2 .

Условие Q_{34} состоит в выполнении неравенства $u_2 > 0,97 U_n$, то есть в достижении требуемой точности стабилизации в режиме потребления энергии нагрузкой от конденсатора C_2 .

Условие Q_{64} состоит в выполнении неравенства $u_2 < 1,03 U_n$, то есть в достижении требуемой точности стабилизации в режиме восприятия энергии, возвращаемой нагрузкой конденсатору C_2 .

Моделирование процессов в преобразователях. Для иллюстрации изложен-

ной теории построена и исследована математическая модель описанного импульсного преобразователя, питающего инверторы напряжения с активно-индуктивной нагрузкой. Приведем описание модели.

Для обеспечения стабилизации напряжений и токов достаточного качества частота работы импульсного преобразователя должна значительно превышать частоту инверторов. Ниже при моделировании рассматриваются примеры, в которых частота ИППН превышает частоту инвертирования в 10 и 20 раз.

Система дифференциальных уравнений, описывающая работу преобразователя при работе по приведенному выше алгоритму, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= (F_1 \cdot U_0 - (F_2 - F_5) \cdot u_1 - (F_3 - F_6) \cdot u_2 - R_0 \cdot i) / L, \\ \frac{du_1}{dt} &= ((F_2 - F_5) \cdot i - i_1) / C_1, \\ \frac{du_2}{dt} &= ((F_3 - F_6) \cdot i - i_2) / C_2, \\ \frac{di_1}{dt} &= (u - R_1 \cdot i_1) / L_1, \\ \frac{di_2}{dt} &= (u - R_2 \cdot i_2) / L_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $U_0, i, u_1, u_2, i_1, i_2$ – введенные ранее обозначения для напряжения питания преобразователя, мгновенных значений тока индуктивного накопителя L , напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 и входных токов инверторов, L_1 и L_2 – параметры активно-индуктивной нагрузки соответствующих инверторов. Коэффициенты F_i ($i = 1, 2, 3$) являются характеристическими функциями состояния ИППН, равные 1 в состоянии S_i и 0 в других состояниях.

Входные токи инверторов i_1 и i_2 являются разрывными в моменты коммутации вентилей соответствующего инвертора. С учетом известной связи этих токов с непрерывными токами их нагрузок [5] в моменты коммутаций их вентилей следует выполнять преобразования

$$i_1^n(0) = -i_1^{n-1}(\tau_1), \quad i_2^m(0) = -i_2^{m-1}(\tau_2). \quad (2)$$

Здесь τ_1 и τ_2 – длительности полупериодов работы инвертора, значения слева есть значения токов i_1 и i_2 в начале следующего полупериода, справа значения этих токов в начале в конце предыдущего полупериодов соответствующих инверторов.

Результаты математического моделирования импульсного преобразователя как источника питания двух однофазных автономных инверторов напряжения приведены на рис. 10 а, б. Моделирование проводилось путем численного решения приведенной выше системы уравнений с учетом управления функциями F_i согласно алгоритму рис. 9.

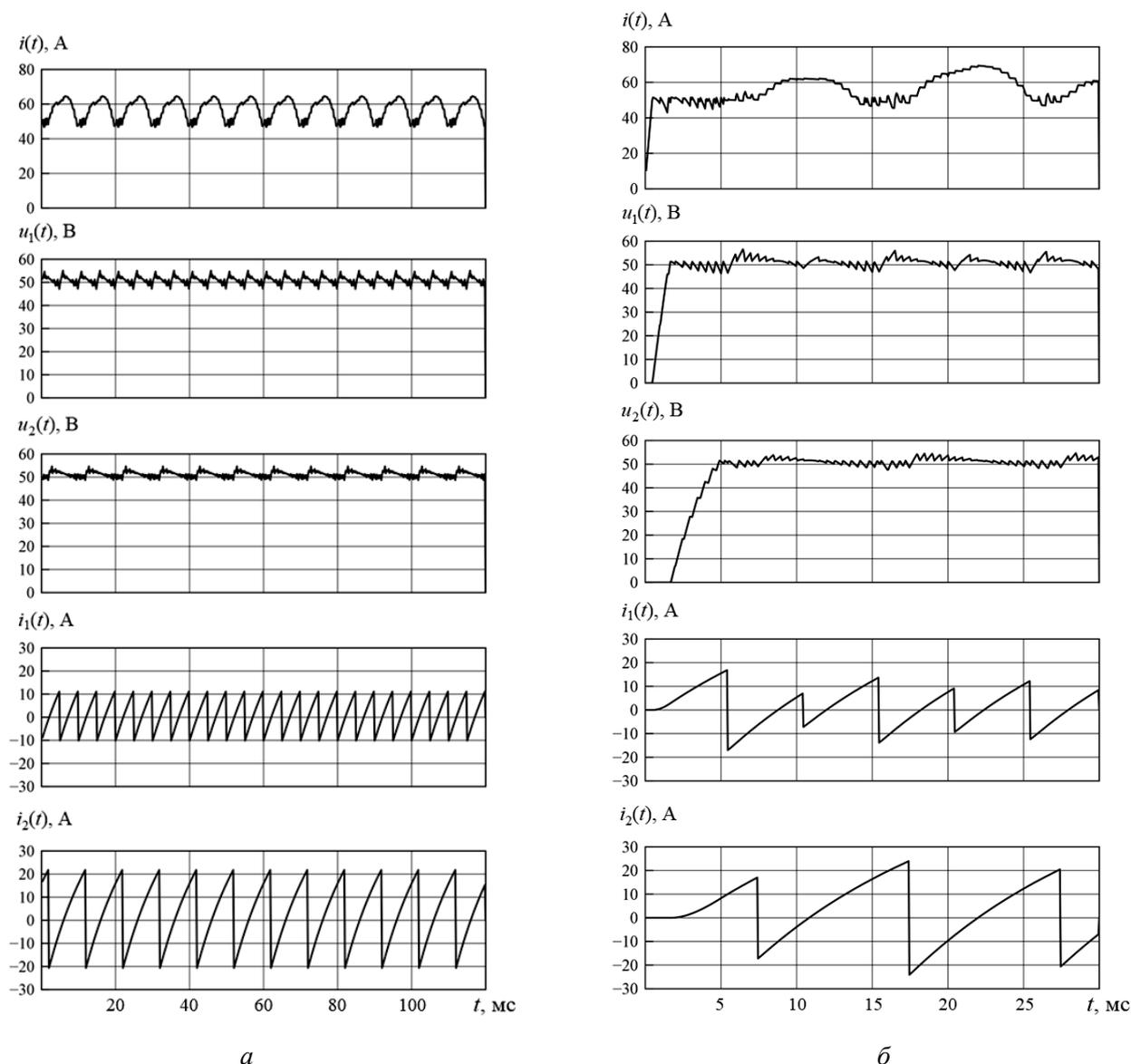


Рис. 10. Результаты математического моделирования импульсного преобразователя, питающего два однофазные автономные инверторы напряжения:
 а – установившийся процесс, б – переходный процесс при пуске преобразователей

Инверторы, получающие питание от импульсного преобразователя, в системе уравнений представлены двумя последними уравнениями, дополненными преобразованиями (2).

Параметры модели импульсного преобразователя: частота работы ИППН $f = 2$ кГц, индуктивность накопителя $L = 200$ мкГн, активное сопротивление накопителя $R_0 = 0.02$ Ом, емкости конденсаторов $C_1 = 100$ мкФ, $C_2 = 100$ мкФ. Частота инвертора 1 равна $f_1 = 100$ Гц, частота инвертора 2 $f_2 = 50$ Гц. Параметры нагрузок инверторов: $z_1 = z_2 = 1$ Ом, $\cos(\varphi_1) = \cos(\varphi_2) = 0,7$.

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. Приведена схема и описана теория работы импульсного преобразователя для питания двух независимых или функционально связанных динамических нагрузок.
2. Показана принципиальная возможность наращивания количества нагрузок, ограниченного частотными свойствами применяемых управляемых вентиляей.
3. Проведенное математическое моделирование свидетельствует о работоспособности и эффективности предложенного принципа построения схем импульсных преобразователей для систем интеллектуальной энергетики.

1. Control in Power Electronics: selected problems / M.P. Kazmierkowski (ed.), R. Krishnan (ed.), F. Blaabjerg (ed.). San Diego: Academic Press. Academic Press Series in Engineering, 2002. 528 p.

2. **Голембиовский Ю.М.** Особенности реализации микрогрид на постоянном токе / Ю.М. Голембиовский, Д.Ю. Луков, Ю.Б. Томашевский // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2018. С. 310-316.

3. **Белов Г.А.** Теория импульсных преобразователей / Г.А. Белов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. 330 с.

4. Универсальный источник питания однофазного инвертора с многоуровневой кривой выходного напряжения / Е.Е. Миргородская, В.А. Колчев, Н.А. Калистратов, Н.П. Митяшин // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017): сб. тр. V Междунар. юбил. науч. конф. СГТУ, 2017. С. 168-172.

5. Использование структурной симметрии вентильного преобразователя при его моделировании / Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Э.К. Нугаев, А.А. Щербаков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф.: Псков: ПГПИ, 2009. Т. 8. С. 234-236.

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук доцент, доцент кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук профессор, профессор кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А

Томашевский Юрий Болеславович – доктор технических наук профессор, профессор кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Колчев Вадим Александрович – аспирант кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А

Веткасова Татьяна Александровна – аспирант кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina E. Mirgorodskaya – PhD, Associate Professor, Department of Electronic Devices and System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikita P. Mityashin – Dr. Sc., Professor, Department of Electronic Devices and System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri B. Tomashevsky – Dr. Sc., Professor, Department of Electronic Devices and System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim A. Kolchev – Postgraduate, Department of Electronic Devices and System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tatyana A. Vetkasova – Postgraduate, Department of Electronic Devices and System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.8

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ НИТЕЙ

Ю.А. Кадыкова, С.Г. Калганова, С.В. Арзамасцев,
Е.Ю. Васинкина, В.С. Алексеев

ELECTROPHYSICAL MODIFICATION OF BASALT THREADS

Yu.A. Kadykova, S.G. Kalganova, S.V. Arzamastsev,
E.Yu. Vasinkina, V.S. Alekseev

Выявлено влияние электрофизических методов активации поверхности базальтовых нитей разных производителей. Доказано, что физико-химические и механические характеристики базальтопластиков зависят от количества наносимого на нить замасливателя и от его состава (олеофильный или олеофобный), что следует учитывать при формировании полимерматричных композитов с требуемыми показателями.

Ключевые слова: базальтовые нити, фенолформальдегидный олигомер, смесь мономеров, модификация нитей, СВЧ обработка, обработка лазером

Среди современных материалов, наиболее полно отвечающих инновационному этапу развития современной экономики, важное значение имеют полимерматричные композиты конструкционного назначения, в том числе армированные полимерные материалы, применение которых дает существенные преимущества по сравнению с традиционными материалами по технологичности, улучшению их эксплуатационных характеристик, повышению надежности, снижению материалоемкости и стоимости изделий. В настоящее время для повышения перспективности и конкурентоспособности данного класса композиционных материалов

The influence of electrophysical methods of activating the surfaces of basalt threads manufactures by different producers is revealed. It is proved that the physical and chemical, as well as mechanical characteristics of basalt fiber reinforced polymers depend on the quantity of the oil agent applied for the thread and its structure (oleophilic or oleophobic) that it is important to consider when forming the polymer-matrix composites with the required indicators.

Keywords: basalt threads, phenol formaldehyde oligomer, mixture of monomers, modification of threads, microwave processing, laser processing

на отечественном и международном рынке полимерной продукции большие потенциальные возможности улучшения свойств полимерматричных композитов заложены в использовании эффективных и недорогих наполнителей, в число которых, безусловно, входят минеральный наполнитель — базальт и волокна на его основе.

В данной работе для исследований использовались базальтовые нити (БН) разных производителей: БН-У производства Беличского завода (Украина), БН-Б – г. Брянск, БН-К – г. Красноярск, БН-1 и БН-2 НИИ «Графит», г. Москва. В зависимости от производителя базальтовые нити разли-

чаются по физико-механическим характеристикам (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства базальтовых нитей разных производителей

Характеристики	Нить				
	БН-У	БН-Б	БН-К	БН-1	БН-2
Диаметр волокна, мкм	12,7	16,7	17,3	14,0	11,3
Количество элементарных нитей в составе комплексной нити, шт.	175	126	186	101	188
Разрывная нагрузка, Н	130	170	122	98	65

Существенное влияние на взаимодействие наполнителя с полимерным связующим оказывает состав замасливателя, нанесенного на поверхность нити. В случае олиофобного (инертного) замасливателя резко ухудшается смачивание нитей смесью мономеров при получении базальтопластиков по поликонденсационному способу совмещения компонентов [1, 2], что затрудняет взаимодействие в системе волокно-олигомер и в итоге выражается снижением всех исследуемых свойств формуемого полимерного композиционного материала.

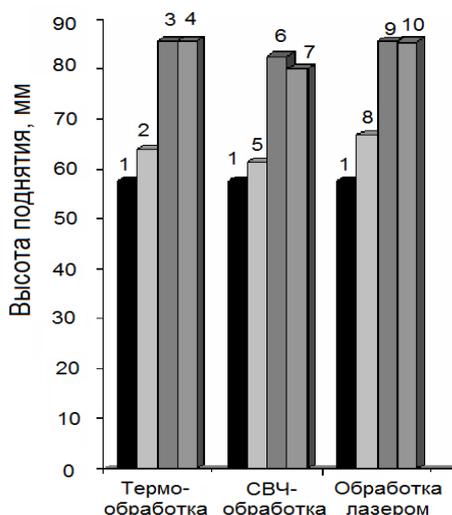


Рис. 1. Изменение смачиваемости базальтовых нитей брянского производства смесью мономеров в зависимости от вида модификации:

1 – исходная нить; 2,3,4 – термообработанная при 200, 250, 300°C соответственно; 5, 6, 7 – СВЧ-обработанная в течение 2,3,4 мин соответственно; 8, 9, 10 – обработанная лазером в течение 1, 2, 3 с соответственно

Для удаления замасливателя и активации поверхности БН были использованы электрофизические методы модификации: СВЧ обработка и обработка лазером, а также фи-

зический метод – отжиг замасливателя (термообработка). Выбор параметров модификации осуществляли по кинетическим кривым смачивания модифицированных нитей смесью мономеров. Лучшей смачиваемостью обладают базальтовые нити, термообработанные в течение 1 ч при $T = 250^\circ\text{C}$, СВЧ обработанные в течение 3 мин при мощности 750 Вт и обработанные лазером в течение 2 с при мощности 350 Вт (рис. 1).

Модификация БН указанными методами влияет на параметры их пористой структуры (табл. 2). Увеличение предельного адсорбируемого объема и полуширины пор при всех видах модификации базальтовой нити, в сравнении с исходными БН наблюдается для нитей БН-Б, БН-1 и БН-2. Для БН-У и БН-К используемые методы модификации не вызывают существенных изменений параметров их структуры.

Данные по адсорбции фенола из разбавленных растворов согласуются с данными по смачиванию модифицированных нитей разных производителей смесью мономеров методом капиллярного поднятия (рис. 2).

Таким образом, для БН-У не эффективен ни один из предложенных способов модификаций, в то время как для БН-Б, БН-1 и БН-2 все применяемые виды обработок эффективны почти в равной степени, а для нитей красноярского производства целесообразно проводить только обработку лазером. Эти результаты связаны с различием в нанесенных на нити замасливателей. Так, нити украинского и красноярского производства обрабатывались «активным» замасливателем, создающим на поверхности нити олеофильную пленку, а на БН-Б, БН-1 и БН-2 наносился «инертный» замаслива-

тель, который придает поверхности нити олеофобные свойства [4].

Таблица 2

Параметры пористой структуры базальтовых нитей различных производителей, рассчитанные по уравнению теории объемного заполнения микропор [3] для систем нить-фенол-растворитель

Нить	Модификация	Характеристическая энергия адсорбции E, кДж/моль $\times 10^{-2}$	Предельно адсорбируемый объем W_0 , см ³ /г $\times 10^{-3}$	Полуширина поры X, Å
БН-У	без модификации	1279	8,1	3,8
	термообработка	1338	6,8	3,2
	СВЧ обработка	1314	7,4	3,8
	обработка лазером	1352	6,5	3,0
БН-Б	без модификации	1304	7,5	3,3
	термообработка	1292	7,4	3,5
	СВЧ обработка	1284	8,2	3,7
	обработка лазером	1286	8,0	3,6
БН-К	без модификации	1295	8,0	3,3
	термообработка	1318	8,0	3,0
	СВЧ обработка	1314	8,1	3,1
	обработка лазером	1299	9,0	3,4
БН-1	без модификации	1344	6,3	2,6
	термообработка	1323	7,4	2,9
	СВЧ обработка	1331	6,5	2,8
	обработка лазером	1325	7,2	2,9
БН-2	без модификации	1406	4,9	2,0
	термообработка	1321	5,7	3,0
	СВЧ обработка	1319	5,2	3,0
	обработка лазером	1315	5,4	3,0

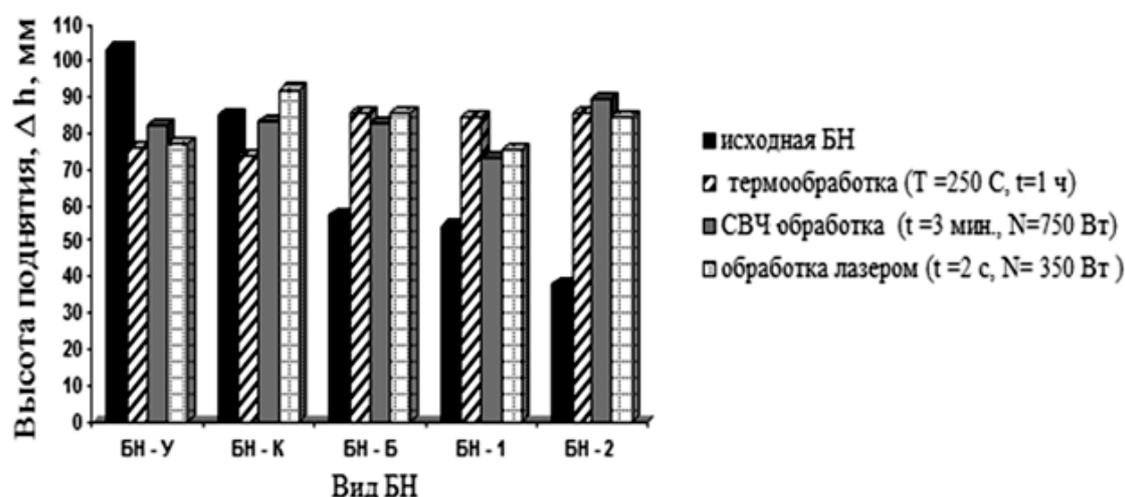


Рис. 2. Изменение смачиваемости базальтовых нитей разных производителей смесью мономеров в зависимости от вида модификации

Наличие на поверхности БН олеофобного замасливателя вызывает снижение физико-химического взаимодействия между базальтовыми нитями и мономерами, что приводит к повышению водопоглощения и снижению физико-механических характеристик базальтопластиков (табл. 3).

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что физико-химические и механические характеристики базальтопластиков на основе препрегов, полученных методом поликонденсационного совмещения компонентов, армированных модифицированными БН-Б, превышают аналогичные показатели базальтопластиков на основе исходных нитей. Так, для БП-Б, армированных термообработанными и СВЧ обработанными нитями, разрушающее напряжение при сдвиге, характеризующее адгезионное взаимодействие, возрастает. Твердость по Бринеллю БП-Б повышается при термообработке БН-Б на 15-20% и при СВЧ обработке на 15%.

Возрастают показатели БП, армированных термообработанными нитями БН-1 и БН-2: увеличиваются твердость по Бринеллю, ударная вязкость, разрушающее напряжение при сдвиге и изгибе.

Повышение физико-химических и механических свойств полученных базальтопластиков на основе модифицированных нитей свидетельствуют о более активном взаимодействии между функциональными группами модифицированных базальтовых нитей (БН-Б, БН-1 и БН-2) и фенолформальдегидного олигомера. Это достигается за счет удаления замасливателя и активации поверхности нитей представленными методами модификации, благодаря чему увеличивается количество доступных к взаимодействию функциональных групп на поверхности базальтовых нитей.

Также отмечено повышение их термостойкости, так как начальная температура термодеструкция модифицированных БП смещается в область более высоких температур и возрастает энергия активации.

Таблица 3

Физико-химические и механические свойства базальтопластиков, на основе модифицированных и немодифицированных базальтовых нитей разных производителей

Производитель	Вид модификации БН	Твердость по Бринеллю, МПа,	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	Разрушающее напряжение при сдвиге, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Водопоглощение при 2-часовом кипячении, %
БН-К	без модификации	503	600	14	329	0,26
	термообработка	500	605	14	330	0,26
	СВЧ-обработка	500	600	14	320	0,25
БН-Б	без модификации	510	640	20	342	0,24
	термообработка	614	683	27	385	0,23
	СВЧ-обработка	586	654	26	360	0,23
БН-У	без модификации	475	450	19	313	0,24
	термообработка	470	453	18	315	0,25
	СВЧ-обработка	470	448	18	313	0,25
БН-1	без модификации	203	422	12	190	0,33
	термообработка	338	518	16	210	0,28
БН-2	без модификации	196	192	7	154	0,44
	термообработка	301	289	12	178	0,35

Примечание: коэффициент вариации по свойствам составляет ~ 4-5%.

Таким образом, изучение влияния замасливателя показало, что физико-химические и механические характеристики БП зависят от количества наносимого на нить замасливателя и от его состава (олеофильный или олеофобный). Это следует учитывать при формировании

базальтопластиков с требуемыми показателями. Так, на предприятиях Украины и Красноярска на БН наносится олеофильный замасливатель, не оказывающий отрицательного влияния на взаимодействие в системе базальтовая нить – фенолформальдегидный олигомер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kadykova Yu.A. Polycondensation procedure for compounding the components in production of phenolformaldehyde polymer matrix composites / Yu.A. Kadykova, N.L. Levkina // Russian Journal of Applied Chemistry. 2017. Vol. 90. Issue 2. P. 244-251.

2. Alternative technology for manufacture of carbon composites / N.I. Zagoruiko, Yu.A. Kadykova, L.G. Glukhova, S.E. Arte-

menko // Fibre Chemistry. 2002. Vol. 34. Issue 5. P. 350-352.

3. Роль адсорбционных процессов в формировании структуры и свойств полимерных композиционных материалов / И.С. Родзивилова и др. Саратов: СГТУ, 2003. 52 с.

4. **Иващенко Е.А.** Замасливатели и аппреты для базальтовых и стеклянных волокон / Е.А. Иващенко // Химическая технология. 2008. Т. 9. № 1. С. 16-21.

Кадыкова Юлия Александровна – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, зав. кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Арзамасцев Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Васинкина Екатерина Юрьевна – ассистент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yulia A. Kadykova – Doctor of Engineering, professor of Power Supply and Electrotechnology department of the Saratov state technical university of Gagarin Yu.A.

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

Sergey V. Arzamastsev – Dr.Sc., Professor Department of Traffic Facilities Construction, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ekaterina Yu. Vasinkina – Assistant Lecturer, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim S. Alekseev – PhD, Associate Professor Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.05.19, принята к опубликованию 15.06.19

**ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПО ВЕЛИЧИНЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК
НА МОДИФИЦИРОВАННЫЕ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ
ТРЕХСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ
ОТВЕРЖДЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

И.В. Злобина

**THE IMPACT OF DIFFERENT MAGNITUDE OF IMPACT LOADS
ON MODIFIED IN A MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD
OF A THREE-LAYER STRUCTURE ON THE BASIS
OF CURED CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS**

I.V. Zlobina

В настоящее время значительная часть элементов несущих конструкций и обшивки летательных аппаратов различного назначения изготавливается из армированных волокнами полимерных композиционных материалов (ПКМ). При этом особое внимание уделяется углепластикам. В структуру несущих конструкций включаются металлические элементы в виде сеток сотовых промежуточных слоев, что повышает несущие способности изделия, но и создает дополнительные концентраторы напряжений. При эксплуатации воздушных транспортных систем велика вероятность воздействия на их силовые конструкции и обшивку ударных нагрузок, инициированных столкновением с твердым телом. Выполнены исследования восприятия ударной нагрузки трехслойными образцами из отвержденных углепластиков с промежуточными сотовыми элементами после их обработки в СВЧ электромагнитном поле. Установлено, что трехслойные конструкции поглощают часть ударного импульса и не передают его полностью последующим элементам. Кратковременная обработка углепластиков с сотовыми элементами в СВЧ электромагнитном поле способствует улучшению демпфирующих свойств в среднем на (72-98)% в зависимости от величины ударного воздействия.

Currently, a significant part of the elements of the bearing structures and cladding of aircraft for various purposes is made of fiber-reinforced polymer composite materials (PCM). In this case, special attention is paid to carbon fiber. The structure of the supporting structures includes metal elements in the form of grids of cellular intermediate layers, which increases the bearing capacity of the product, but also creates additional stress concentrators. When operating air transport systems, there is a high probability of impact on their power structures and the skin of shock loads initiated by a collision with a solid body. The studies of shock load perception by three-layer samples of hardened carbon fiber with intermediate honeycomb elements after their processing in the microwave electromagnetic field are carried out. It is established that three-layer structures absorb part of the shock pulse and do not transmit it completely to subsequent elements. Short-term processing of carbon plastics with cellular elements in the microwave electromagnetic field improves the damping properties on average by (72-98)% depending on the magnitude of the impact. The obtained results indicate an increase in the strength of mechanical bonds of PCM with metal elements, as well as a change in the structure of

Полученные результаты свидетельствуют о повышении прочности механических связей ПКМ с металлическими элементами, а также об изменении структуры матрицы после воздействия СВЧ электромагнитного поля, и могут быть использованы при разработке технологий финишной обработки сформированных и отвержденных изделий из ПКМ для повышения устойчивости последних к ударным нагрузкам.

Ключевые слова: динамическая прочность, ударное нагружение, твердое тело, демпфирование, сила удара, сотовые металлические элементы, трехслойные структуры, СВЧ электромагнитное поле, углепластики

Анализ научно-технической информации из разных источников свидетельствует о широком применении в энергетике, авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон, а также тканей. Рынок производства указанных композитов стабильно расширяется и охватывает не только авиаракетную отрасль и ветроэнергетику, а также строительство, производство маломерных судов, автомобилестроение, робототехнику [1-6].

Для современных и перспективных изделий авиационной техники весьма характерна сложная трехслойная структура ПКМ, включающая сотовые металлические конструкции, заполняющие пространство между внешними оболочками углепластика, что вызывает определенные сложности при расчете, проектировании и изготовлении таких изделий. Они предназначены для восприятия и передачи распределенных нагрузок, действующих на элементы конструкции летательного аппарата. Несущие слои воспринимают растяжение-сжатие, сдвиг в плоскости слоев и поперечный изгиб и предохраняют от внешнего воздействия сотовый наполнитель, обеспечивающий жесткость конструкции [7-9].

Углепластики, как и другие ПКМ, отличаются высокой прочностью в направлении

the matrix after exposure to microwave electromagnetic field, and can be used in the development of technologies for finishing formed and cured PCM products to increase the resistance of the latter to shock loads.

Keywords: dynamic strength, impact loading, rigid body, damping, force of impact, the cellular metallic elements, three-layer structure of a microwave electromagnetic field, carbon fiber

укладки волокон и на один-два порядка меньшей прочностью при изгибе, растяжении в направлении, перпендикулярном армированию и при межслоевом сдвиге. Эта особенность ПКМ стимулирует проведение исследований и разработку конструкторско-технологических методов повышения прочности ПКМ в указанных направлениях. Наличие сотовых заполнителей вносит дополнительные факторы, влияющие на отличие восприятия эксплуатационных нагрузок конструкциями из ПКМ от расчетных. Это необходимо учитывать при разработке технологий обработки и упрочнения трехслойных изделий. Изложенное свидетельствует о необходимости исследований и разработки методов повышения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов из ПКМ различных технических систем с учетом наличия в их составе металлических элементов различной конструкции.

Перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений, а также восприятие ударных (динамических) нагрузок, в том числе ударных нагрузок скоростными твердыми тела-

ми. Ударное воздействие вероятно при эксплуатации технической системы в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, при старте и посадке на неподготовленную полосу, в ходе боевых действий. При действии динамических (ударных) нагрузок проявляются некоторые отрицательные особенности волокнистых композиционных материалов, в частности, анизотропия по отношению к направлению нагрузки относительно схемы армирования, понижает вязкость разрушения, что требует проведения конструкторско-технологических упрочняющих мероприятий.

Для повышения физико-механических характеристик ПКМ используются различные химические, физические, механические, электрические методы, а также конструктивные решения. Одним из перспективных методов является квазиструктурирование отвержденных ПКМ в процессе кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля, о чем свидетельствуют полученные нами результаты [10-11]. Кратковременная (до 2 минут) обработка отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле способствует улучшению демпфирующих свойств при восприятии ударной нагрузки на (7-24,4)% в зависимости от схемы армирования и материала матрицы. Однако влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на восприятие ударных нагрузок ПКМ, в частности углепластиков, в составе трехслойных конструкций с сотовым наполнителем нуждается в дополнительном изучении.

Целью данной работы является изучение влияния воздействия на модифицированные в СВЧ электромагнитном поле отвержденные углепластики с металлическими сотовыми структурами различных по величине ударных нагрузок.

Для проведения исследований использовался экспериментальный лабораторный комплекс на базе компьютерного виброакустического комплекса ВК-01 с программным обеспечением ZetLab (ООО «Электронные технологии и метрологические системы», г. Зеленоград) и компьютерной тензометрической установкой с программным обеспече-

нием LabView (ИП «Майоров», г. Орел). Внешний вид лабораторного комплекса представлен на рис. 1. В экспериментах использовали трехслойные образцы (рис. 2) в виде балок сечением 15,5×15,0 мм длиной 117 мм. Толщина внешних пластин из углепластика типа ВКУ – 1,5 мм, толщина стенок сотовых элементов из алюминиевого сплава – 0,3 мм. Ударное воздействие обеспечивалось падающим с высоты 330, 660 и 1000 мм шаром Ø 22,5 мм весом 47,44 г из закаленной стали ШХ-15 (HRC 50...55), что позволяло оценить воздействие на образцы различных по величине ударных нагрузок. Ориентация удара обеспечивалась трубчатой направляющей.

Использовали по 5 контрольных образцов каждого материала и подвергнутых воздействию в течение 1 минуты СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц на дистанции 200 мм, что соответствовало плотности потока энергии (ППЭ) $17 \cdot 10^4$ мкВт/см². При данных режимах согласно выполненным нами ранее исследованиям [10-13] обеспечивается максимальное повышение прочности ПКМ при действии статических нагрузок. Для моделирования технологии обработки крупногабаритных изделий обшивки летательных аппаратов для обработки применяли установку «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) с излучателем рупорного типа.

Ударный импульс по закрепленному жестко в рамке образцу передается на опоры и рамку устройства нагружения. Через рамку импульс передается тензометрическому датчику. В процессе исследований фиксировали кинетику нарастания ударной нагрузки и записывали текущую картину ее роста и спада после окончания удара.

Скрин-шоты экрана монитора экспериментальной тензометрической установки представлены на рис. 3. Результаты обработки экспериментальных данных – в таблице и на рис. 4.

Видно, что зависимость воспринятой и переданной датчику (нижележащим конструкциям) ударной нагрузки от величины энергии удара, задаваемой высотой падения

шара-ударника, для контрольных образцов является практически прямолинейной. У обработанных образцов наблюдается значительно менее выраженная зависимость, в большей мере соответствующая степенной функции. Обработка ПКМ в СВЧ электромагнитном поле на принятых в эксперимен-

те режимах приводит к снижению передаваемой образцом силы удара в среднем на (72-98)% в зависимости от высоты падения шара, то есть эффект определенного демпфирования ударной нагрузки в большей степени проявляется при большей высоте падения (кинетической энергии удара).

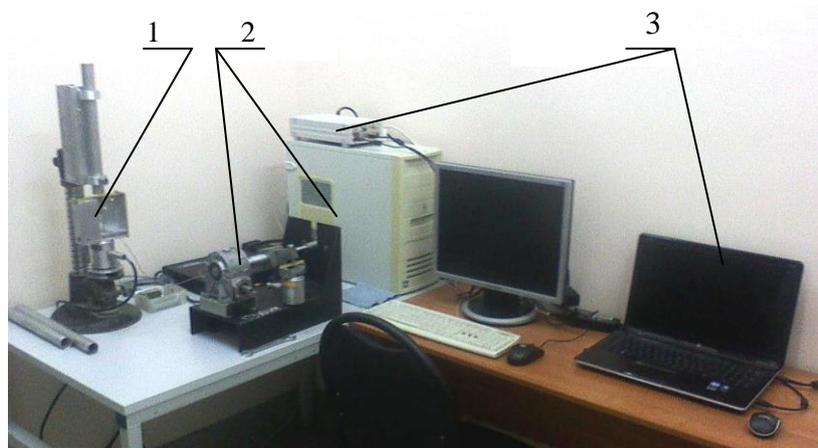


Рис. 1. Исследовательское рабочее место в составе устройства ударного нагружения:
1 – тензометрическая компьютерная станция с программным обеспечением LabView (г. Орел);
2 – компьютерный виброакустический комплекс ВК-01 (ООО «Электронные технологии и метрологические системы», г. Зеленоград) 3 – виброакустический комплекс

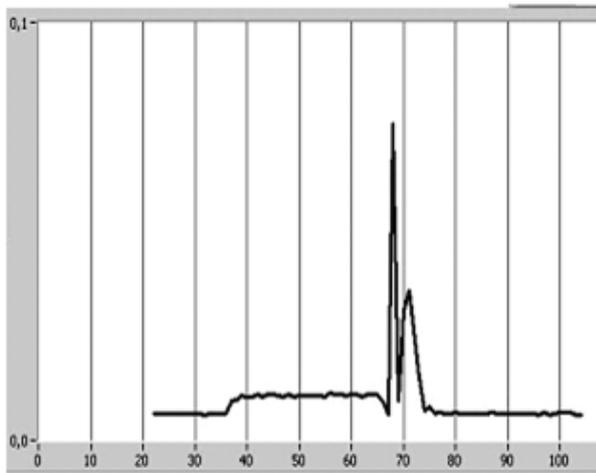


Рис. 2. Трехслойный образец для проведения исследований:
1 – пластины углепластика, 2 – сотовый алюминиевый наполнитель

Изучение внешнего вида поверхности удара образцов выявило появление существенных продольных расслоений контрольных образцов с сотовыми элементами, проявившихся уже при высоте падения шара 330 мм и простирающихся практически на всю толщину внешнего слоя. На обработанных образцах наличие трещин и отслоений не выявлено при высотах падения 330 и 660 мм. Отслоения появляются лишь при доведении высоты падения шара до 1000 мм. Протяженность продольных трещин и расслоений в контрольном образце составила более 50 мм практически от точки удара до торцевой поверхности. При этом для внешнего слоя характерно расслоение как в верти-

кальной, так и в горизонтальной плоскости, что проявляется в малой ширине отслоившихся комплексов волокон (1 мм и менее). Нижележащие слои ПКМ отслоились только в вертикальной плоскости в виде пластин. При падении шара с высоты 1000 мм трещины и отслоения образовывались на протяжении всего образца.

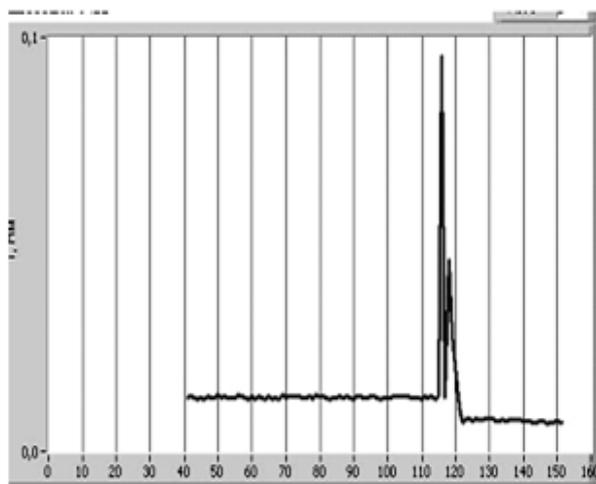
У обработанных образцов протяженность трещин не превышает (15-20) мм и они локализованы в области торцевых поверхностей образца, то есть в области концентраторов напряжений. В целом полученные результаты соответствуют полученным ранее данным по ударной прочности ПКМ без металлических элементов.



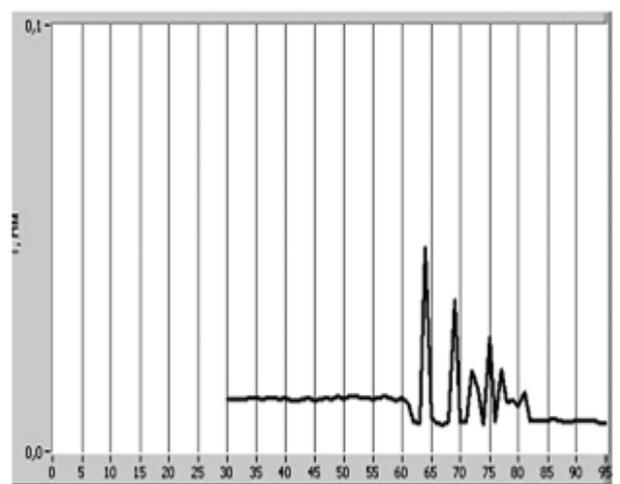
a



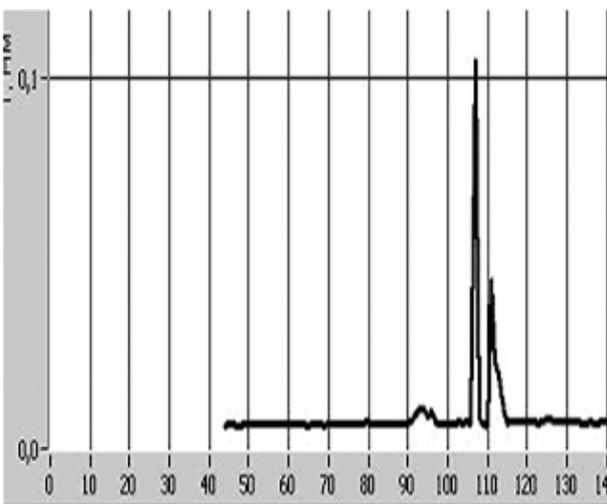
б



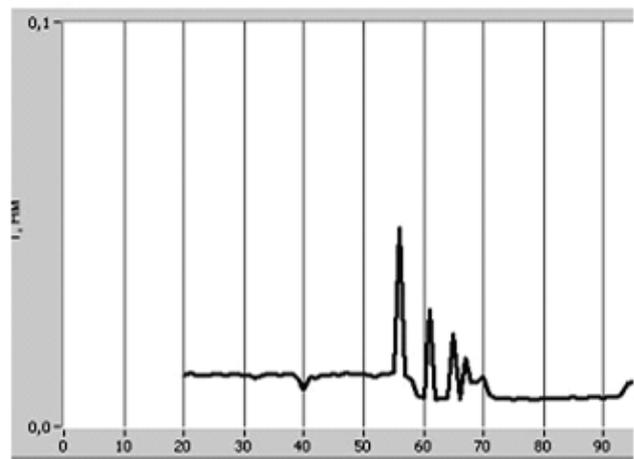
в



г



д



е

Рис. 3. Кинетика силы удара падающего с высоты 330 (*a*, *б*), 660 (*в*, *г*) и 1000 (*д*, *е*) мм стального шара на трехслойную структуру (2 внешних слоя углепластика типа ВКУ, средний слой – металлические соты). Контрольный образец (*a*, *в*, *д*), обработанный образец (*б*, *г*, *е*). По горизонтальной оси – время в мкс

Средние зафиксированные силы удара (Н) падающего с различной высоты на образец шара

Вид образца	330 мм	660 мм	1000 мм
Контрольный P_K	71,23	85,5	99,6
Обработанный $P_{об}$	41,4	43,1	50,27
Изменение силы удара $\Delta = P_K / P_{об}, \%$	72	98	98

$P, Н$

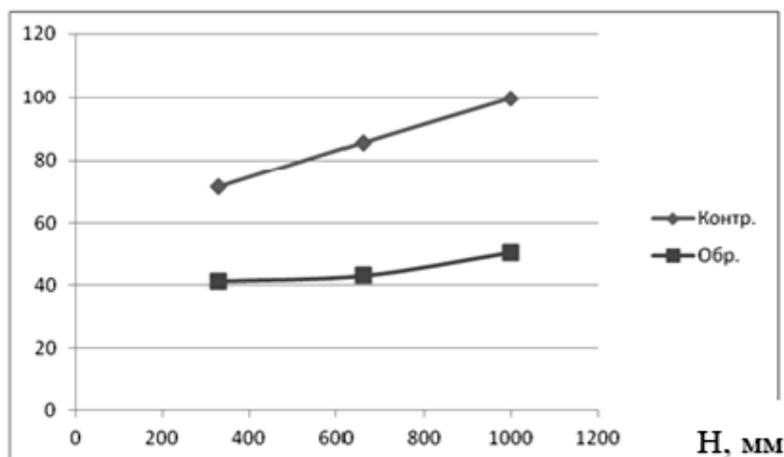


Рис. 4. Зависимость силы удара, переданной трехслойной структурой «углепластик – соты» от высоты падения шара-ударника

Механизм демпфирования ударных нагрузок отвержденными образцами ПКМ с металлическими элементами может быть предложен следующий. Как нами ранее установлено [12, 13], воздействие СВЧ электромагнитного поля приводит к уменьшению размеров агломератов и пор, увеличению количества агломератов и росту фрактальной размерности их поверхности, что обеспечивает повышение количества точек контактного взаимодействия матрицы и волокон. Это способствует росту равномерности перераспределения нагрузки в его объеме и улучшению условий для рассеяния энергии удара, которому не препятствуют значительные пустоты и неоднородные агломераты. Интенсивное выделение джоулевой теплоты в области расположения металлических сотовых структур приводит к интенсификации диффузионных процессов в контактной зоне с объемом ПКМ, некоторому размягчению матрицы и ее более плотному контакту с данными структурами, что повышает связанность всей конструкции и, соответственно, ее прочность и жесткость. В то же время относительно мягкие металлические струк-

туры, имеющие сложную пространственную форму, стабильно получая энергию удара от внешнего слоя ПКМ через многочисленные механические связи, гасят ее в процессе пластических деформаций, что снижает долю ударного импульса, передаваемого на нижележащие слои композиционного материала.

Установлено после кратковременной обработки в СВЧ электромагнитном поле стабильное снижение силы удара, передаваемой отвержденными полимерными композиционными материалами сотовым конструкциям от 72 до 98%. При этом наблюдается практическое отсутствие трещин и расслоений, характерных для контрольных образцов. Рост ударной нагрузки с увеличением энергии удара имеет характер прямолинейной зависимости для контрольных образцов и степенной — для обработанных в СВЧ электромагнитном поле. При этом в последнем случае увеличение ударного воздействия оказывается мало зависящим от исходной энергии удара. Одновременно возрастают упругие свойства конструкции и практически не наблюдается трещин и расслоений, характерных для контрольных образцов.

Полученные результаты свидетельствуют о повышении прочности механических связей ПКМ с металлическими элементами и переконструировании матрицы после воздействия СВЧ электромагнитного поля, и могут явиться основой для создания технологий финишной обработки трехслойных изделий из ПКМ для повышения устойчивости последних к ударным нагрузкам.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240 «Рас-

крытие механизма взаимодействия микроволнового излучения с отвержденными полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон в сочетании с внедренными в поверхностный слой связанными металлическими элементами, периодически распределенными в плоскости армирования наполнителем, применительно к конструкционным элементам авиационных робототехнических комплексов».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирный М.** Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/> (дата последнего обращения 03.03.2019 г.).

2. **Кошкин Р.П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, (дата последнего обращения 03.03.2019 г.).

3. <http://compositeonline.ru/technology/3989> (дата последнего обращения 03.03.2019 г.).

4. https://vpk.name/news/195774_fpi_sozd_at_kompaktnogo_letayushego_robota.html (дата последнего обращения 03.03.2019 г.).

5. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.

6. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

7. Разработка сеток для молниезащитных авиационных конструкций из полимерных материалов / Л.Р. Вишняков, В.А. Коханый, И.Н. Коханая, Е.М. Андриенко // *Композиционные материалы в промышленности: материалы XXV Междунар. конф. Уфа: Украинский инф. центр «Наука. Техника. Технология»*, 2005. С. 277.

8. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветрогенераторов / Л.Р. Вишняков, О.В. Зубков, В.А. Коханый, И.Н. Коханая // *Технологические системы*. 2014. № 1. С. 58-63.

9. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин и др. // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. № 3.

10. **Злобина И.В.** Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструкционных элементов из неметаллических композиционных материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

11. Zlobina I.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Научные технологии*. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

12. **Злобина И.В.** Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // *Вестник РГАТУ*. 2017. № 1 (40). С. 236-242.

13. Теоретико-экспериментальное исследование влияния параметров межфазной зоны отвержденного полимерного композиционного материала под действием микроволнового излучения на его прочностные характеристики / И.В. Злобина, К.С. Бодягина, С.П. Павлов и др. // *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния*. 2018. № 4 (38). С. 34-48.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.06.19, принята к опубликованию 15.06.19



ЛЕТОПИСЬ

К ДВАДЦАТИПЯТИЛЕТИЮ КНИГИ В.Г. КИНЕЛЕВА «ОБЪЕКТИВНАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ. ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ»

Ю.С. Архангельский

25 YEARS SINCE PUBLICATION OF THE WORK BY V. KINEL'EV «OBJECTIVE NECESSITY. HISTORY, PROBLEMS, AND PROSPECTS FOR RUSSIA'S HIGHER EDUCATION REFORM»

Yu.S. Arkhangelsky

Участникам совещания проректоров по учебной работе вузов России, состоявшегося в середине 90-х годов XX века в Москве, устроители совещания раздали только что изданную книгу «Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы реформирования высшего образования России», написанную председателем Государственного комитета Российской Федерации по высшему образованию В.Г. Кинелевым [1]. Автор этих строк, тогда проректор по учебной работе Саратовского государственного технического университета, с большим вниманием выслушал доклад В.Г. Кинелева, с которым тот выступил на этом совещании. Огромное впечатление произвел безупречный русский язык докладчика, грандиозные планы реформирования высшего образования России. Возвращался в Саратов с твердой уверенностью, что с таким руководителем высшей школе России все по плечу.

Дома залпом прочитал книгу. В ней В.Г. Кинелев анализирует причины, обусловившие необходимость глубоких изменений в системе высшего образования России на рубеже XX-XXI вв., оценивает тогдашнее состояние и возможные пути дальнейшего развития высшей школы

страны. Книга заинтересовала коллег. Те брали ее, читали и возвращали с загадочной улыбкой, мол «да, но...».

С той поры прошло 24 года. В высшей школе России прошли, проходят и, очевидно, еще будут происходить масштабные реформы, и в преддверии двадцатипятилетия книги В.Г. Кинелева хочется еще раз прочитать ее и оценить его доводы, аргументы, прогнозы с учетом результатов реформирования высшего образования страны.

Введение. Сопоставим оценки, проблемы высшего образования России, данные во введении книги В.Г. Кинелева, с реалиями сегодняшнего дня. Читаем:

«Уходящий XX в. подводит итоги свершениям и заблуждениям человечества. Вместе с XX в. уходят полярность и крайность суждений, нетерпимость к инакомыслию, рожденные предшествующими столетиями. Все очевиднее становится несостоятельность восприятия мира не как единого целого, а как некоего пространства, разделенного непреодолимыми государственными и этническими границами. Мы идем к качественно иному сообществу народов, к единому экономическому пространству, единой системе коммуникаций, информации, к цивилиза-

ции, где гармония с природой и бережное отношение к человеку, надо верить, будут приоритетными»¹.

«Надо верить»... А не надо ли оценивать риски, если начать перестраивать серьезную государственную структуру, руководствуясь только верой?

Единый мир... Заканчивается второе десятилетие XXI в. Мир по-прежнему разделен государственными границами.

Единое экономическое пространство... А санкции, в первую очередь экономические, к нашей стране? А экономические противоречия между странами Запада? А стремление Украины к разрыву всех отношений с Россией? На Ближнем Востоке идет война... А проблемы с беженцами, хлынувшими в Европу?

Признаюсь, еще при первом чтении книги уверенности в наступлении эпохи единого мира не испытывал. Единого мира не было ни во времена К. Маркса, ни в XX в. Переход нашей страны к рыночным отношениям не сделал мир однополярным. Экономическая и политическая конкуренция сохранится и в однополярном мире. Но народ России никогда не согласится на однополярный мир, когда нам придется, по сути дела, отказаться от государственной независимости.

Читаем дальше:

«Реформа высшего образования – объективная необходимость.... Успех преобразований во многом будет зависеть от предоставления гражданам широких возможностей для раскрытия их потенциала, использования ими своих способностей в деле созидания»².

А какие в этом отношении были ограничения в той системе высшего образования, которую следует реформировать? Выпускники вузов имели возможность карьерного роста. Инженер, начальник цеха, главный инженер, директор, заместитель

министра, министр... Можно было продвигаться по партийной и профсоюзной линиям, делать карьеру в искусстве, спорте... Вот стать, как сейчас говорят, олигархом, открытым, легальным, было нельзя. Но при чем здесь высшая школа? Непросто было получить разрешение на поездку за границу? А здесь при чем высшая школа?

Так что заставляет говорить о реформе высшего образования России? Прочитавший всю книгу узнает, но из введения ясности на этот счет просто нет. Правда ведь?

Далее автор во введении своей книги говорит об отставании России от стран Европы в области высшего образования:

«Трудно представить, что 200 лет назад в Российском государстве нечасто можно было встретить человека, который толково ответил бы на вопрос, что такое физика, химия... Русская культура была погружена в религиозные изыскания и традиции... Немногим более ста лет назад в России еще существовало рабство, миллионы крестьян не получали даже начального образования»³.

И автор приходит к выводу, что:

«... если вести речь об общем образовательном уровне народов, населяющих огромные просторы нашей страны, то надо признать, что сегодня работы здесь непочатый край»⁴.

Да, отставала Россия. В прошлом. А в космос-то полетел первым Ю.А. Гагарин. Биографию его знает каждый.

А что касается рабства в России... Историки в связи с крепостным правом говорят о феодальном строе. Рабовладельческий строй и феодальный – две большие разницы.

И если говорить об объеме работы в системе высшего образования, то ее непочатый край и в 1995 г., и сейчас, 24 года спустя, но вряд ли можно объяснить ее объем в те годы низким уровнем образования граждан России.

¹Кинелев В.Г. Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы реформирования высшего образования России. М.: Республика, 1995. С. 17.

²Там же. С. 18.

³Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 19.

⁴Там же. С. 18.

Новая Россия наследовала весьма высокий уровень образования граждан, проживающих как в городе, так и в сельской местности.

И вот сопоставьте. Это:

«К концу XIX в. молодой российский капитализм уверенно выходил на мировой рынок. Наступала новая эра в развитии России. Как былинный богатырь поднималась огромная страна»¹.

И это:

«Но сильна еще была ненависть к недавним владельцам крепостных душ. Постоянно разжигаемая поборниками разного рода утопических доктрин, она нашла себе выход в революциях 1917 г. Затем тяжелейшие испытания в первые послереволюционные годы и в период репрессий 30-х гг., выпавшие на долю интеллигенции»².

Из-за чего все же в 1917 г. в России произошли революции? Что, народ 50 лет после отмены крепостного права собирался с силами, копил злобу на помещиков, а потом совершил одну за другой две революции? Или к 1917 г. новые эксплуататоры так достали, как говорится, людей, что те в октябре (ноябре) 1917 г. свергли одну власть и установили другую?

Что касается репрессий 30-х годов, то нет никого, кто относился бы снисходительно или оправдывал их, но говорят и пишут об этом трагическом периоде нашей истории так, словно причины этих событий носят исключительно внутрисоциальный характер. Но не будем забывать, что репрессии начались после гражданской войны. В те годы воевали друг с другом красные и белые, но красным пришлось бороться еще и с интервенцией на Западе, Севере, Востоке. У них возникла подозрительность, а это провоцировало политику жестоких репрессий. Вы согласны?

Заключительная часть введения неожиданна. Ведь книга о необходимости реформы высшего образования России? И вот читаем:

«... несмотря на горький опыт революционных прорывов, все еще нет-нет да раздаются голоса о необходимости кардинальной ломки социальных институтов, в частности структуры и оснований функционирования высшего образования, которое до сих пор «не претерпело коренных изменений». Словно не было и нет в России такой высшей школы, громадное значение которой признается во всем мире, которая обеспечивала и обеспечивает высококвалифицированными специалистами все направления науки, техники, культуры, оказывает определяющее влияние на общественный прогресс»³.

Так у высшей школы России проблем нет? А пафос введения? Но с последними словами введения согласны все:

«... не имеет будущего тот народ, который не противопоставляет невежеству духовность, забывает свои исторические корни и отвергает опыт предыдущих поколений»⁴.

Вот именно! Нельзя забывать свои исторические корни и отвергать опыт предшествующих поколений.

Сравнивая впечатления от прочтения введения книги В.Г. Кинелева тогда, 24 года назад, и сейчас, можно сказать, что это две большие разницы. После того, первого прочтения введения на душе был подъем, вдохновение. В стране произошли принципиальные изменения. Мы все, граждане новой России, понимали, какие грандиозные преобразования нас ждут во всех сферах жизни. Что должно произойти в системе высшего образования?

И тут на эту тему книга В.Г. Кинелева...

Да, какие-то шероховатости во введении, помнится, чувствовались. Но это были небольшие неровности на дороге, которые не замечались при стремительной езде по этой дороге.

Теперь, через 24 года, читаешь введение уже спокойнее. За плечами опыт про-

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 19.

²Там же. С. 19.

³Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 22-23.

⁴Там же. С. 24.

житых лет, можно сравнивать то, что ожидалось, с тем, что получилось. О шероховатости уже спотыкаешься, останавливаешься, задумываешься.

Глава 1. Высшая школа России. Состояние и проблемы. Первая глава книги В.Г. Кинелева начинается с вопроса: каковы возможности России для удовлетворения образовательных потребностей молодежи в настоящем и будущем? Вопрос важный, потому что читаем:

«Положение стран в современном мире определяется и в еще большей степени будет определяться их интеллектуальным потенциалом, зависит от ... качества подготовки специалистов... Это значит, что соперничество все больше будет сдвигаться в область соревнования национальных систем образования. Здесь особую роль играет высшая школа. Опыт стран, достигших в последние десятилетия экономического подъема, ... свидетельствует о решающей роли высококвалифицированных специалистов, понимающих суть и необходимость их...»¹.

Автор книги разумно хочет удержаться как от необоснованного восхищения, так и от огульной критики отечественной высшей школы, и признается, что:

«В целом наша высшая школа соответствует требованиям, которые представляет к специалистам экономика страны и общество. По многим направлениям, прежде всего, естественно-научным, техническим, культуры и искусства, мы готовили, да и сейчас готовим специалистов высокого класса»².

Если с этим кто-то будет спорить, пусть объяснит так называемую «утечку умов». Да, в сложные 90-е годы государство принимает посильные меры поддержки высшей школы. В 1992 г. принят закон Российской Федерации «Об образовании». Помнится, преподаватели с большим интересом и надеждой приня-

ли этот закон, в котором провозглашались³:

- гуманистический характер образования,
- единство федерального культурного и образовательного пространства,
- общедоступность образования,
- светский характер образования,
- свобода и плюрализм в образовании,
- демократический характер управления образованием.

Весьма интересны и убедительны приведенные в первой главе книги В.Г. Кинелева сведения о высшей школе России тех лет: бесплатное образование на конкурентной основе, серьезная конкуренция отечественных вузов с самыми престижными вузами Запада, приводятся подробные сведения о количестве и разнообразии вузов в те годы, об уровне финансирования высшей школы, о числе обучающихся в вузах, о повышении квалификации преподавателей, о подготовке в вузах России иностранных граждан, об инфраструктуре вузов России, о численности профессорско-преподавательского состава вузов России, о расширяющихся международных связях отечественной высшей школы⁴. Сведения по этим вопросам в таком сконцентрированном виде трудно, если вообще возможно найти в других публикациях.

В книге, написанной в 90-е годы, не уйти от темы «мы и Запад». Читаем:

«...надо признать тот факт, что далеко не все вузы России, включая и хорошо известные университеты и институты инженерно-технологического профиля, отвечают в полной мере современным требованиям».

Имеется определенный разрыв между в известной степени консервативными образовательными структурами, господствовавшими в нашем обществе на протяжении длительного времени, и образовательными структурами ведущих стран мира, которые отличаются дина-

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 28-29.

²Там же. С. 29.

³Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 31-32.

⁴Там же. С. 32-40.

мизмом, быстрой адаптацией к изменениям в сфере экономики, науки, культуры. Причин тому много. Одной из них является длительная самоизоляция высшей школы России. Наше международное сотрудничество на протяжении многих лет ограничивалось в основном странами Восточной Европы и десятком стран так называемого «третьего мира», которые пытались идти по социалистическому пути развития»¹.

Так что? Вина наших вузов в том, что у них не было сотрудничества с вузами Западной Европы? И только?

Прошло 24 года. На все добрые предложения России о сотрудничестве Запад отвечает санкциями.

Что же следует сделать с высшей школой России?

«В настоящее время... открываются большие возможности и перспективы для выхода из изоляции и постепенной интеграции сначала в европейскую, а затем и в мировую образовательную систему. Этот процесс... будет затруднен, если мы не устраним различия между системами высшего образования России и зарубежных стран... Конечно, все это требует больших материальных средств... Другое дело – воспитание убежденности в том, что это крайне необходимо для дальнейшего демократического развития нашего общества»².

Итак, сформулирована задача: переделать систему высшего образования России на западно-европейский, американский лад. Помнится, в те годы преподаватели обсуждали эту идею:

– Зачем это нужно?

– А чтобы выпускники наших вузов могли свободно со своими дипломами работать за границей.

Что же, наши бакалавры, магистры уезжают за границу (об «утечке умов» мы уже говорили), а оглядимся в своих вузах. Много ли у нас работает преподавателей,

приехавших к нам с Запада? А на предприятиях? Что, в каждом цехе, отделе работают иностранцы?

Автор книги, разумеется, предвидел вопросы наших преподавателей, нужно ли нам перенимать структуру и что-то еще с Запада, и ссылается на высказывания на эту тему авторитетных ученых, педагогов. Но обилие ссылок подтверждает, что здесь не все так очевидно. Не правда ли?

В целом первая глава дает возможность читателю пополнить свои знания о конкретных фактах, о состоянии и событиях высшей школы России. И главное, здесь поставлена задача о таком реформировании исторически сложившейся структуры высшей школы России, после которого она будет по своей структуре схожа с высшей школой Запада. При этом автор чувствует, что у этого пути будет много скептиков и откровенных противников. Прошло 24 года...

Глава 2. Из истории российского высшего образования. Вторая глава В.Г. Кинелева об истории высшего образования России, и читать ее очень интересно. Но вопрос возникает уже по первому абзацу:

«Российские вузы имеют не столь длительную историю, как, например, университеты Западной Европы»³.

Это констатация факта или тут подчеркивается эдакая отсталость России? И далее: *«Русские цари Борис Годунов и Василий Шуйский... приближали к себе иностранных ученых, советовались с ними об организации гражданского образования, знали, что оно необходимо для развития России... Но не слишком много сумели сделать в этом направлении»⁴.*

И цари... Им иностранцы все рассказали, объяснили, а цари так ничего и не сумели сделать для своего царства.

Но интересная глава, интересная... Помню, первым высшим учебным заведением в России мы считали Славяно-греко-латинскую академию. Оказывается, за чет-

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 41.

²Там же. С. 42.

³Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 51.

⁴Там же. С. 61.

верть века до этого грамотой царя Алексея Михайловича было пожаловано право преподавания полного курса наук Киево-Могилевской академии, расположенной на территории Левобережной Украины.

Подробно описана преобразовательная деятельность Петра I. Подчеркивается, что все это Пётр I учинил в результате путешествия по Европе:

«В Англии он изучал систему европейского образования и поручил В.Я. Брюсу подготовить по этому вопросу специальный доклад»¹.

Ну да, ну да... А если бы не путешествовал?

Петр I основал Морскую академию, Артиллерийскую и Инженерную школы, Медицинское училище, но:

«Школы готовили узконаправленных специалистов в основном для морского флота: судостроителей, геодезистов и др.»².

И далее:

«... нет достаточных оснований для отнесения их к сложившемуся к тому времени на Западе многопрофильному высшему учебному заведению университетского типа»³.

И что это значит? Говоря современному, профильные вузы хуже университетов? Многие ли преподаватели высшей школы с этим согласны?

Те, кто считает, что первым университетом в России является МГУ, узнают, что это не так: первый университет на базе Петербургской академии был открыт на 31 год раньше и назывался академическим. В середине XVIII в. 7 лет этот университет возглавлял М.В. Ломоносов.

Во второй главе говорится, что Московский университет был основан императрицей Елизаветой Петровной по инициативе М.В. Ломоносова, но нет ни слова о его баталиях с иностранцами, о которых все знают из кинофильма о М.В. Ломоно-

сове. Так были между ними споры или нет?

Но о вкладе иностранцев в образование дворянской молодежи сказано подробно, уважительно:

«Заметное развитие получило домашнее воспитание и образование при участии иноземных педагогов, главным образом французов, знакомивших своих воспитанников с произведениями великих французских философов, литераторов, математиков, физиков, химиков... великосветская молодежь, получившая домашнее образование, превосходила по знаниям молодых людей, окончивших университеты...»⁴.

Впечатляет подробный рассказ о зарождении высшего образования в странах Западной Европы, и делается это, подчеркивает автор книги, для сравнения процесса с тем, что был в России. У них-то старейший университет основан в Италии аж в 1119 г.⁵

Но вузы в России создавались, и в 1802 г. было организовано первое министерство народного образования. Начали издавать указы, уставы, инструкции, и как бы сейчас сказали, – методические указания и пособия.

«18 апреля 1800 г. было отменено введенное Павлом I запрещение ввозить книги из-за границы. В учебных заведениях появились переводные труды западноевропейских экономистов и философов, знакомящие россиян с развитием зарубежной общественно-политической мысли»⁶.

Очень интересная глава, очень... Как заинтересованно автор книги пишет о взаимосвязи светского образования с духовным!⁷

Подробно описаны царские и министерские недостатки в управлении высшим образованием и протесты на все это профессорско-преподавательского состава⁸.

И вот дело дошло до советских времен:

«Основы высшего образования в России после Октябрьской революции 1917 г. закладывались с учетом требований нарож-

⁴Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 61.

⁵Там же. С. 61-62.

⁶Там же. С. 66.

⁷Там же. С. 70-72.

⁸Там же. С. 73-82.

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 53-54.

²Там же. С. 55.

³Там же. С. 55.

давшейся командно-административной системы»¹.

Дальше рассказывается о советской высшей школе с перечислением ее недостатков.

Во-первых, для восстановления народного хозяйства после гражданской войны потребовалось подготовить большое количество специалистов, организовать массовое обучение, в том числе лиц, не имеющих законченного среднего школьного образования. Вот и пришлось срочно создавать университеты, институты, резко увеличить число студентов.

Во-вторых, основополагающие принципы советской высшей школы, по В.Г. Кинелеву, предусматривали строгий надзор за учащимися, методы принуждения, подавления инакомыслия, игнорировали воспитание свободной личности.

В-третьих, научный поиск истины подменяли догмами, что было особенно характерным для гуманитарного образования².

В четвертых, после революции 20 лет доступ в вузы детей бывших дворян, священников был закрыт³.

Наконец, считает автор книги, закончился XX в., в стране произошли решающие социально-экономические изменения:

«В России развернулись... процессы децентрализации; преобразование отношений собственности и сознания конкурентной рыночной среды, демократизации..., наметилась интеграция в мировую политическую, экономическую и социальную общность»⁴.

В конце главы читаем:

«В числе основных составных частей реформ на федеральном, региональном и вузовском уровне следует отметить, прежде всего, две: защищающую высшую школу от прямого негативного влияния рынка и обеспечивающую дальнейшее

расширение автономии вузов, изменение принципов управления ими по типу, требуемому рыночной системой»⁵.

Как такое можно осуществить? Управлять по-рыночному, но чтобы рынок на высшую школу не влиял?

Что бросается в глаза, читая вторую главу? Очень подробно, до мелочей, дат, фамилий, излагаются не только крупные, но и более мелкие события в высшем образовании России.

То и дело встречаешь подчеркнуто уважительное, почтительное отношение к западно-европейскому высшему образованию и очевидно критичные оценки советской высшей школы. Но это понятно. Книга написана в начале 90-х годов.

Глава 3. Новые подходы к подготовке специалистов. Третья глава книги В.Г. Кинелева – стержневая, потому что дает ответ на главный вопрос: что нового и каким путем высшая школа России даст своим студентам.

В.Г. Кинелев начинает главу с разговора о знаковом событии:

«В июле 1993 г. в Москве состоялся международный конгресс представителей науки и образования России, других членов Содружества Независимых Государств, зарубежных стран четырех континентов... его основные цели и задачи: рассмотреть итоги уходящего столетия в области образования, определить параметры его дальнейшего развития, наметить пути объединения усилий мировых образовательных систем в целях гуманизации образования и воспитания свободного человека, ... людей, отвергающих идеологические догматы...»⁶.

О чем же больше всего говорили на конгрессе?

«О чем бы ни заходил тогда разговор, он неизбежно касался вопросов использования национальными высшими школами положительного опыта других стран. В частности, широко обсуждались про-

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 82.

²Там же. С. 85.

³Там же. С. 86.

⁴Там же. С. 90.

⁵Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 91.

⁶Там же. С. 95.

блемы, связанные с введением в России многоуровневого высшего образования, которое широко применяется за рубежом»¹.

Ну, разумеется! О чем же более злободневном в реформировании высшего образования в России в начале 90-х могла идти речь? Надо следовать опыту стран Запада, раз Россия вернулась к рыночным отношениям.

Но вот что странно:

«Вопрос не стоял так: лучше или хуже та или иная образовательная система. Главное – отвечает ли она как потребностям сегодняшнего дня, так и в долгосрочном плане, ... изменениям, происходящим в мире»².

Не надо сравнивать две системы? Вот есть две системы – западно-европейская и восточно-европейская, обе функциональны, имеют свои проблемы, достоинства и недостатки, перспективы. Как выбрать одну без их сравнения? Да и надо ли выбирать? Одну! Это похоже на диктат, моду или нет?

Со времени издания В.Г. Кинелевым своей книги прошло 24 года. Еще живы преподаватели, которые работали в той, прежней системе высшего образования.

За четыре года бакалавриата нельзя дать студентам объем знаний, который студенты получили при пятилетней подготовке инженеров (специалистов). Бакалавр приходит на производство, рядом с ним работает пожилой инженер, получивший за пять лет учебы больший объем базовых знаний, потом инженер уходит на пенсию, и на производстве остается бакалавр, базовая подготовка которого слабее. И что? В конце концов, на производстве за все будут отвечать бакалавры. Потом они станут начальниками. И в чем тут польза Отечеству от многоуровневой системы высшего образования? Такие оценки можно услышать от ветеранов высшей школы.

Однако перечитываем третью главу дальше:

«... в настоящее время системы высшего образования, различаясь в частности, имеют много общего, ибо все они в той или иной степени отражают рыночные экономические отношения, которые сейчас преобладают в мировом сообществе. Все они решают задачу: дать студентам образование ..., развить у них способность приспосабливаться к жизни в рыночных условиях, использовать их ... для удовлетворения собственных потребностей»³.

Откровеннее не скажешь!

Ах, как верили у нас в 90-е годы в рыночную дружбу, в однополярный единый мир. И вот санкции... А разве не так же верили коммунисты в неизбежность построения коммунизма во всем мире?

А дальше в третьей главе опять начались перечисления замечаний к прежней системе высшего образования.

Во-первых, плохо, что специализация в технических вузах начиналась уже на младших курсах.

Во-вторых, плохо, что у нас много инженеров. У нас 5,2% от общего числа занятого населения. У США всего 1,4%.

В-третьих, плохо, что у нас поступают в вузы не в результате конкурсного отбора, а благодаря системе льгот.

В-четвертых, плохо, что у нас учебные программы ориентированы на «среднего» студента.

В-пятых, плохо, что у нас ценят наличие у человека диплома о высшем образовании.

В-шестых, плохо, что у нас наставники студентов, то есть наши преподаватели, работают порой «спустя рукава».

Сколько плохого! Как быть? И В.Г. Кинелев подробно пишет о возможностях преодоления всего этого с помощью самообразования⁴. Самообразование? Да! Но есть проблема: человеку нужен диплом

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 96.

²Там же. С. 96.

³Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 85.

⁴Там же. С. 99-101.

о высшем образовании. Его спрашивают при поступлении на работу.

И вот на странице 105 мы читаем, какая же реформа предлагается:

«Основные направления осуществляемой реформы высшего образования России можно сформулировать следующим образом: создание многообразия типов высшего образования по срокам и программам профессиональной подготовки, формам обучения, выдаваемым дипломам интеграция вузов России в мировую образовательную систему, решение проблем, связанных с установлением эквивалентности документов об образовании, ученых степенях и званиях, децентрализация и демократизация управления высшей школой, предоставление действительной самостоятельности вузам и их региональным объединениям в решении стоящих перед ними задач и, вместе с тем, сохранение образовательного пространства страны, развитие альтернативного государственному высшему образованию»¹.

И тут же автор четко и ясно заявляет, что нам надо брать пример с США:

«Опыт США... представляется нам весьма позитивным. Этот опыт... может быть использован в нашей практике. Необходимость изучения опыта США диктуется рядом обстоятельств»².

Целым рядом обстоятельств... Какими же? Обстоятельство названо одно:

«Россия испокон века ориентировалась на Запад, воспринимала в основном западную культуру, науку, искусство, литературу»³.

И теперь надо продолжать в том же духе. Что же, 90-е годы...

Автор сообщает, что в США ездила группа руководителей наших вузов, все там изучала и пришла к выводу, что россиянам необходимо перенять опыт организации высшего образования США...

Преподавателям российских вузов, не бывавшим в США, читать третью главу интересно. В ней речь идет о системе образования США, с которой мы стали делать копию на бескрайних просторах нашей страны.

Читаем... О-о-о!

К высшим относятся все учебные заведения, следующие за средней школой. Одни колледжи готовят рабочих, другие своих выпускников готовят для поступления в университеты, в третьих выпускникам присваиваются стеном бакалавра науки, технологии или искусства.

Технические вузы выпускают техников. Университеты делятся на группы. В первую группу входят исследовательские университеты 1 и 2 разрядов и многоотраслевые университеты, присваивающие степень доктора. Во вторую группу входят университеты, ведущие более узкую профессионализацию.

И вот в этой, можно сказать, запутанной системе Россия должна найти то, чему мы могли бы подражать⁴. Не менее разветвленная система высшего образования во Франции⁵.

24 года назад все это читать было очень интересно. Сейчас переживаешь все это спокойнее. Теперь-то, пожалуй, ясно, что необходимость реформы диктовалась не отставанием нашей страны в обучении граждан в системе высшего образования, а стремлением изменить рожденное в прежние десятилетия. Заменить! Но на что? Сейчас на разных уровнях признают, что в 90-е годы у нас активно действовали американские советники. Тогда считалось, США и Россию связывает святое – рыночные отношения. Так почему не взять за пример систему высшего образования США?

Но уж очень серьезная реформа, и автор книги в третьей главе вновь обращается к истории высшего образования России, ища в ней хотя бы какие-то доводы в поль-

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 105-106.

²Там же. С. 106.

³Там же. С. 106.

⁴Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 111.

⁵Там же. С. 112-114.

зу перехода на многоуровневую систему, принятую в США, в Европе.

Оказывается, многие преподаватели и не знают, что и в России были бакалавры. Так сначала назвались преподаватели духовных академий, а с конца XVIII в. бакалаврами были выпускники учительского института Московского университета.

В 1933 г. ученая степень «магистр» была возвращена, но уже в 1934 г. ее упразднили, и даже предложение А.Н. Косыгина в 60-е годы ввести в стране бакалавриат и магистратуру не поддержали¹.

И вот 90-е годы. Новая Россия.

«Мы не можем стоять в стороне... Как не интегрироваться с единой программой подготовки специалистов высшей квалификации, которая разрабатывается в странах Западной Европы, США?»².

И уже в 1991 г. в России заговорили и начали обсуждать стратегию перехода на многоуровневую систему³.

Прошло 24 года. Анализ результатов реформирования высшей школы России заслуживает, видимо, самостоятельной книги. А если сделать анализ коротким?

Было провозглашено, что высшее образование в России будут давать университеты. И это было осуществлено. Политехнические, экономические, медицинские институты после аттестации получили статус технических, экономических, медицинских университетов. И что изменилось в их работе по существу? Немного, а кто-то скажет, что ничего. Открыли, правда, в технических университетах несколько гуманитарных специальностей (профилей). И в городе, по сути дела, появилось два университета: прежний (классический) и технический, например. Но В.Г. Кинелев предостерегает на этот счет: надо определить, целесообразно ли в одном городе иметь несколько университетов? Надо такие вузы объединять?

Техникумы переименовали в колледжи. Еще расходы. Что дает это новшество, по сути дела? Ну да, теперь уехавший за границу выпускник колледжа быстрее найдет общий язык с работодателем. Выпускник колледжа – понятно, а кто такой выпускник техникума?

А ведь была четкая система: это ПТУ, техникумы, институты и университеты. Что здесь плохого? Устарело разве что?

Оказывается, рабочей профессии можно обучаться в университете. Такая идея лет 10 назад обсуждалась в вузах. Преподаватели недоумевали: ни профессор, ни доцент, ни ассистент научить рабочей профессии не могут. Это по силу мастеру производственного обучения.

Наконец, бакалавриат, магистратура...

Это дает молодым людям возможность выбора. Кто-то хочет что-то узнать за меньшее время и идти работать.

Четыре года – и вы бакалавр. Знаете меньше, чем инженер (специалист), но можете работать. У вас высшее образование. Но...

«Не менее важная задача – определить правовой статус лиц, имеющих диплом бакалавра... Нормы трудового и иного права не содержат такого понятия. Необходимо внести соответствующие изменения в действующие квалификационные требования»⁴.

Любопытны последние страницы третьей главы. Речь идет об экзаменах на той или иной стадии обучения и о профессиональном обучении в области экономики.

Что касается вступительных экзаменов, то с позицией автора книги все согласны: экзамен, конкурс. А вот форма проверки знаний абитуриентов? Что, надо бы найти талантливого абитуриента и принять его в вуз вне конкурса, дать дополнительный балл? Вряд ли большинство преподавателей с этим согласны. В каких единицах измерять талант? А в чем принципиальная разница – вопрос на бумаге или на экране компьютера?

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 113.

²Там же. С. 117.

³Там же. С. 121.

⁴Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 130.

Ну и конечно, как можно было в 90-е годы не говорить о подготовке экономистов? В чем проблема? Читаем:

«Негативное в подготовке экономистов – в нечетком формировании их мировоззрения и навыков практической деятельности. Первое строилось догматически, второе – следствие привычки ограничиваться использованием в работе только нормативно-инструктивных материалов»¹.

И мы понимаем: была плановая экономика, а теперь рынок. Рынок! Все иное. А потому:

«Экономические факультеты и отделения должны быть в вузах профилями. И в этом отношении нельзя не согласиться с утверждением, что настала пора серьезно заняться подготовкой экономистов-профессионалов, владеющих совершенными методами организации и управления»².

И эта задача была решена. Такие факультеты были созданы в тех же в технических университетах, созданы разные профили экономического направления, даже если в городе есть экономический университет.

Времена были такие, спрос на экономические профессии был небывало велик.

Прошло время. Сейчас спрос на специалистов технического профиля. И что делать со студентами экономического профиля? Увлечлись тогда, создали экономические кафедры в неэкономических вузах зря?

Как-то разговорились два профессора. Один – с кафедры, готовящей электроэнергетиков, бакалавров и магистров. Другой – с кафедры, готовящей строителей, дипломированных специалистов.

– Скажите, зачем вы готовите специалистов-строителей 6 лет? Это же те же инженеры? Но тех учили 5 лет.

– Представьте себе, летит самолет, и над атомной электростанцией случилась авария, самолет падает на АЭС. Мы должны научить молодых специалистов строить так, чтобы упавший на крышу АЭС самолет не разрушил сооружение.

– Понятно, но внутри АЭС оборудование будет обслуживать наш бакалавр с четырёхлетним образованием.

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинелев В.Г. Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы

реформирования высшего образования России. М.: Республика, 1995. 328 с.

¹Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 145.

²Там же. С. 147.

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 телефонам:

8 (8452) 99-87-63 — Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

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» Архангельскому Ю.С. 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. Аскаровой

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 25.06.2019
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 15,75 Уч. изд. л. 7,3
Тираж 500 экз. Заказ 54 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 2019 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: 25.06.2019
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 15,75 Publication base sheet 7,3
Circulation: 500 printed copies Order 54 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*